



TECNOLOGÍA
en marcha

Revista trimestral
Octubre-Diciembre 2021
Volumen 34 N° 4
ISSN 0379-3982 / ISSN-E 2215-3241



Publicación y directorio en catálogos

latindex

REDIB
Red Iberoamericana
de bases de datos y contenidos
digitales

DOAJ

Dialnet

melICA

SciELO

ET
Editorial Tecnológica
de Costa Rica

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Comisión Editorial

Felipe Abarca Fedullo. Director.
Instituto Tecnológico de Costa Rica

Juan Antonio Aguilar Garib
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Universidad Autónoma de Nuevo León.
México

Carlos Andrés Arredondo Orozco
Facultad de Ingenierías
Universidad de Medellín. Colombia

Lars Köhler
Experimenteller Botanischer Garten
Georg-August-Universität Göttingen.
Alemania

Jorge Solano Jiménez
Instituto Costarricense del Cemento
y del Concreto

Edición técnica

Alexa Ramírez Vega

Revisión filológica

Esperanza Buitrago Poveda

Diseño gráfico

Felipe Abarca Fedullo

Diagramación

Alexa Ramírez Vega

Diseño de cubierta

Felipe Abarca Fedullo

Imagen de cubierta

<https://unsplash.com/photos/HMCNkAK45r0>

Datos de catalogación en publicación

Tecnología en Marcha / Editorial Tecnológica
de Costa Rica. - Vol. 34-4, Octubre-
Diciembre- Trimestral
ISSN-E 2215-3241

1. Ciencia y Tecnología –
Publicaciones periódicas CDD:600



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Apdo 159-7050 Cartago, Costa Rica
Tel.:(506) 2550-2297, 2550-2618

Correo electrónico: editorial@itcr.ac.cr

Web: editorial.tec.ac.cr

http://revistas.tec.ac.cr/tec_marcha



Editorial Tecnológica
de Costa Rica

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

La Editorial Tecnológica de Costa Rica es una dependencia especializada del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Desde su creación, en 1978, se ha dedicado a la edición y publicación de obras en ciencia y tecnología. Las obras que se han editado abarcan distintos ámbitos respondiendo a la orientación general de la Institución.

Hasta el momento se han editado obras que abarcan distintos campos del conocimiento científico-tecnológico y han constituido aportes para los diferentes sectores de la comunidad nacional e internacional.

La principal motivación de la Editorial es recoger y difundir los conocimientos relevantes en ciencia y tecnología, llevándolos a los sectores de la comunidad que los requieren.

La revista *Tecnología en Marcha* es publicada por la Editorial Tecnológica de Costa Rica, con periodicidad trimestral. Su principal temática es la difusión de resultados de investigación en áreas de Ingeniería. El contenido de la revista está dirigido a investigadores, especialistas, docentes y estudiantes universitarios de todo el mundo.

Publicación y directorio en catálogos





TECNOLOGÍA *en marcha*

Contenidos

Protagonist of renewable energy in distributed generation: a review Protagonista de las energías renovables en la generación distribuida: una revisión <i>Vivek Saxena, Narendra Kumar, Uma Nangia</i>	3
Evaluación de la pérdida y desperdicio de alimentos en el Instituto Tecnológico de Costa Rica Food loss and food waste assesment at the Instituto Tecnológico de Costa Rica <i>Alina Rodríguez-Rodríguez, Raquel Mejías-Elizondo, Andrea Acuña-Piedra, Carolina Vindas-Chacón</i>	16
Variabilidade espacial da palha de soja distribuída na colheita e sua relação com o estande final de aveia preta Spatial variability of soybean straw distributed at harvest and its relationship with the final stand of black oats <i>Júlio Tagliari-Balestrin, David Peres-da-Rosa, Bruno Cazaroto</i>	28
Optimización económica para el cultivo de papa, zanahoria y cebolla en Cartago, Costa Rica Economic optimization for the cultivation of potatoes, carrots and onions in Cartago, Costa Rica <i>David Barboza-Navarro, Johanna Solórzano-Thompson, Javier Paniagua-Molina</i>	38
Evaluación de la red de distribución: conexión del vehículo eléctrico híbrido enchufable Evaluation of the power distribution network: plug-in hybrid electric vehicle connected <i>Jose Galarza-Linares, David Condezo-Hurtado, Bartolome Saenz-Loayza, David Huarac-Rojas</i>	50
Análisis de flujo de materiales de los residuos sólidos del distrito de Guápiles Material flow analysis of solid waste in the district of Guápiles <i>Ariana Solís-Blandón, Lilliana Abarca-Guerrero</i>	63
Pepino (<i>Cucumis sativus</i> L.) cultivado en ambiente protegido: correlaciones entre variables Cucumber (<i>Cucumis sativus</i> L.) grown under greenhouse conditions: correlations among variables <i>José Anibal Cruz-Coronado, José Eladio Monge-Pérez, Michelle Loría-Coto</i>	75

Optimización de las condiciones de crecimiento de la bacteria endófitra *Klebsiella oxytoca* en matraz y en biorreactor

Optimization of the growth conditions of the endophytic bacteria *Klebsiella oxytoca* in flask culture and in a bioreactor

Alexander Schmidt-Durán, Randall Chacón-Cerdas..... 92

Aislamiento de la región promotora del gen *FaPAL2* de *Fragaria x ananassa* Cv. “Camino Real” y evaluación de su funcionalidad en respuesta a la irradiación UV-C

Isolation of the promoter region of the *FaPAL2* gen of *Fragaria x ananassa* Cv. “Camino Real” and evaluation of its functionality in response to UV-C irradiation

Stephannie Masís-Ramos, Jesús Alonso Garduño-Hernández, Edmundo Lozoya-Gloria, Giovanni Garro-Monge..... 105

Determinación del caudal ambiental mediante una metodología hidrobiológica, considerando variables de cambio climático en el río Pejibaye, Cartago, Costa Rica

Determination of the environmental flow using a hydrobiological methodology, considering variables of climate change in the Pejibaye river, Cartago, Costa Rica

Fernando Watson-Hernández, Laura Chavarría-Pizarro, Francisco Quesada-Alvarado, Isabel Guzmán-Arias..... 118

Generalidades del recurso eólico en Costa Rica: caso de estudio de la provincia de Cartago

Costa Rica’s wind resource assessment: A case study for Cartago province

Gustavo Murillo-Zumbado, Gustavo Richmond-Navarro, Pedro Casanova-Treto, Julio César Rojas-Gómez..... 130

Monitoreo de la concentración de SO₂ en el aire y características fisicoquímicas del agua de lluvia en el Volcán Irazú

Monitoring of SO₂ concentration in the air and physicochemical characteristics of rainwater in the Irazú Volcano

Kevin David Chaves-Solano, José Pablo Sibaja-Brenes, Esteban Pérez-López..... 146

On the review of electronic technologies applied to implantable medical devices

Hacia la revisión de tecnologías electrónicas aplicadas a dispositivos médicos implantables

Ronny García-Ramírez, Gabriel Madrigal-Boza, Edgar Solera-Bolaños, Muhammad Ali Siddiqi, Christos Strydis, Alfonso Chacón-Rodríguez, Renato Rimolo-Donadio..... 163

Planificación de operaciones de construcción

Construction operations planning

Mauricio Gutiérrez-Loria, Ismael Mora-Chavarría, Jonathan Quirós-Campos..... 175

Identificación de factores que afectan la aplicación de la prueba Short Physical Performance Battery en centros de atención para el adulto mayor

Identification of affecting factors for the SPPB test in senior attention centers

María Cristina Vargas-Del-Valle, Olga Sánchez-Brenes, Magaly Sánchez-Brenes, Arturo Huete-Calderón, Ronny Arias-Mora..... 192

Protagonist of renewable energy in distributed generation: a review

Protagonista de las energías renovables en la generación distribuida: una revisión

Vivek Saxena¹, Narendra Kumar², Uma Nangia³

Fecha de recepción: 5 de octubre de 2020

Fecha de aprobación: 9 de febrero de 2021

Saxena, V; Kumar, N; Nangia, U. Protagonist of renewable energy in distributed generation: a review. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-4 Octubre-Diciembre 2021. Pág 3-15.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i4.5404>



- 1 Delhi Technological University, Delhi, India. A.B.E.S. Engineering College, Ghaziabad, Uttar Pradesh, India. Email: vyksaxena1234@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-5769-1864>
- 2 Delhi Technological University, Delhi, India. Email: narendrakumar@dtu.ac.in
 <https://orcid.org/0000-0002-6841-6550>
- 3 Delhi Technological University, Delhi, India. Email: umanagia@dce.ac.in
 <https://orcid.org/0000-0001-6922-2582>

Keywords

Battery storage; demand response; distributed generation; renewable energy resources; optimization approach.

Abstract

In the present scenario, world is progressing in the direction of energy crisis and severe ecological concerns due to the excessive utilization of non-renewable resources. Fossil fuel reserves are inadequate and produce hazardous geological contamination throughout the energy extraction. To meet such challenges, active amalgamation of renewable energy resources (RER) with distributed generation (DG) is the only way to progressing in future. Demand response scheme and battery storage is also essential for the reliable and consistent energy generation and efficient utilization. The role of RER in the evolution of DG is presented in this paper. The objective of this paper is to evaluate the barricades, reimbursements and influence of renewable energy based DG planning and framework. Moreover, a comparative assessment of renewable DG optimization based on optimization criteria and enhanced outcomes are evaluated for this futuristic atmospheric friendly approach.

Palabras clave

Almacenamiento de la batería; Respuesta de la demanda; Generación distribuida; Recursos energéticos renovables; Enfoque de optimización.

Resumen

En el escenario actual, el mundo está avanzando en la dirección de la crisis energética y graves preocupaciones ecológicas debido a la utilización excesiva de recursos no renovables. Las reservas de combustibles fósiles son insuficientes y producen una contaminación geológica peligrosa a lo largo de la extracción de energía. Para hacer frente a tales desafíos, la fusión activa de recursos de energía renovable con generación distribuida es la única forma de progresar en el futuro. El esquema de respuesta a la demanda y el almacenamiento de baterías también son esenciales para la generación de energía confiable y constante y para un uso eficiente. En este artículo se presenta el papel de la generación de energía renovable en la evolución de la generación distribuida. El objetivo de este trabajo es evaluar las barricadas, los reembolsos y la influencia de la planificación y el marco de generación distribuida basada en energías renovables. Además, se evalúa una evaluación comparativa de la optimización de la generación distribuida renovable basada en criterios de optimización y resultados mejorados para este enfoque futurista amigable con la atmósfera.

Introduction

Distributed Generation (DG) is an imperative phase of modern power electrification with the usage of comprehensively acknowledged renewable energy resources (RER). The exhaustion of traditional remnant energy sources, cognizance on biological contamination and augmented price of fuel drive its admiration in the existing scenario. DG is depleting the enslavement tenure of centralized generation. It involves smaller tools for the utilization hydro power, wind power, solar power, fuel cell power, ocean energy, geothermal biomass electrification) as well as non RER [1].

Fossil fuel based traditional power plants are fulfilling the major portion of the energy demand in various countries and emanate the contaminated pollutant in environment which may cause of danger for several organism and human being on earth. Global warming, Ozone depletion, natural disaster, species extinction, health hazardous, polluted atmosphere, novel disease generation and many more are severe effects due to acceptance of non-renewable fuels.

DG has the potential for the successful integration of natural resources into advanced power system framework to facilitate the better healthy atmospheric green energy generation.

The main challenge for the amalgamation of RER in the DG planning is the intermittent nature of natural resources specifically for the major contributors: wind and solar power generation. These sources are dependent on the weather and geographical conditions. Consequently, the manifestation of demand response program and energy storage devices are also essential for the efficacious incorporation of DG and sustainable energy sources [2].

Renewable DG planning

A renewable DG based modern power system structure consist various segments for the planning and implementations. These segments can be further subdivided into; DG system design, assessment of RER, load survey, drafting of energy storage model, optimization technique and elucidation of optimization results. The key segments of renewable DG planning are shown in a progressive manner in figure 1.

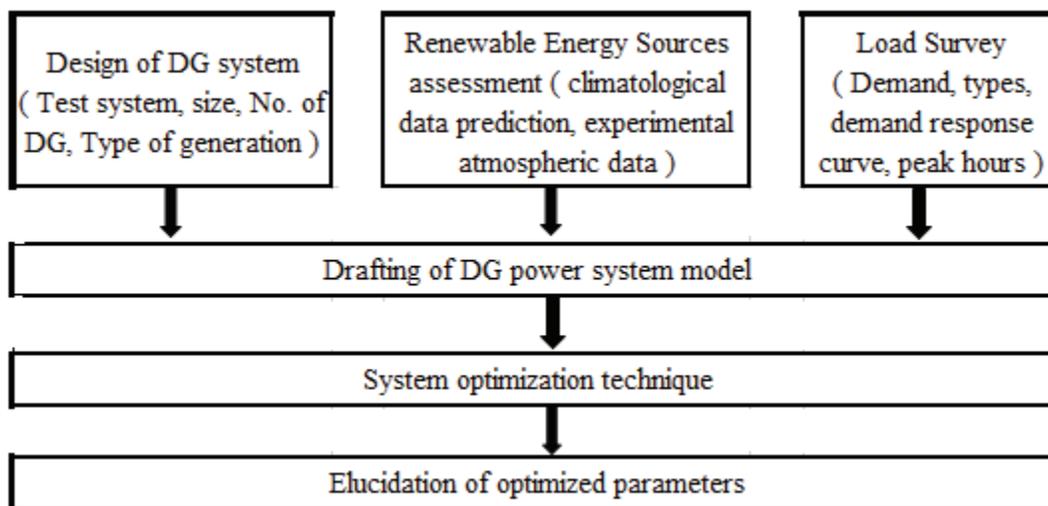


Figure 1. Key segments of renewable DG planning.

DG system design

DG system designs exhibits the types of energy generation, methodologies of battery storage and bus planning in several arrangements. The generation of energy may be based on renewable or non-RER. Renewable sources consist of solar photovoltaic (SPV) system, wind power generation, crops based generation, biomass generation and fuel cells while various types of combustion engines are incorporated with fossil fuel based generation [3].

There are several possible reliable amalgamations of renewable energy generation, utilization and energy storage although such sources have intermittent nature. Harvesting of energy from biomass and biogas could also be utilized in amalgam DG system. The low emission of pollutant based DG technologies are given in table 1.

The description and merits of various types of bus planning are as follows:

- **DC-bus architecture:** Easy to implement and generated energy is supplied to DC bus to deliver the supply DC load while AC supply could be given by using inverter devices.
- **AC-bus architecture:** Generated energy is provided to AC bus to carry forward for AC demand although DC supply is available with the help of converter devices.
- **Hybrid AC-DC bus architecture:** Better efficiency and such type of system can deliver the AC and DC power simultaneously. Inverters and rectifiers could also be used for AC-DC energy storage.

Table 1. Samples of low pollutant based DG technologies [4].

Methodologies	Explanation
Dispersed Heat Methodologies	
Solar heating of water	Solar thermal collector is used to convert sunlight into boiled water.
Heat pump	Water heating by using the temperateness deposited for a thermal reservoir.
Biomass	Water and surface heating by burning the biomass ingredients.
Dispersed Energy generation Methodologies	
SPV array	Designed to convert solar heat into electricity.
Wind mills	Designed to transform wind energy into electricity.
Micro-wind	Small-scale windmill up to 100 kW.
Micro-hydro	Designed to covert kinetic energy of water into electricity.
Biomass	Designed to extract electricity via landfill gas production and upto 40 MW.
Hybrid Heat and Power Methodologies	
Biomass	Energy generation from 100 kW biomass to 85 MWth /20 Mwe.
Upto 1 MW	Small-scale energy distribution for residential and commercial purpose.
1 MWe-10 MWe	Mid-level energy distribution for community and industry.
>10 MWe	High-level energy distribution for industries.

Renewable energy resource assessment

For renewable DG planning and implementation, it is necessary to prepare a complete framework of natural resources of energy generation as the reliability of such sources are less as compared to fossil fuel based energy generation. To meet the new environmental challenges, distributors

are required to increase the effectiveness of green energy generation though misery from intermittency. Natural resources are dependent on the local atmospheric condition, seasonal changes, soil fertility, geographical dimensions and observational forecasting.

Moreover, energy generation of solar and wind power are more intermittent in nature and an accurate assessment model is not easy to prepare for this futuristic approach. Biomass based energy generation is also reliant on weather condition but feedstock storage can ensure the uninterrupted energy generation.

Authors presented the effects of geographical conditions and ecological changes on the dispersed energy generation by natural energy sources simulated in Visayas, Philippines. Solar PV and wind power generation has been used and for investigating the annual energy generation, the relevant ecological parameters can be elaborated as monthly PV panel position optimization, mean irradiance level of solar energy and monthly average of wind speed [5].

A new indexing system has been proposed for the reliability of renewable distributed energy sources with the help of traditional fault consequence assessment approach and the minimum path technique. Moreover, a two state model and three state model has been developed for the stability enhancement, which is mainly dependent on the sensible entrance of distribution network. The outcomes has been compared with the absence of DG [6].

Consequently, higher intermittency of wind and solar power generation could be minimized by using experimental atmospheric data and climatological data prediction and these approaches are elaborated further [7]:

Experimental Atmospheric Data

Atmospheric data of intermittent type natural energy sources could be collected through on-site readings, published research, experimental atmospheric observatories, self-sponsored firms and governmental authorities. Solar energy parameters can be abbreviated as; Global solar radiation data, SPV array power output, average and seasonal annual solar irradiation, daily horizontal solar irradiance, solar intensity, hourly solar radiation and relative frequency of global solar radiation. In continuation, wind speed data characterization as; hourly mean wind speed data, monthly average wind speed data, daily wind energy data and relative frequency of wind speed.

Climatological Data Prediction

Climatological data forecasting is necessary to avoid the limitations of renewable energy generation and to estimate the reserved fuel calculations:

- Partial accessibility of services and proficiency for meteorological statistics dimension in convinced segments;
- Economic restriction that confines comprehensive climate data dimension with great persistence; and
- Failure of measuring association that intrudes the continual data apprehending for a long period.

Table 2. Cataloguing of RES forecast boundaries with outcomes [8].

Group	Dimension of forecast boundary	Outcomes
Extreme short period	Seconds to hour	Clearance cost of energy production
		Real time monitoring of grid operation and optimization
Diminutive period	Hour to hours	Fund arrangement of load scheduling
		Reliable of with justified load announcements
Intermediary period	Hours to week	Unit assurance conclusions
		Reserve precondition verdicts
		Generation dynamic / inert mode pronouncements
Prolonged period	Week to year and above	Operational budget optimization
		Forecasting and supervision of processes
		Prospective observations on wind power project

Demand response

Demand response scheme is a mandatory program for DG framework in which users change their energy utilization pattern from high load hours to low load hours to get the benefits of reduced electricity charges. Most of the countries, renewable dispersed energy sources are utilized only at small-scale energy generation in modern power grid. Consequently, the need of demand response scheme as an ancillary support is highlighted for the intermittent renewable energy generation [2].

Previously, people do not know about the cost tariff and incentive schemes related to demand response in conventional power system then there is the domination of utility side to control the energy utilization of end users. Now the circumstances are different and prosumers are the stakeholders for planning and execution of energy disbursement. In continuation, three categories have been suggested for consumers' classification: industrial, commercial and residential. Moreover, the consumers can shift their load from crest load period to bottom one or they can reduce their load during peak pricing hours or use indigenous generation for the demand contentment. The benefits of above-mentioned scheme summarized in terms of: financial, risk assessment, stability, efficient commercialization, user facilities, low pricing and ecological. Numerous types of cost factors are also involved in demand response scheme namely: empowering machinery, reaction strategy, troublesomeness, missing commercial, deferment, communiqué, tariff arrangement, supervision, enticement expenditures, assessment and client edification [9, 10]. The classification of demand response scheme is shown in figure 2.

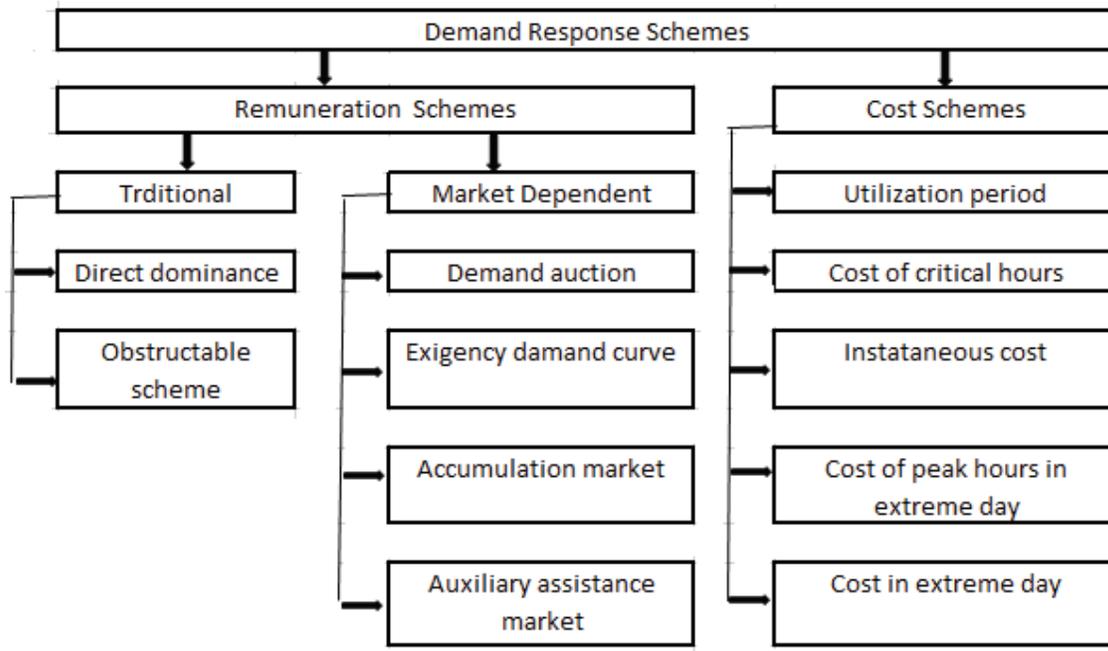


Figure 2. Classification of demand response schemes.

Energy Storage

For maximizing the level of DG penetration, energy storage is an essential part of renewable DG planning and execution. The charge storage is the key element to square up the challenges of solar and wind power generation for facilitating the futuristic opportunities of green environment. Energy storage system broadly classified in different form of energy namely; electrical, mechanical, chemical and thermal. Moreover, these methodologies have been compared in terms of technology, charge density, efficacy of retrieval, pricing, merits, demerits and applications.

The barriers for the effective implementation of battery storage are:

- Guidelines and practices adopted by distribution companies that disserves the energy storage.
- Capital cost, operating cost and maintenance cost for large-scale storage.
- Ignorance of battery storage merits.

Electricity pricing controlled by the administration normally do not facilitate the proper guidelines for saving of energy via energy storage. Moreover, the stockholders are not very much interested due to higher cost of the storage framework. In addition, the absence of remuneration for energy saving and less availability of justified literature are also affects the assimilation of such structure [11]. The cataloguing of energy storage system is shown in figure 3.

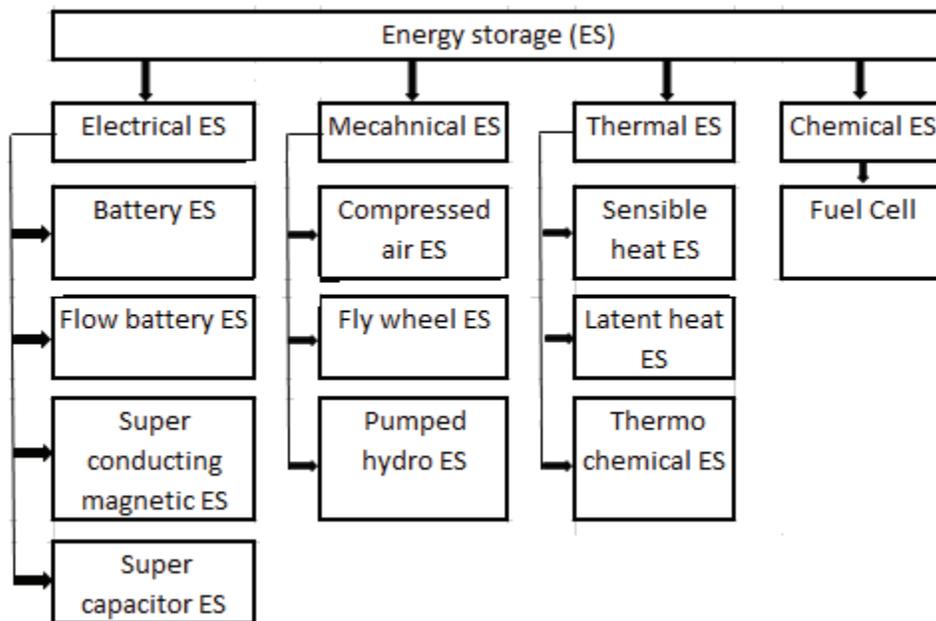


Figure 3. Cataloguing of energy storage system.

Renewable DG optimization

The frequency regulation of a DG has been carried out with the help of Moth Swarm technique of optimization, in which series of PI-PD controller is used through the incorporation of renewable energy based sources (like SPV and wind power) and energy storage devices along with electric vehicle. PI works in the primary stage while PD is in secondary and such a cascaded operation reduced the steady state error of the system in comparison of conventional PID controller, which directed to unstable transient response. For the MATLAB and SIMULINK realization, the gain and time constant parameters of SPV, wind power generator, fuel cell, fuel cell, diesel engine generator, electric vehicle and battery storage have been taken as the nominal parameter of DG [12].

An architecture of battery storage for the effective integration of distributed SPV system to avoid the circumstances of intermittent RER. Simultaneously the flexibility of grid irrespective of faults (circuit scale fault, substation scale fault and generation plant scale factor) is also comprehended that may cause of disturbance. Numerous type of battery storage architecture have been identified based on different type of working principle namely: In building distributed storage architecture, circuit / distribution storage architecture, substation / micro grid storage architecture, generation plant storage architecture and utility / grid storage architecture. The outcomes consisted the grid resilience maximization via optimizing the combination of battery storage system to increase the penetration level of renewable energy [13].

Authors proposed a technique mathematical apprehension of power and voltage quality enhancement by the amalgamation of DG in power distribution and this operation was carried out with the help of flexible multi-level switch. Loading frequency and power handling capability of feeder considered for the effective assimilation of DG with the feeder equalization. Moreover, a control framework of PI controller and a steady state converse model has been fabricated to optimize the different mode of flexible multi-level switch with the shortcomings [14]

Coordinated scheduling of renewable DG with the constraints of futuristic smart grid has been presented and such a combination is focused to sort out the disturbance due to intermittency of RER. Firstly, renewable virtual sources are taken for the procedural implementation and then the obtained characteristics are simulated for designing the strategy framework. The recommended model has shown the potential to use the pumped storage energy to vanish the intermittency of renewable energy generation and get the effective forecasting with source shedding in view of profit maximization [15].

A Novel Filter is used for the prediction of distributed solar power generation, in which geographical propinquity of energy system affects the observations. Moreover, the intermittency in cloud formation and propagation have been considered for such model at a resolution of 1 minute. This bi-level methodology consists the estimation of PV power and lower frequency measurements of sampled data [16].

Authors presented a dumping cost to evaluate the soil contamination and new framework for delivering the electrical energy at unity power factor level to minimize the distribution energy losses. Consequently, the cost required for the power congestion management also reduced and it will enhance the level of futuristic smart city power project [17].

The voltage regulation of a distribution system has been improved with the use of solar PV DG as reactive elements and independent from the information exchange and feedback assessment. The backward / forward sweep algorithm has been used for the demonstrated methodology with the consideration of irradiance level of solar energy and ambient temperature [18].

A right way off for land utilization has been recommended due to higher cost of acquiring the space for such infrastructure. The unusable land near to railway track area, water storage land and highway could be used while offers a remuneration to the owner. A geographic information system is also developed to get the details of such type of land sources [19].

The augmented risk of renewable DG due to intermittency of climatological and atmospheric condition have been highlighted with the proposal of adaptive forecaster subgroup assortment strategy for enhancing the forecast. In this two level approach binary genetic algorithm is used for the selecting the characteristic and backing of regression based vector is applied to calculate the suitability level of the estimator. The accuracy has been enhanced by 58.4% in comparison of real prediction method [20].

A case study of wind power generation as a DG to meet the demand of rural America has been analyzed and the time period till 2015 is called as pre wind era and after this post wind era. A graphical presentation has been demonstrated for the variation in the development of residential, commercial and industrial customers over the last five years of span. Along this wind speed, atmospheric temperature and load demand are also taken into account [21].

A simulation test has been done to investigate the survival of wind power generation as distributed energy sources during the abnormal condition of power failure. Seven-scenario system (Without DG, downstream, mid-way, upstream and four types of wind power generation) has been adopted to validate the results [22].

Table 3. Comparative assessment of renewable DG optimization.

Ref.	Optimization approach	Optimized parameters								
		DG Capacity / Size	DG location	System losses	Voltage profile	Cost	Calculation time	Fitness value	Power factor	Reliability
[26]	Particle Swarm Optimization	ü	ü	ü	ü					
[27]	Particle Swarm Optimization algorithm and Grey Wolf Optimization algorithm	ü	ü	ü	ü					
[28]	Coordinated optimization			ü	ü		ü			
[29]	Dragon fly-Particle swarm optimization	ü	ü	ü	ü					
[30]	Coyote Optimization Algorithm			ü	ü		ü	ü		
[31]	Generalized Benders decomposition			ü	ü	ü			ü	
[32]	Distributed generation management algorithm			ü					ü	ü
[33]	Data-driven distributionally robust optimization					ü				
[34]	Particle Swarm Optimization			ü	ü					
[35]	General Algebraic Modeling System		ü	ü	ü					ü
[36]	Particle Swarm Optimization	ü	ü	ü	ü					
[37]	Corrected moth search optimization	ü	ü	ü	ü	ü				
[38]	Genetic ant colony optimization			ü	ü		ü			
[39]	Multi-objective modified symbiotic organisms search	ü	ü	ü	ü	ü				

Due to the progression in large heat pump projects, many countries are required to advancement in the traditional grid system, which offers the possibilities of RER. For the effective integration of heat pumps with the wind power generation in distribution network, a mathematical model has been presented with the objective of profit maximization and cost reduction [23].

Wind power generation as DG has been used for the voltage profile enhancement, loss reduction and ecological benefits in the distribution network. A power control curve optimization approach has adopted for the speed regulation of windmill rotor and the optimized parameters are energy losses and voltage quality [24].

Multi objective function of DG size and allocation optimization has been considered for the operating cost, capital cost, environmental cost, wind and light abandonment cost subjected to voltage, current, equation flow and DG capacity constraints. The realization has been done with the implementation of particle swarm optimization method in wind power turbine, solar PV and gas fueled micro turbine generator [25]. A comparative assessment of renewable DG optimization is given in table 3.

Conclusions

To meet the energy demand with atmospheric constraints, DG is one of the important aspect of energy contentment and assimilation of RER are essential. The effective execution of renewable energy based DG are obligatory the more precise model of weather forecasting to avoid the energy intermittency and ensure the continuous power flow. Demand response program enables the energy management from consumer's side, in which the requirement of the energy is optimized to face the challenges of expansion of power system or possibilities in terms of renewable DG implementation. Subsequently, an adequate energy storage system is also enhanced the probability of incessant energy availability. A comprehensive framework and planning of natural energy based dispersed generation and optimization processes are evaluated in this paper. The outcomes of this evaluation can be summarized as; for a new environmental friendly energy world, the forecasting of RER availability are necessary accompanied by demand management and energy storage system.

References

- [1] V. Saxena *et al.*, "Analysis of Smart Electricity Grid Framework Unified with Renewably Distributed Generation," in *LNEE*, vol 721, 2021. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9938-5_68
- [2] V. Saxena *et al.*, "Smart Grid: A Sustainable Smart Approach," in *J. Phys.: Conf. Ser.* (2021): 012042. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2007/1/012042>
- [3] Grant Allan *et al.*, "The economics of distributed energy generation: A literature review," *Ren and Sus Energy Rev*, vol. 42, 2015, pp. 543-556. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.064>
- [4] DTI, "Review of distributed generation," A joint Government/ Ofgem report; 2007b. <https://www.ofgem.gov.uk/ofgem-publications/52326/review-distributed-generation.pdf>
- [5] A. M. A. Acuzar *et al.*, "Effects of weather and climate on renewable energy resources in a distributed generation system simulated in Visayas, Philippines," *2017 IEEE 9th Int. Conf. on HNICEM*, Manila, 2017, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/HNICEM.2017.8269454>
- [6] J. Li *et al.*, "Reliability Evaluation of Distribution Network Considering Distributed Intermittent Renewable Energy Access," *2018 Int. Conf. on CVRIS*, Changsha, 2018, pp. 214-218. <https://doi.org/10.1109/ICVRIS.2018.00059>
- [7] W. L. Theo *et al.*, "Review of distributed generation (DG) system planning and optimisation techniques: Comparison of numerical and mathematical modelling methods," in *Ren and Sust Energy Rev*, vol. 67, 2017, pp. 531-573. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.063>
- [8] J. Hui *et al.*, "Analyzing the penetration barriers of clean generation technologies in China's power sector using a multi-region optimization model," *Appl Energy* 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.034>
- [9] M. H. Albadi and E. F. El-Saadany, "Demand Response in Electricity Markets: An Overview," *2007 IEEE Power Engg Society General Meeting*, Tampa, FL, 2007, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/PES.2007.385728>
- [10] J. Aghaei and M. I. Alizadeh, "Demand response in smart electricity grids equipped with renewable energy sources: A review," in *Ren and Sus Energy Reviews*, Elsevier, vol. 18(C), 2013, pp. 64-72. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.019>
- [11] T.M.I. Mahlia *et al.*, "A review of available methods and development on energy storage; technology update," in *Ren and Sust Energy Rev*, vol. 33, 2014, pp. 532-545. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.068>
- [12] D. Khamari *et al.*, «Moth Swarm Algo based cascade PI-PD controller for freq reg of dist power gen sys with electric vehicle,» *2020, ICPC2T*, India, 2020, pp. 16-20. <https://doi.org/10.1109/ICPC2T48082.2020.9071491>

- [13] J. Confrey *et al.*, «Energy Storage Sys Arch Opt for Grid Res With High Pen of Dist Photovoltaic Gen,» in *IEEE Systems Journal*, vol. 14, no. 1, 2020, pp. 1135-1146. <https://doi/10.1109/JSYST.2019.2918273>
- [14] C. Yu *et al.*, «Feeder Power Flow Control Strategy for Flexible Multi-state Switch with Joint Access to the Dist Gen,» 2020, *ACPEE*, China, 2020, pp. 523-527. <https://doi/10.1109/ACPEE48638.2020.9136556>
- [15] H. Dong *et al.*, «Coord Sched Strategy for Dist Gen Considering Uncert in Smart Grids,» in *IEEE Access*, vol. 8, 2020, pp. 86171-86179. <https://doi/10.1109/ACCESS.2020.2992342>
- [16] S. S. Alam *et al.*, «Dist PV gen est using multi-rate and event-driven Kalman kriging filter,» in *IET Smart Grid*, vol. 3, no. 4, 2020, pp. 538-546. <https://doi/10.1049/iet-stg.2018.0246>
- [17] A. Parida *et al.*, «Opt Solar PV Based Dist Gen Sys Suitable for Cost-Effective Energy Supply,» 2020 *IEEE, PIICON*, India, 2020, pp. 1-6. <https://doi/10.1109/PIICON49524.2020.9113018>
- [18] M. Ammar and A. M. Sharaf, «Optimized Use of PV Dist Gen in Voltage Regulation: A Prob Formulation,» in *IEEE Trans on Ind Info*, vol. 15, no. 1, 2019, pp. 247-256. <https://doi/10.1109/TII.2018.2829188>
- [19] I. Asanov *et al.*, «Eval of Potential Dist Solar Gen at Right-of-Way Land of Infra Objects,» 2019, *ICIEAM*, Russia, 2019, pp. 1-6. <https://doi/10.1109/ICIEAM.2019.8742979>
- [20] A. T. Eseye *et al.*, «Adaptive Predictor Subset Selection Strategy for Enhanced Fore of Dist PV Power Gen,» in *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 90652-90665. <https://doi/10.1109/ACCESS.2019.2926826>
- [21] S. Madala *et al.*, «The Story of a Rural Public Power District – Before and After Dist Grid Conn Wind Power Gen,» 2019 *IEEE, REPC*, USA, 2019, pp. 52-61. <https://doi/10.1109/REPC.2019.00018>
- [22] L. Gumilar *et al.*, «Analysis of Short Circuit on Four Types Wind Power Plants as Dist Gen,» 2020, *ICoSTA*, Indonesia, 2020, pp. 1-5. <https://doi/10.1109/ICoSTA48221.2020.1570599089>
- [23] Q. Cui *et al.*, «Collab planning of dist wind power gen and dist network with large-scale heat pumps,» in *CSEE Journal of Power and Energy Sys*, vol. 5, no. 3, 2019, pp. 335-347. <https://doi/10.17775/CSEJJPES.2019.00140>
- [24] A. M. Eltamaly *et al.*, «Analyzing of Wind Dist Gen Conf in Active Dist Network,» 2019, *ICMSAO*, Bahrain, 2019, pp. 1-5. <https://doi/10.1109/ICMSAO.2019.8880291>
- [25] Q. Ma *et al.*, «Research on Opt for Siting and Sizing of Dist Gen Considering Wind and Light Aband and Env Cost,» 2019, *APPEEC*, Macao, 2019, pp. 1-5. <https://doi/10.1109/APPEEC45492.2019.8994588>
- [26] C. Jana *et al.*, «Finding of the Probable Size and Location of Dist Gen in Unbalanced Distribution System with Demand Uncertainty,» 2020 *IEEE Calcutta Conf*, India, 2020, pp. 417-420. <https://doi.org/10.1109/CALCON49167.2020.9106559>
- [27] K. Kumar *et al.*, «Opt Planning of Dist Gen using Hybrid Meta App,» 2020 *IEEE Conference*, India, 2020, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/PIICON49524.2020.9112955>
- [28] H. Lu *et al.*, «Network Sim-Based Cluster Coordinated Opt. Method for Dist. PVs With Inadequate Meas,» in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 65283-65293, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2984709>
- [29] V. Rafi and P. K. Dhal, «Loss Min based Dist Gen Placement at Radial Dist Sys Using Hybrid Opt. Technique,» 2020, *ICCCI*, India, 2020, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICCCI48352.2020.9104145>
- [30] G. W. Chang and N. Cong Chinh, «Coyote Opt Algo-Based Approach for Strategic Planning of PV Dist Gen,» in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 36180-36190, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2975107>
- [31] Y. Chai *et al.*, «Hierarchical Dist Voltage Opt Method for HV and MV Dist Networks,» in *IEEE Tran on Smart Grid*, vol. 11, no. 2, 2020, pp. 968-980. <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2928701>
- [32] L. N. Santos *et al.*, «A Dist Gen Manager with support for Dist Network Operator Commands,» 2020, *ICIT*, Argentina, 2020, pp. 810-815. <https://doi.org/10.1109/ICIT45562.2020.9067315>
- [33] A. Mohammadi Fathabad *et al.*, «Data-driven Planning for Ren Dist Gen in Distribution Systems,» in *IEEE Transactions on Power Systems*. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.3001235>
- [34] C. Karaom *et al.*, «Opt Alloc of Tie Switch in Dist Sys for Energy Loss Red Using PSO,» 2020 *iEECON*, Thailand, 2020, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1109/iEECON48109.2020.229528>
- [35] Z. Wang *et al.*, «Reactive Power Planning in Dist Network Considering the Cons Capacity of Dist Gen,» 2020, *ACPEE*, China, 2020, pp. 1122-1128. <https://doi.org/10.1109/ACPEE48638.2020.9136183>
- [36] Saidah and M. Masrufun, «Opt of DG Placement and Size Using PSO Based on GUI,» 2020, *ICoSTA*, Indonesia, 2020, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICoSTA48221.2020.1570615982>
- [37] P. Singh *et al.*, «Moth Search Opt for Optimal DERs Int in Conj to OLTC Tap Operations in Dist Sys,» in *IEEE Systems Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 880-888, 2020. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2911534>

- [38] J. Yang, «Research on Opt Recon of Dist Distribution Network Based on Ant Colony Opt Algo,» 2020, ICCEA, China, 2020, pp. 20-23. <https://doi.org/10.1109/ICCEA50009.2020.00012>
- [39] S. Saha and V. Mukherjee, «A Novel Meta-heuristic for Optimal Allo of Dist Gen in Balanced Dist Network Considering Hourly Load Variation,» 2020 IEEE, PIICON, India, 2020, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/PIICON49524.2020.9113054>

Evaluación de la pérdida y desperdicio de alimentos en el Instituto Tecnológico de Costa Rica

Food loss and food waste assesment at the Instituto Tecnológico de Costa Rica

Alina Rodríguez-Rodríguez¹, Raquel Mejías-Elizondo²,
Andrea Acuña-Piedra³, Carolina Vindas-Chacón⁴

Fecha de recepción: 18 de agosto de 2020
Fecha de aprobación: 6 de diciembre de 2020

Rodríguez-Rodríguez, A; Mejías-Elizondo, R; Acuña-Piedra, A; Vindas-Chacón, C. Evaluación de la pérdida y desperdicio de alimentos en el Instituto Tecnológico de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-4 Octubre-Diciembre 2021. Pág 16-27.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i4.5160>

- 1 Ingeniera Ambiental. Unidad Institucional de Gestión Ambiental y Seguridad Laboral, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: alirodriguez@tec.ac.cr.
 <https://orcid.org/0000-0003-2115-4976>
- 2 Ingeniera Ambiental. Unidad Institucional de Gestión Ambiental y Seguridad Laboral, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: rmejias@tec.ac.cr.
 <https://orcid.org/0000-0003-3312-2699>
- 3 Ingeniera Ambiental. Unidad Institucional de Gestión Ambiental y Seguridad Laboral, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: anacuna@tec.ac.cr.
 <https://orcid.org/0000-0002-0397-5116>
- 4 Estudiante de Ingeniería Ambiental. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: cvindas95@gmail.com.
 <https://orcid.org/0000-0001-9171-345X>



Palabras clave

Desperdicio de alimentos; pérdidas de alimentos; seguridad alimentaria; cambio de comportamiento; reducción de desperdicios; comedores institucionales.

Resumen

Se estima que una tercera parte de los alimentos producidos en el planeta se pierde o desperdicia, como consecuencia de técnicas inadecuadas de cultivo y factores de comportamiento relacionados con el consumidor. Esta situación ha generado importantes repercusiones sobre el ambiente, la economía y la sociedad, afectando en mayor medida a los países cuya alimentación depende de las importaciones. Como respuesta, naciones de todo el mundo han diseñado diversas estrategias para disminuir el desperdicio y aumentar la seguridad alimentaria de sus habitantes. En el caso de Costa Rica, se crea en el año 2014 la Red Costarricense para la Disminución de Pérdidas y Desperdicio de Alimentos, con la finalidad de diseñar estrategias para minimizar las pérdidas y desperdicios en el territorio costarricense. Es así como en el año 2018, el Instituto Tecnológico de Costa Rica se suma a los esfuerzos nacionales al realizar una evaluación en el Restaurante Institucional del Campus Tecnológico Central, sobre la cantidad de alimentos descartados durante su almacenamiento, preparación y consumo. Los resultados señalaron que durante una semana lectiva se generan 927,75 kg de residuos orgánicos de los cuales el 55% se descartan como producto de la pérdida y desperdicio de alimentos. De esta manera se determinó que el 9,56% de los alimentos producidos terminan siendo desechados. Estos datos forman parte de una línea base, a partir de la cual se evaluará la aplicación de nuevas estrategias que permitan mejorar la gestión de los alimentos en la Institución.

Keywords

Food loss; food waste; food security; behavioral change; waste reduction; institutional food service.

Abstract

Roughly one-third of the food produced on the planet is lost or wasted like a consequence of poor cultivation techniques and consumer-related behavioral factors. This situation generates important repercussions on the environment, the economy and society, especially in regions that its feeding depends on imports. In response, nations around the world have devised different policies to decrease waste and increase food security for their inhabitants. In the case of Costa Rica, the “Red costarricense para la reducción de la pérdida y el desperdicio de alimentos” was created in 2014 with the objective of design strategies to minimize losses and waste in the country. This is how in 2018, the Costa Rican Institute of Technological joins the national efforts to perform an evaluation in the Institutional Restaurant of the Central Technological Campus on the amount of food discarded during its storage, preparation, and consumption. Results indicate that 927,75 kg of organic waste are generated during a teaching week, of which 55% are discarded resulting of food loss and waste. In this way, it was determined that 9.56% of produced food is discarded. These data are part of a baseline, from which the application of new strategies that improve food management in the Institution will be evaluated.

Introducción

El Informe del “Estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo”, publicado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), señaló que hasta el año 2018 cerca de 821 millones de personas en el mundo no tenían los alimentos suficientes para satisfacer sus necesidades nutricionales, lo que representa una de cada nueve personas. La mayor parte de estas reside en el continente asiático, donde la cifra de habitantes en condiciones de desnutrición ronda los 514 millones, África por su parte, supera los 256 millones y América Latina y el Caribe los 42 millones. En cuanto a la prevalencia de inanición, esta aumenta a un ritmo preocupante, principalmente en el continente africano alcanzando el 19,9%. En el caso de América Latina y el Caribe, la prevalencia es inferior al 7%, no obstante, impacta al 18,5% de la población caribeña [1], [2].

Si las proyecciones de crecimiento poblacional aciertan, la demanda de alimentos podría sufrir un aumento entre el 60 y 70% para el 2050, año para el cual se espera que los efectos del cambio climático reduzcan la cantidad de tierra apta para el cultivo [3]. Mientras este escenario se proyecta, las estimaciones indican que actualmente se pierde o desperdicia una tercera parte de los alimentos cultivados, lo que representa cerca de 1,3 toneladas por año [4], [5]. No obstante, la minimización del 50% de las pérdidas y el desperdicio de alimentos actual, lograría que el aumento requerido en la producción de alimentos para el año 2050 sea tan sólo del 25% [6].

Pérdida y Desperdicio de Alimentos

El concepto de pérdida y desperdicio de alimentos (PDA) es definido por la FAO como la “reducción de la cantidad o la calidad de los alimentos en la cadena de suministro alimentario” [7]. Sin embargo, enfatiza que el concepto debe ser abordado realizando una distinción entre los términos empíricos de pérdida y desperdicio. De manera que la pérdida se refiere a disminución en la masa de alimentos consumibles durante las etapas de producción, postcosecha y procesamiento. Mientras que el desperdicio hace referencia al descarte de alimentos consumibles, durante su venta y consumo [3], [4].

Las causas de la PDA cambian según las etapas del ciclo de vida del alimento. Varios autores concuerdan en que las pérdidas durante la producción, postcosecha y procesamiento se encuentran relacionadas principalmente con una programación inadecuada de la cosecha, condiciones climáticas, infraestructuras de almacenamiento deficientes, así como, limitaciones técnicas y tecnológicas. Mientras que el descarte durante la distribución y la venta minorista es asociado a la variabilidad en la demanda de los productos perecederos, la exposición y envasado inadecuado de los productos y la eliminación de alimentos con apariencia imperfecta. Finalmente, el desperdicio durante su consumo puede ser causado primordialmente por factores de comportamiento influenciados por la demografía, elementos geográficos y sociales, así como las rutinas alimentarias que involucran la planificación, compra, almacenamiento y preparación de los alimentos y porciones [3], [7], [8].

La cantidad de PDA en los países varía según sus condiciones de industrialización y desarrollo [9]. De este modo se tiene que, en los países subdesarrollados y en vías de desarrollo el 40% de los alimentos producidos se pierde durante la postcosecha y procesamiento. Estas pérdidas se atribuyen principalmente al desconocimiento sobre prácticas de agricultura eficientes, limitaciones tecnológicas y condiciones de infraestructura inadecuadas para su almacenamiento, procesamiento y transporte. Por otro lado, el 40% de los alimentos desperdiciados en los países industrializados sucede durante su distribución y consumo. [3], [4]. En el 2015, por ejemplo, se estimó que en la Unión Europea se descartaban en promedio 173 kg de alimentos por persona al año, 55% de los cuales fueron desperdiciados en los hogares de los consumidores. En el

caso de los Estados Unidos, los desperdicios de alimentos rondan entre los 35 y 103 millones de toneladas por año [3]. Mientras que en América Latina y el Caribe las estimaciones indican que un total de 348 mil toneladas de alimentos son perdidas y desperdiciadas por día, fracción con la cual se podría alimentar a 36 millones de personas en la región [10].

Impactos ambientales, económicos y sociales de las PDA

Como lo indican Vittuari y colaboradores, el escenario de PDA tiene dos dimensiones. Por un lado, el sector agropecuario y alimentario es categorizado como uno de los que mayores repercusiones genera sobre el ambiente. Por el otro, la población mundial aumenta, la generación de desperdicios de alimentos no disminuye y la seguridad alimentaria es cada vez un reto mayor. Por esta razón, se dice que la huella de la PDA se encuentra rodeada de una gran cantidad de desafíos e impactos ambientales, económicos y sociales [3].

Desde el punto de vista ambiental, los mayores impactos relacionados con la pérdida de alimentos se asocian al uso intensivo del suelo durante la producción, la contaminación de los recursos hídricos, así como los altos consumos de agua y energía en las etapas de cultivo y procesamiento [9]. Se estima que alrededor del mundo se utilizan 1400 millones de hectáreas para producir la cantidad de alimentos que actualmente son desechados, generando a su vez una huella hídrica que ronda los 250 km², considerando únicamente la etapa de producción. En cuanto al desperdicio de alimentos, en el 2007 la FAO indicó que la huella de carbono global de la PDA rondaba los 3300 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente, siendo la fase de consumo la que generaba el 37% de la huella [10]. Este impacto se relaciona principalmente a la disposición de los residuos en los rellenos sanitarios, donde se generan altas emisiones de metano [4], [6].

En relación con el costo global causado por el desecho de alimentos, en el 2009 se estimó una suma de 750 000 millones de dólares anuales, donde la mayor contribución se identificó en la PDA de vegetales y carne [10]. Los impactos económicos tienen repercusiones que pueden ser beneficiosas para un sector, pero desfavorable para el otro. En este aspecto, diferentes autores concuerdan en que, si bien es cierto, las estrategias para reducir la PDA pueden minimizar los costos de producción, a su vez podrían impactar de manera negativa a los productores, dado que aumentaría la disponibilidad de alimentos en el mercado. Sin embargo, esta situación beneficiaría a los vendedores y consumidores, quienes podrían optar por una mayor cantidad de alimentos, a un menor precio [4], [6]. Por otro lado, diferentes estudios señalan que los esfuerzos por disminuir las PDA en países desarrollados pueden reducir los costos de los alimentos para los que tienen menores ingresos. De manera que, los recursos ahorrados puedan invertirse en la disminución de la desnutrición y en el aumento de la eficiencia en las cadenas de suministro [9].

En cuanto a los impactos sociales, la PDA genera consecuencias directas sobre la inseguridad alimentaria y la pobreza, siendo la población de los países en vías de desarrollo quienes sufren en mayor medida las consecuencias de la pérdida de alimentos [9]. En el 2018 se estimó, que pese a los esfuerzos realizados en los últimos años por mejorar la disponibilidad de alimentos, cerca de 49,5 millones de niños sufrían de malnutrición aguda, 149 millones tenían retrasos en su crecimiento, y el 33% de las mujeres en edad reproductiva eran diagnosticadas con anemia [11]. En adición, 2000 millones de personas experimentaron algún grado de inseguridad alimentaria moderada, lo que quiere decir que, aunque no sufrieron hambre, no tuvieron acceso a alimentos inocuos, nutritivos y suficientes, aumentando el riesgo de sufrir enfermedades relacionadas con la malnutrición [1], [12].

Estrategias para la reducción de las PDA

Estudios señalan que las regiones que dependen de la importación de alimentos para satisfacer sus necesidades nutricionales tienen un potencial más limitado para aumentar la producción local de alimentos, intensificando las repercusiones sobre la nutrición y seguridad alimentaria de sus habitantes [1], [4]. De esta manera, resulta indispensable que los gobiernos participen en el diseño y aplicación de estrategias que permitan disminuir las PDA en sus países, logrando mejorar a su vez las condiciones nutricionales de la población. En este aspecto, la meta 12.3 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, está precisamente orientada en reducir a la mitad las PDA globales al año 2030, logrando elevar la atención de las naciones de todo el mundo [3].

Desde el año 2011, la FAO ha generado diversas iniciativas a nivel global, a fin de abordar la problemática de las PDA. En el caso de la región Latinoamericana y Caribe, en el 2014 se plantea y evalúa una Estrategia Regional de Reducción de PDA. De esta manera se realiza en el año 2015 el “Primer Diálogo Regional sobre Pérdidas y Desperdicios de Alimentos”, donde se crea la Alianza Regional para la Prevención y Reducción de Pérdidas y Desperdicios de Alimentos, la cual se estructura a través de la formación de Comités Nacionales en los países latinoamericanos y caribeños [10].

Actualmente, Costa Rica y República Dominicana han formalizado los Comités Nacionales, mientras que naciones como Argentina, Brasil, Chile, Colombia, México, Perú, San Vicente y las Granadinas y Uruguay han iniciado procesos similares donde discuten iniciativas para la reducción de la PDA [10]. En el caso de Costa Rica, la Red Costarricense para la Disminución de Pérdidas y Desperdicio de Alimentos se crea en noviembre del 2014, con el objetivo de establecer estrategias para reducir las PDA en el país a través de la investigación y monitoreo, la comunicación y sensibilización, la implementación de políticas públicas y la coordinación de acciones conjuntas según el rol de cada miembro. Actualmente es coordinada por el Instituto Tecnológico de Costa Rica, posee asesoría técnica por parte de la FAO y se integra con miembros del sector público, privado, académico y de iniciativa ciudadana [13].

En el 2017, la Red crea la “Guía para medición de desperdicio de alimentos en cocinas institucionales o comerciales”, sector para el que a nivel mundial se ha estimado que el 20% de los alimentos manipulados se desperdicia [14]. El objetivo de la Guía es orientar a estos sectores en las acciones de medición de pérdidas en los eslabones de las cadenas alimenticias, de manera que planteen estrategias para la disminución de las PDA. La Guía establece los siguiente cuatro pasos para la reducción de PDA en restaurantes y comedores: contacto inicial y elaboración del plan de medición; medición de la PDA y análisis de datos; sensibilización y toma de acciones; y verificación de mejoras a través de una nueva medición [15]. De este modo, el estudio pretende evaluar la aplicación de los primeros dos pasos en un comedor institucional, a fin de disminuir la PDA en una universidad de Costa Rica.

Materiales y métodos

Definición del Caso de Estudio

El estudio se desarrolla en el Restaurante Institucional del Campus Tecnológico Central del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). El ITCR es una institución nacional autónoma de educación superior universitaria, la cual tiene como funciones principales la docencia, investigación y extensión de la tecnología y la ciencia para el desarrollo del país.

Desde el año 1977, el ITCR brinda el servicio de alimentación a los estudiantes y funcionarios a través del Restaurante Institucional. Este es un servicio mediante el cual la población de la Universidad puede tener acceso a alimentos nutritivos a un bajo costo. Actualmente,

el Restaurante brinda tres tiempos de comida y una merienda en horas de la tarde. Sus instalaciones tienen la capacidad para recibir a 750 personas y los días de mayor afluencia corresponden a martes, miércoles y jueves. Durante estos días se estima una producción de 800 platos en el desayuno, 1500 platos en el almuerzo y 300 platos durante la cena. Esta información fue brindada por la Nutricionista⁵ del Restaurante Institucional.

Según los datos del Departamento de Admisión y Registro y el Departamento de Recursos Humanos, la población de estudiantes y funcionarios para el año 2018 alcanzaba las 8670 personas. Sin embargo, no todas utilizan el servicio, dado que el Campus también posee sodas privadas, por lo que los estudiantes y funcionarios tienen diversas opciones para realizar sus horas de alimentación.

El estudio es desarrollado desde la Unidad Institucional de Gestión Ambiental y Seguridad Laboral (GASEL), desde la cual la Universidad diseña y crea programas que minimicen o prevengan el impacto ambiental y riesgo laboral que pueda ser generado en sus actividades.

Medición de la Pérdida y Desperdicio de Alimentos

La metodología utilizada se fundamenta en la “Guía para medición de desperdicio de alimentos en cocinas institucionales o comerciales” desarrollada por la Red Costarricense para la Disminución de Pérdida y Desperdicio de Alimentos [15]. En esta Guía se establece que los pasos para lograr la reducción de pérdidas en restaurantes y comedores consiste en realizar una evaluación de la situación actual, con la cual sea posible elaborar un plan de medición que permita ejecutar, de manera adecuada, la medición de la PDA y el análisis de datos.

A continuación, se detallan los primeros dos pasos implementados, según las especificaciones de la guía mencionada anteriormente:

Contacto inicial y elaboración del plan de medición

Durante el desarrollo del estudio resultó indispensable mantener una comunicación efectiva con los 29 colaboradores de la operación; cajeros, cocineros, auxiliares, el bodeguero, la nutricionista, el asistente de administración y el coordinador; de manera que estuvieran al tanto de las actividades que iban a ser ejecutadas en sus áreas de trabajo. Por ello, la primera etapa del estudio consistió en la realización de visitas con la finalidad de conocer a los actores involucrados y los procesos que son llevados a cabo en cada sector del Restaurante. Se diseñó un plan de medición adecuado de manera que se generaran las mínimas alteraciones en el proceso de preparación de alimentos. Como parte del plan de medición se definieron aspectos como: las áreas que iban a ser contempladas en el estudio, los días de medición, así como, los instrumentos requeridos.

Medición de la PDA y análisis de datos

La medición se realizó durante una semana lectiva (lunes a viernes) en el segundo semestre del año 2018, entre las 6:00 y las 19:00 horas. Se consideraron los alimentos producidos y residuos generados durante el desayuno, almuerzo y cena. Para ello, se utilizaron dos balanzas digitales; una para medir la masa de los residuos y otra para medir la masa de los alimentos. Cabe señalar que se excluyeron las bebidas y aquellos productos que, por razones de control calidad, deben de ser devueltos al proveedor. No se contempló, como un tiempo de comida separado, la merienda de la tarde, dado que la mayor parte de los usuarios consumen estos alimentos fuera del comedor.

5 (G. Montero Rodríguez [Comunicación personal], 29 de abril del 2020)

El estudio se enfocó en la cuantificación de PDA en las áreas de almacenamiento, preparación y residuos en platos. Para cada una de las áreas se utilizó la siguiente metodología, empleando para ello los formularios de medición recomendados por la Red Costarricense para la Disminución de Pérdida y Desperdicio de Alimentos.

- Almacenamiento: Se utilizó un recipiente vacío y se anotó su masa en el formulario. Seguidamente, se colocó fuera de las áreas de almacenamiento, de manera que cada vez que se detectara que algún producto debía descartarse fuera colocado dentro de este recipiente. Al final del día se anotó la masa total, valor al cual se le restó la masa inicial del recipiente vacío. El dato resultante representa la cantidad de alimentos que se pierden como consecuencia de la gestión de compras y almacenamiento del Restaurante.
- Preparación: En este caso se utilizaron dos recipientes vacíos, los cuales fueron pesados previamente y colocados en el área de preparación de alimentos para que los colaboradores dispusieran en estos los residuos que debían descartar. Uno de los recipientes fue destinado a productos comestibles generados (todos aquellos que, independientemente de su estado actual, pudieron ser utilizados en la preparación de alimentos) y el otro a no comestibles (cáscaras de huevo, frutas, hortalizas, pellejos de carne, grasa animal y vegetal, huesos y en general todos aquellos que no pueden utilizarse en la preparación de alimentos). Finalmente, se pesó cada recipiente y se anotó su masa en el formulario correspondiente. Al restar la masa inicial de los baldes vacíos se obtuvo la cantidad de producto que debió ser descartado en esta área.
- Residuos en platos: En las instalaciones del comedor, existe un sector donde los usuarios depositan los residuos orgánicos e inorgánicos generados de sus platos, por lo que al finalizar cada tiempo de comida se cuantificó la cantidad de residuos descartados. En este sector no se realizó una diferenciación entre comestibles y no comestibles, dado que el menú correspondiente a la semana del estudio no incluía alimentos con los cuales se generan residuos como huesos o cáscaras.

Adicionalmente, se midió la producción diaria, para ello se cuantificó la masa de las ollas y bandejas que son utilizadas para servir los alimentos y ese valor se le restó al peso de las ollas y bandejas que fueron servidas. Al finalizar el día, se midió la cantidad de alimentos que no se consumieron y fueron almacenados para ser aprovechados posteriormente. Cabe destacar que, debido el flujo de producción del Restaurante Institucional, se promedió la masa de una cantidad significativa de bandejas, de manera que cada vez que una salía de la cocina se multiplicara por el peso promedio de las demás.

Una vez finalizado el trabajo en campo se realizaron los siguientes cálculos matemáticos, con la finalidad de evaluar los resultados obtenidos:

- Masa de los residuos generados (R):

$$R = R_A + R_{PC} + R_{PNC} + R_P \quad (1)$$

- Pérdida total de alimentos (PDA):

$$PDA = R - R_{PNC} \quad (2)$$

- Porcentaje de PDA por área (almacenamiento, residuos de platos y preparación):

$$\% PDA_X = \frac{R_X}{PDA} \cdot 100 \quad (3)$$

- Porcentaje de PDA respecto a la producción:

$$\% PDA_P = \frac{PDA}{P} \cdot 100 \quad (4)$$

- Porcentaje de PDA respecto a la producción por área:

$$\% PDA_{\text{Área}} = \frac{R_X}{P} \cdot 100 \quad (5)$$

Donde:

R_A = Residuos generados en el área de almacenamiento (kg)

R_{PC} = Residuos comestibles generados en el área de almacenamiento (kg)

R_{PNC} = Residuos no comestibles generados en el área de preparación (kg)

R_P = Residuos generados en platos (kg)

R_X = Residuos generados por área (kg)

P = Producción (kg)

Estos datos se compararon con los resultados obtenidos en el año 2016, cuando diferentes expertos de la Escuela de Ingeniería en Agronegocios llevaron a cabo un diagnóstico de pérdida y desperdicio alimenticio en el mismo Restaurante Institucional [16].

Resultados

Diagnóstico de PDA en el Restaurante Institucional

A partir del estudio realizado se determinó una producción promedio de 1060,62 kg de alimentos por día, para un total semanal de 5303,10 kg. Siendo los lunes y viernes los días de menor afluencia de estudiantes y por ende de menor producción. Con respecto a la cantidad de residuos generados durante la semana, se cuantificaron 927,75 kg, de los cuales 506,96 kg se originaron como producto de las PDA lo que equivale a una generación promedio de 101,39 kg por día. Esta cantidad de PDA representa cerca del 55% del total de residuos generados en todas las áreas estudiadas, tal y como se aprecia en la figura 1.

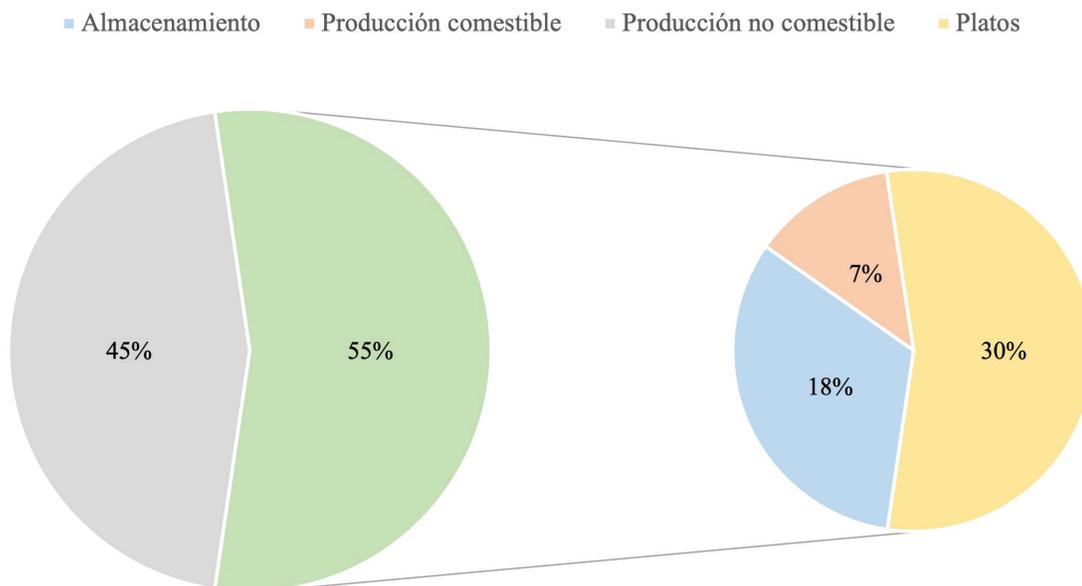


Figura 1. Porcentaje de residuos generados en las áreas estudiadas.

Relacionando los datos anteriores se tiene que en el año 2018 cerca del 9,56% de los alimentos producidos fueron descartados como producto de pérdidas y desperdicios. Este valor es significativamente menor al reportado por Brenes y colaboradores, donde estimaron un porcentaje de 13% de PDA respecto a la producción de alimento diario en el año 2016 [16].

Con respecto al porcentaje sobrante en platos, en el 2018 se determinó una pérdida del 5,23% de la producción total, cifra que tuvo una ligera disminución en relación con los datos obtenidos en el año 2016 donde se indicó un desecho en platos del 6%. No obstante, el valor se mantiene constante con respecto a los resultados reportados en primer y segundo semestre del año 2015, donde en promedio se perdió el 5% de la producción en los platos, lo que indica que esta área sigue representando los mayores retos en cuanto a la disminución en la PDA [16].

En relación con la distribución de las pérdidas, en el área de almacenamiento se reportó una generación promedio de 32,88 kg por día, lo que representa cerca del 32,43% del total de PDA. En esta área la mayor cantidad de alimentos fueron descartados el lunes, dado que este es el día en el que se extraen de las cámaras de frío aquellos comestibles que han sido almacenados desde la semana anterior, y que deben ser desechados dado que no son aptos para el consumo o poseen características poco atractivas para su venta. Con respecto al área de preparación, se cuantificó una generación promedio de 13,02 kg de residuos comestibles por día, lo que representa el 12,84% de las PDA totales, en esta área se identificó que muchos de los alimentos son desechados según la percepción del operador con respecto a su estado. Finalmente, el mayor porcentaje se identificó en los residuos generados en platos, donde se reportaron valores diarios promedio de 55,49 kg, contribuyendo hasta en un 54,73% a la PDA.

En cuanto al porcentaje de PDA generado en cada sector, se identificó una disminución de los residuos comestibles generados en el área de preparación con respecto al año 2016, tal y como se observa en la figura 2. Sin embargo, las PDA generadas en el área de almacenamiento sufrieron un aumento diario de aproximadamente 27,2 kg en las mediciones realizadas durante el año 2018. También se observa un ligero incremento en el porcentaje de PDA reportado en los alimentos descartados en platos.

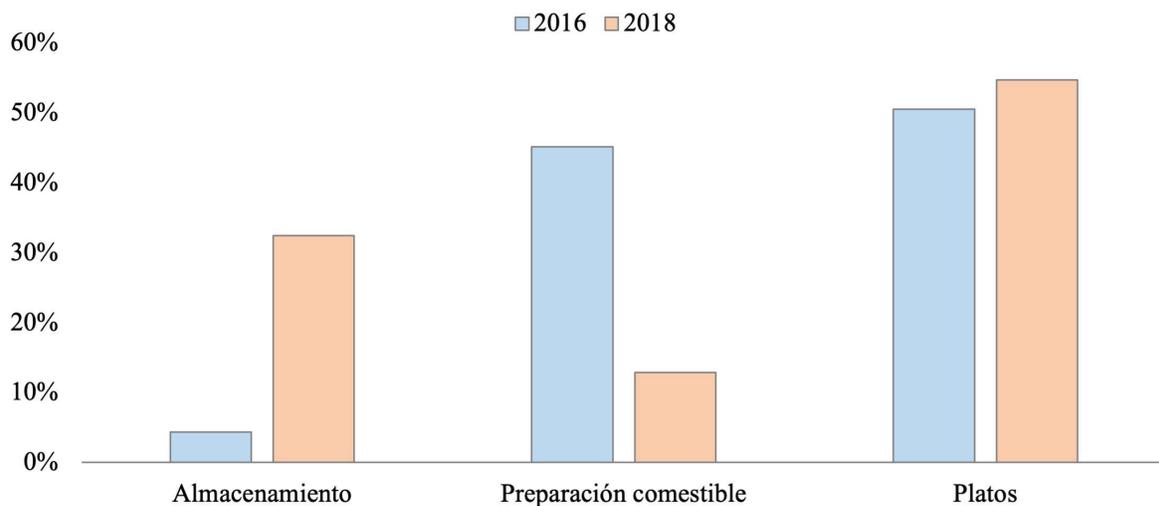


Figura 2. Porcentaje de PDA generados en las áreas estudiadas.

Con respecto a la generación de residuos no comestibles en el área de preparación de alimentos, se determinó una producción diaria promedio de 84,16 kg, lo que equivale a un total semanal de 420,79 kg. Estos valores representan cerca del 45% de los materiales biodegradables que son desechados en el Restaurante Institucional. De esta manera, se tiene que en el año 2018 la generación diaria de residuos orgánicos fue de 185,55 kg disminuyendo en un 24% con respecto a los resultados obtenidos por Brenes y colaboradores en el 2016 [16].

Disminución en las PDA en el Restaurante Institucional

Posterior a la medición de PDA, la Red Costarricense para la Disminución de Pérdida y Desperdicio de Alimentos recomienda diseñar planes de sensibilización y toma de acciones para disminuir las pérdidas [15]. En este aspecto, las mejoras realizadas antes del año 2018 consistieron en: la evaluación de la temperatura en los cuartos fríos y en el agua del baño maría utilizado en la barra de servicio; la compra de un horno con mayor eficiencia; y la implementación de mantenedores de bandejas. Con estas medidas resultó posible mejorar la preservación de los alimentos y la percepción sobre su calidad [16]. Adicionalmente se realizaron capacitaciones a los colaboradores del Restaurante en búsqueda de la disminución de las pérdidas durante el almacenamiento y preparación de los alimentos.

A partir del estudio realizado en el año 2018 la GASEL ha realizado capacitaciones a los estudiantes y ha trabajado en conjunto con la Escuela de Ingeniería en Agronegocios, en mejorar la planificación del menú, de manera que los alimentos resulten más atractivos para los consumidores y se disminuyan las pérdidas en bodegas. En relación con esta medida, resulta útil conocer la percepción de los usuarios en cuanto a la variedad y calidad de alimentos, por lo que es recomendado realizar periódicamente sondeos donde se logren identificar las razones por las cuales los consumidores dejan alimento en sus platos.

Otro aspecto importante ha consistido en la evaluación del tamaño de las porciones, dado que muchas de estas superan las recomendaciones realizadas por los expertos en nutrición del Restaurante. En este aspecto resulta conveniente utilizar medidas estandarizadas, como tazas y cucharas para servir los alimentos. Además, la Red Costarricense para la Disminución de Pérdida y Desperdicio de Alimentos recomienda valorizar la opción de brindar distintos tamaños de porción para satisfacer a los usuarios [15].

Dado que uno de los mayores retos en cuanto a la disminución en las PDA sigue siendo en el área de almacenamiento, resulta eficaz mejorar la planificación del inventario. Por lo que se sugiere revisar las fechas de vencimiento de los productos, de manera que lo primero en entrar sea lo primero en ser consumido (PEPS). Seguidamente, es recomendado agrupar los productos por categoría o proveedor para evitar la adquisición de productos que aún se encuentran disponibles en bodega. En cuanto a los alimentos que deben ser almacenados durante los fines de semana, es necesario evaluar su aprovechamiento para evitar que terminen siendo desperdiciados.

Adicionalmente, es necesario que los comedores y restaurantes establezcan lineamientos de calidad durante la preparación de alimentos donde se considere el aprovechamiento de vegetales no estéticos pero inocuos para su consumo. Estos pueden ser utilizados en la elaboración de comidas donde su forma o aspecto no es relevante, como jugos, sopas, picadillos, entre otros. Finalmente, es esencial que se realicen campañas de concientización donde sean involucrados tanto los colaboradores como los estudiantes y funcionarios de la Universidad.

Conclusiones

Reducir las PDA resulta fundamental para enfrentar las repercusiones ambientales, sociales y económicas que esta genera en el mundo. De este modo, los comedores y restaurantes funcionan como un mecanismo clave para la disminución de la PDA en las etapas de almacenamiento, preparación y consumo. Siendo la etapa de medición de las PDA una de las más importantes para identificar las causas del desperdicio y sus posibles soluciones.

En el caso del Restaurante Institucional del ITCR se identificó una generación de 927,75 kg de residuos orgánicos durante una semana lectiva, de los cuales, el 55% fue identificado como el producto de las pérdidas y desperdicios de alimentos ocasionadas en las áreas de almacenamiento, preparación y residuos en plato. En relación con la producción de alimentos, las estimaciones indican que cerca del 9,56% se descarta, siendo el área de residuos en plato el que posee una mayor contribución.

Realizando una comparación con estudios anteriores, se denotó una disminución en la cantidad de PDA durante el año 2018. Sin embargo, se identificó que las medidas implementadas hasta ese año no lograron mejorar significativamente las PDA generadas en el área de almacenamiento y en el plato. Por lo que resulta esencial realizar una campaña de sensibilización entre colaboradores y usuarios, así como poner en práctica las diversas recomendaciones en cuanto al manejo del inventario, el menú y el tamaño de las porciones.

Referencias

- [1] FAO, IFAD, UNICEF, WFP, and WHO, *The State of Food Security and Nutrition in the World 2019. Safeguarding against economic slowdowns and downturns*. Rome: FAO, 2019.
- [2] K. Coetzee, "Hunger : the problem is getting worse," *Farmer's Wkly.*, vol. 2019, no. 19031, p. 24, 2019.
- [3] M. Vittuari, F. De Menna, L. García-Herrero, M. Pagani, L. Brenes-Peralta, and S. Andrea, "Food systems sustainability: The complex challenge of food loss and waste," *Sustain. Food Supply Chain. Planning, Des. Control through Interdiscip. Methodol.*, pp. 249–260, 2019.
- [4] M. G. Abiad and L. I. Meho, "Food loss and food waste research in the Arab world: a systematic review," *Food Secur.*, vol. 10, no. 2, pp. 311–322, 2018.
- [5] H. P. S. Makkar, "Opinion paper: Food loss and waste to animal feed," *Animal*, vol. 11, no. 7, pp. 1093–1095, 2017.
- [6] M. Blakeney, *Food Loss and Food Waste: Causes and Solutions*. Edward Elgar Publishing, 2019.

- [7] FAO, *El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos*. Roma, 2019.
- [8] M. Schuster and M. Torero, "Reducing Food Loss and Waste," in *Toward a sustainable food system*, 2016.
- [9] FAO, *Iniciativa mundial sobre la reducción de la pérdida y el desperdicio de alimentos*. 2015.
- [10] Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, *Perdidas y desperdicios de alimentos en Latinoamérica y el Caribe*. FAO, 2016.
- [11] United Nations, *The sustainable development goals report 2019*. United States of America: United Nations publication issued by the Department of Economic and Social Affairs, 2019.
- [12] D. Banik, "Achieving Food Security in a Sustainable Development Era," *Food Ethics*, vol. 4, no. 2, pp. 117–121, 2019.
- [13] Tecnológico de Costa Rica, "Tecnológico de Costa Rica," *Red Costarricense para la Disminución de Pérdidas y Desperdicios de Alimentos*, 2020. [Online]. Available: <https://www.tec.ac.cr/red-costarricense-disminucion-perdidas-desperdicios-alimentos>. [Accessed: 06-May-2020].
- [14] Comité de Seguridad Alimentaria Mundial, "Las pérdidas y el desperdicio de alimentos en el contexto de sistemas alimentarios sostenibles. Un informe del Grupo de Alto Nivel de Expertos en Seguridad Alimentaria y Nutrición, Junio 2014," *HLPE Inf. spa no. 8*, 2014.
- [15] Red Costarricense para disminuir pérdida y desperdicio de alimentos, *Guía de medición del desperdicio de alimentos en cocinas institucionales y comerciales: guías de medición, prevención y reducción de pérdida y desperdicio de alimentos*, 1st ed. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2017.
- [16] L. Brenes Peralta, M. Jiménez Morales, M. Gamboa Murillo, and A. Ureña Jiménez, "Diagnóstico de Pérdidas y Desperdicio Alimenticio en comedor institucional: Tecnológico de Costa Rica," 2016.

Variabilidade espacial da palha de soja distribuída na colheita e sua relação com o estande final de aveia preta

Spatial variability of soybean straw distributed at harvest and its relationship with the final stand of black oats

Júlio Tagliari-Balestrin¹, David Peres-da-Rosa², Bruno Cazaroto³

Fecha de recepción: 31 de agosto de 2020

Fecha de aprobación: 18 de diciembre de 2020

Tagliari-Balestrin, J; Peres-da-Rosa, D; Cazaroto, B. Variabilidade espacial da palha de soja distribuída na colheita e sua relação com o estande final de aveia preta. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-4 Octubre-Diciembre 2021. Pág 28-37.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i4.5320>

- 1 Acadêmico do curso de Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Sertão, Brasil.
Email: juliotbalestrin@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0003-2077-5324>
- 2 Doutor em Engenharia Agrícola, professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Sertão, Brasil.
Email: david.darosa@sertao.ifrs.edu.br
 <https://orcid.org/0000-0001-8857-038X>
- 3 Engenheiro Agrônomo, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Sertão, Brasil.
Email: brunocazaroto07@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0003-2882-8136>



Palavras chave

Plantio direto; colhedora; resíduo vegetal; variabilidade espacial.

Resumo

Objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito da variabilidade espacial da distribuição da palha na colheita da soja na emergência de aveia preta em sistema plantio direto. O experimento foi conduzido em uma área agrícola de 2,6 ha, sendo avaliados a quantidade de palha (kg ha^{-1}) de soja distribuída pela colhedora, e o estande final de aveia preta (plantas m^{-2}). Foi empregado um gride amostral de 20 pontos, sendo 10 pontos no centro da colhedora e os outros 10 nas extremidades. Nos pontos no centro da colhedora, a quantidade de palha variou de 6.424 a 12.000 kg ha^{-1} ($= 8.788 \pm 1.669 \text{ kg ha}^{-1}$), já o estande final de plantas de aveia preta variou de 165 a 212 plantas m^{-2} ($= 191 \pm 14 \text{ plantas m}^{-2}$). Nos pontos relativos às extremidades, a quantidade de palha reduziu, variando de 1.697 a 3.394 kg ha^{-1} ($= 2.448 \pm 588 \text{ kg ha}^{-1}$), e estande final de plantas de aveia preta aumentou para 267 a 306 plantas m^{-2} ($= 285 \pm 13 \text{ plantas m}^{-2}$), ou seja, redução de 72,14% na quantidade de palha e um aumento de 49,21% no estande. As variáveis analisadas apresentaram correlação forte, negativa e significativa ($r = -0,887$; $P < 0,05$), desde modo, a colhedora empregada no estudo distribui a palha desuniforme, sendo que esta ação afeta o estande final da aveia preta.

Keywords

No-tillage; combine; plant residue; spatial variability.

Abstract

The objective of this work was to evaluate the effect of spatial variability straw distribution on soybean harvest in the emergence of black oats in no-tillage system. The experiment was carried out in an agricultural area of 2.6 ha, being evaluated the amount of soybean straw (kg ha^{-1}) distributed by the harvester, and the final stand of black oats (plants m^{-2}). A 20-point sampling grid was used, 10 points in the center of the harvester and the other 10 at the ends. At the points in the center of the harvester, the amount of straw varied from 6,424 to 12,000 kg ha^{-1} ($= 8,788 \pm 1,669 \text{ kg ha}^{-1}$), while the final stand of black oat plants ranged from 165 to 212 plants m^{-2} ($= 191 \pm 14 \text{ plants m}^{-2}$). In the points related to the ends, the amount of straw reduce to 1,697 to 3,394 kg ha^{-1} ($= 2,448 \pm 588 \text{ kg ha}^{-1}$) and the final stand of black oat increase to 267 to 306 plants m^{-2} ($= 285 \pm 13 \text{ plants m}^{-2}$), that is, a reduction of 72.14% in the amount of straw and an increase of 49.21% in the stand. The variables analyzed showed a strong, negative and significant correlation ($r = -0.887$; $P < 0.05$), therefore, the combine used in this study distributes the uneven straw, and this action affects the final stand of black oats.

Introdução

O Sistema de Plantio Direto (SPD) propõe uso contínuo de cobertura do solo na lavoura, através da deposição de restos vegetais de culturas advindas do processo de rotação cultural [1]. A palha na superfície do solo oferece diversos benefícios, como a dissipação da energia do impacto da gota de chuva, aumento da infiltração de água, manutenção da umidade, melhoria da macro e micro fauna, redução da amplitude térmica, menores perdas por erosão e diminuição da incidência de plantas daninhas [2], bem como, amortecimento da pressão imputada no tráfego.

Anualmente o aporte de palha para o sistema de plantio direto deve ser de 10 a 12 t ha⁻¹ [3], nesse sentido, uma das etapas fundamentais do manejo da palha ocorre no momento da colheita, uma vez que as máquinas empregadas na operação são responsáveis por fazer a distribuição dos restos culturais ao solo. É de fundamental importância que esses restos culturais sejam distribuídos de forma homogênea ao solo, buscando evitar locais de acúmulo de palha, haja visto que ocasionarão problemas de embuchamento na semeadora no momento da semeadura da próxima cultura, além de irregularidades na profundidade das sementes. Já na condição contrária, ausência de palha, o problema está na maior propensão ao desenvolvimento de plantas daninhas [4]. Diferentes concentrações de palha também podem refletir no aparecimento de faixas de fertilidade diferentes, bem como, podem gerar redução do contato solo/semente, resultando em faixas com menor emergência de plântulas [5]. Ademais, a maior concentração de palha gerada pela irregularidade de distribuição dos restos culturais realizada pela colhedora, pode resultar em menores percentuais de emergência da cultura subsequente [6].

A cultura de aveia preta (*Avena strigosa*) é muito utilizada no Sul do Brasil durante o inverno, para fins de cobertura de solo, por produzir alta quantidade de palha, ao redor de 4 t ha⁻¹ [7]. Sua utilização traz inúmeros benefícios para as culturas de verão, quando comparado a prática de pousio durante o período de inverno. Entretanto, a efetividade desta alternativa de cobertura de solo se dá, em grande parte, em virtude do estande de plantas e esse, por sua vez, está aliado a emergência uniforme das plântulas.

Neste sentido, o presente estudo objetivou avaliar o efeito espacial da irregularidade de distribuição de restos culturais da colheita de soja no estande final de aveia preta.

Material e métodos

O experimento foi conduzido via técnicas de agricultura de precisão, geoestatística, realizado em uma área agrícola de 2,6 hectares localizada no município de Sertão/RS no ano agrícola 2018/2019. Situado a 28°0'34"S e 52°25'4"O e altitude de 620 metros, o local possui clima subtropical úmido (cfa), com chuvas bem distribuídas e temperatura média anual de 18,3°C [8], o solo é classificado como Nitossolo Vermelho Distrófico [9]. A área é manejada em SPD há mais de 30 anos, na qual são cultivadas grandes culturas, como soja, trigo e aveia preta.

Para implantação do experimento, um gride de 20 pontos foi determinado na área, sendo 10 pontos relativos ao centro da colhedora e os outros 10 à extremidade (figura 1). Os parâmetros avaliados foram a quantidade de palha e o estande final de plantas emergidas de aveia preta. Para o primeiro parâmetro, foi extraída a massa de palha presente em 1 m², esta foi pesada e estimada seu valor por hectare, parâmetro mensurado no dia que foi realizada a semeadura de aveia preta. Após a emergência total da aveia preta, foi determinada o estande de plantas por m² nos mesmos pontos amostrais anteriores.

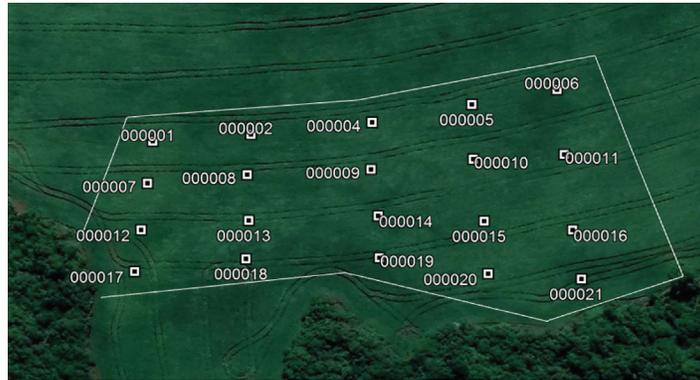


Figura 1. Gride da área experimental no município de Sertão, RS, Brasil. Pontos 1-6 e 12-16: centro da colhedora. Pontos 7-11 e 17-21: extremidade da colhedora. Fonte: Google Earth.

A colheita da soja foi realizada com uma colhedora New Holland® 2017 modelo TC 5070 equipada com plataforma de 20 pés. Para delimitação da área, e georreferenciamento dos pontos, foi empregado um GNSS portátil Garmin® Etrex 20, sendo os dados tabelados em planilha eletrônica.

Os mapas de isolinhas foram construídos por meio de interpolação por krigagem ordinária, levando-se em conta os parâmetros do semivariograma determinados pela análise geoestatística, utilizando o software CR Campeiro 7®.

Afim de verificar diferenças estatísticas dos parâmetros, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), teste de normalidade e comparação de médias pelo teste de Tukey à 5% de significância, utilizando o software SISVAR®. A estatística exploratória dos dados (estatística descritiva) foi realizada com auxílio do software PAST®, sendo obtidas medidas de posição (mínimo, média e máximo) e de dispersão (desvio padrão, coeficientes de variação (CV%), assimetria e de curtose). Com base nos valores de assimetria (C_s) obtidos, visando caracterizar quanto e como a distribuição de frequências se afasta da simetria, foram classificados como: $C_s = 0$ distribuição simétrica, $C_s > 0$ distribuição assimétrica à direita e $C_s < 0$ distribuição assimétrica à esquerda. Os valores de curtose (C_k), que expressam a dispersão (achatamento) da distribuição em relação a um padrão, geralmente utilizada a curva normal, foram classificados em: $C_k = 0$ distribuição mesocúrtica, $C_k < 0$ distribuição platicúrtica e $C_k > 0$ distribuição leptocúrtica.

Com base nos valores de CV(%) dos dados, a dispersão dos dados foi classificada em: baixa para CV < 15%; moderada, para CV de 15 a 35%; e alta, para CV > 35% [10].

Foi realizado teste de correlação linear de Pearson (r) para avaliar o grau de correlação entre as variáveis analisadas. Este coeficiente expressa numericamente, tanto a força quanto o sentido da correlação. Seu valor varia entre 1 e -1 ou seja: $-1 \leq R \leq 1$. Se $R = 1$, as duas variáveis relacionadas têm correlação perfeitamente positivas; se $R = -1$, as duas variáveis relacionadas têm correlação perfeitamente negativa; se $R = 0$, não existe correlação entre as duas variáveis correlacionadas. Quanto mais próximo de 1 (+ ou -), maior a força de correlação [11].

A análise geoestatística foi realizada por meio do ajuste de semivariogramas experimentais, através do software CR Campeiro 7®, determinando efeito pepita (C_0), contribuição (C_1), patamar ($C_0 + C_1$), alcance (a) e índice de dependência espacial (IDE). O IDE foi calculado por meio das equações: $IDE = x[C_1 / (C_0 + C_1)] * [a / (0,5MD)] * 100$, em que x são constantes (0,375, 0,317 e 0,504 para os modelos esférico, exponencial e gaussiano, respectivamente) e MD é a máxima distância entre pontos. Se a razão $a/0,5MD$ for maior que 1, utiliza-se 1. Com base no IDE, classificou-se a dependência espacial para o modelo esférico: $\leq 7\%$ (fraco), entre

7% e 15% (moderado) e > 15% (forte); para o modelo exponencial: ≤ 6% (fraco), entre 6% e 13% (moderado) e > 13% (forte); e para o modelo gaussiano: ≤ 9% (fraco), entre 9% e 20% (moderado) e > 20% (forte) [12].

Resultados e discussão

A quantidade de palha de soja foi maior na área correspondente ao centro da colhedora, diferindo significativamente em relação a extremidade (tabela 1). No estande final de plantas de aveia preta ocorreu o contrário, foi maior na área das extremidades, diferindo significativamente em relação ao centro, isto demonstra uma relação, em que conforme aumenta a quantidade de palha ocorre a redução do estande final de aveia preta.

Tabela 1. Quantidade de palha de soja (kg ha⁻¹) e estande final de plantas de aveia preta (plantas m⁻²) em função da posição da colhedora.

	Posição da colhedora	Amplitude	Média
Palha de soja (kg ha ⁻¹)	Centro	6424,24-12000,00	8787,88 a*
	Extremidade	1696,97-3393,94	2448,48 b
Estande final de aveia preta (plantas m ⁻²)	Centro	164,71-211,76	190,59 b
	Extremidade	266,67-305,88	285,49 a

*Médias seguidas de letras distintas minúsculas nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A quantidade de palha distribuída pela colhedora foi espalhada irregularmente, de maneira que se concentra no centro e na medida que se direciona para as extremidades vai reduzindo. Isso demonstra uma desuniformidade na distribuição da palha dentro da largura da plataforma de corte, fato também é relatado por [3] [13] [14].

A quantidade média de palha de soja na área (tabela 2) foi de 5618,18 kg ha⁻¹, variando de 1696,97 a 12000,00 kg ha⁻¹, já estande médio foi de 238,04 plantas m⁻², variando de 164,71 a 305,88 plantas m⁻², essa variação é elevada, fato que confirma que há variação da distribuição pela máquina (tabela 1), sendo visualizado no coeficiente de variação deste, que está classificado como alta dispersão dos dados (heterocedasticidade), já no estande final de plantas de aveia preta há moderada dispersão [10].

Ambos os conjunto de dados não apresentaram distribuição normal (tabela 2), condição evidenciada nos coeficientes de assimetria e de curtose, sendo que valores distantes de zero podem ser indicativos da não normalidade [16]. A variável quantidade de palha demonstrou coeficiente de assimetria deslocado à direita (Cs>0) enquanto a variável estande final de plantas de aveia preta deslocado a esquerda (Cs<0) [10]. O coeficiente de curtose para ambas as variáveis demonstrou distribuição platicúrtica (Ck<0) [10], o que demonstra que as curvas de distribuição dos dados da quantidade de palha e do estande final de plantas de aveia preta são mais achatadas do que a distribuição normal, apresentando variação destes atributos ao longo da área.

Tabela 2. Estatística descritiva da quantidade de palha de soja (kg ha⁻¹) e do estande final de aveia preta (plantas m⁻²).

Parâmetros	Quantidade de palha de soja	Estande final de aveia preta
Mínimo	1696,97	164,71
Média	5618,18	238,04
Máximo	12000,00	305,88
Desvio padrão	3472,61	50,46
Coef. De variação (%)	61,81	21,20
Cs	0,33	-0,02
Ck	-1,47	-1,88
W	0,87*	0,85*

Cs = Coeficiente de assimetria; Ck = Coeficiente de curtose. W = Teste de Shapiro-Wilk para distribuição normal, onde (*) significativo em níveis de $p < 0,05$. Quando for significativo indica que a hipótese para distribuição normal é rejeitada.

O efeito pepita demonstra a variabilidade não explicada pelo modelo geoestatístico, levando em consideração a distância de amostragem utilizada, assim a análise do efeito pepita é de grande importância, pois, quanto menor for o seu valor, maior será a continuidade do fenômeno e menor será a variância da estimativa [17]. Os valores encontrados nesse estudo (tabela 3) indicam que o erro foi bastante elevado no estande de plantas, demonstrando a alta variabilidade dos dados dentro da variável.

Tabela 3. Análise geoestatística da quantidade de palha de soja e do estande final de plantas de aveia preta.

Parâmetros Geoestatísticos	Quantidade de palha de soja	Estande final de plantas de aveia preta
C_0	6,66	2272,55
$(C_0 + C_1)$	12,06	2551,16
C_1	5,4	278,61
a	100	100
Modelo	Gaussiano	Esférico
r^2	0,76	0,98
IDE	22,57	4,10
Classe	Forte	Fraco

C_0 = Efeito pepita; $(C_0 + C_1)$ = Patamar; C_1 = Contribuição; A = Alcance (m); IDE = Índice de dependência espacial.

Quanto menor for a proporção do efeito pepita para o patamar do variograma, maior será a continuidade do fenômeno e a variância da estimativa, e maior será a confiança que se pode ter na estimativa [18], sendo calculada pelo índice de dependência espacial. A quantidade de palha apresentou dependência espacial classificada como forte, ou seja, tem variação na área, confirmando a discussão demonstrada anteriormente (tabela 1) na comparação entre as posições de coleta. Esse fato comprova que são necessárias alterações construtivas nas colhedoras agrícolas, haja visto que atualmente o que mais é focado é no aumento da capacidade de campo operacional. Avaliando a distribuição da palha de soja em diferentes colhedoras, [13] constataram que a distribuição transversal da palha foi desuniforme, independente do mecanismo de trilha e da largura da plataforma, sendo verificado acúmulo de palha no centro da linha de deslocamento e pouco nas extremidades. Na colheita de trigo, a

distribuição também foi irregular, conforme relatado nos estudos de [20] [21], sendo constatado também, maior acúmulo de palha no centro das máquinas. Isto demonstra que a irregularidade de distribuição de palha das colhedoras é um problema recorrente na agricultura.

No estande final da aveia preta, o IDE foi classificado como dependência fraca, fato que pode estar relacionado à rusticidade desta planta, pois consegue emergir mesmo em condições não tão favoráveis ao desenvolvimento pleno, haja vista, que é possível ver uma relação deste parâmetro com a quantidade de palha (tabela 1), de forma inversa, conforme um aumenta, o outro reduz.

Para a quantidade de palha o modelo teórico que possibilitou os melhores ajustes dos semivariogramas foi o gaussiano, já para o estande final de aveia preta foi o esférico. O modelo gaussiano apresenta um comportamento parabólico próximo da origem e representa fenômenos extremamente contínuos. Já o modelo esférico tem um comportamento linear próximo da origem que representa fenômenos contínuos, mas não diferenciáveis [15]. Tais modelos expressam bem a variação dos dados, em que no primeiro parâmetro observou-se IDE forte, bem como, a sua variação nos dados de CV.

O alcance é um critério importante para estudos de geoestatística, significa a distância máxima que a variável em estudo está correlacionada espacialmente, ou seja, maiores valores de alcance contribuem para uma maior confiança nas estimativas feitas [19]. Para os valores de alcance não houve diferença entre as variáveis analisadas, desta forma, a equidistância da grade amostral foi suficiente para descrever as propriedades avaliadas com exatidão, pois os valores de alcance encontrados para as diferentes propriedades são superiores a da grade.

As variáveis analisadas apresentaram correlação forte, negativa e significativa ($r = -0,887$; $p < 0,05$) [11], logo, assim como já foi sinalizado nos dados anteriores, quanto maior a quantidade de palha de soja, menor é o estande de aveia preta (figura 2).

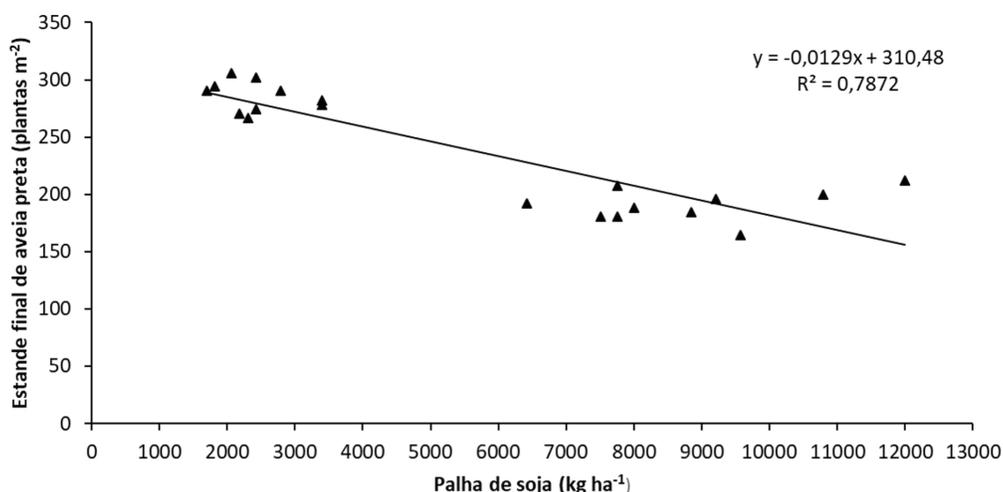


Figura 2. Correlação entre o estande final da aveia preta com a quantidade de palha de soja.

Os mapas de isolinhas da quantidade de palha de soja (figura 3A) e estande final de plantas de aveia preta (figura 3B) demonstram a existência de variabilidade espacial ao longo da área. Os locais em que há maior presença de palha coincidem com aqueles em que há menor estande final de plantas de aveia preta, corroborando para a existência de correlação negativa entre as variáveis (figura 2).

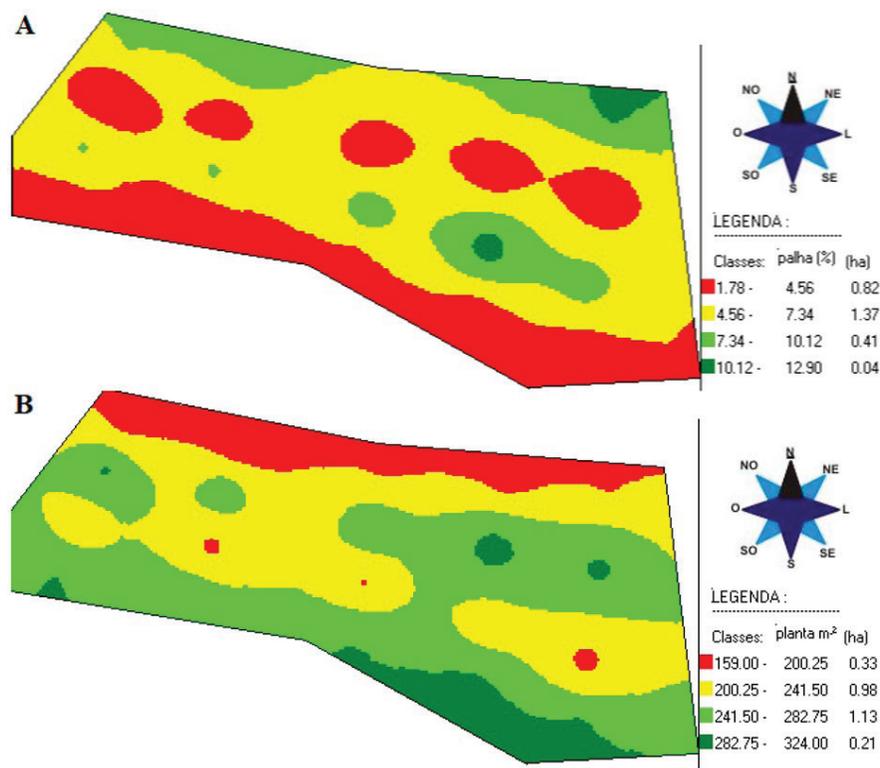


Figura 3. Mapas interpolados por “krigagem” da variabilidade espacial da quantidade de palha de soja (kg ha^{-1}) (A) e do estande final de plantas de aveia preta (plantas m^{-2}) (B).

A distribuição de palha ficou 51,70% da área concentrada entre 4560 a 7340 kg ha^{-1} , zona mais central da área, local em que a emergência foi 36,98% concentrada no estande final de plantas médio, variando de 200,50 a 241,50 plantas m^{-2} . O maior estande final de aveia preta, classe de 282,75 a 324,00 plantas m^{-2} , ocorreu em apenas 7,92% da área, zona essa que teve a menor classe de quantidade de palha, 1780 a 4650 kg ha^{-1} , demonstrando ação da correlação negativa (Figura 2). A maior parte do resíduo acumulado no centro da linha de deslocamento da colhedora corresponde ao palhiço (material oriundo das peneiras) [21], desta forma, [20] destacam a importância de um sistema de distribuição de palhiço, visando a obtenção de uma distribuição de palha mais homogênea, visto que, atualmente, a maioria das colhedoras possuem apenas aletas difusoras para distribuir palha no picador, sem a presença de um mecanismo distribuidor de palha nas peneiras. Na colhedora avaliada, embora possuindo no bandeirão divisões para distribuir melhor o volume de palha sobre o sistema de peneira, a oscilação do terreno acaba direcionando a palha de maneira desuniforme, resultando nesse problema.

Nos locais com acúmulo de palha, forma-se uma barreira física que pode atrasar e/ou impedir o surgimento de plântulas, comprometendo o estande de plantas. Conforme [22], a condição heterotrófica das plântulas (sobrevivência às custas das reservas da semente) permite a elas sobreviver por um curto período de tempo na ausência de luz, no entanto, a com o passar do tempo, a medida em que se tornam autotróficas, é necessário haver a presença de luz para a manutenção das atividades fisiológicas. Portanto, a aveia preta germina, mas não consegue se desenvolver, devido a barreira física gerada pelo excesso de palha de soja que impede a entrada de luz até as plantas, levando-as à morte. Resultados similares foram encontrados por [6], que ao estudarem o efeito da palha de soja na emergência de trigo concluíram que o

aumento da palha na superfície do solo reduz a emergência das plântulas. A emergência de soja e milho também são afetadas pelo excesso de palha, fato relacionado a maior dificuldade de corte dos mecanismos das semeadoras [23].

A quantidade de palha não é importante só na emergência da aveia preta, a palha possui efeito no manejo de fertilidade do solo, uma vez que a decomposição libera nutrientes ao meio [2]. Este processo, dentro de um sistema de agricultura de precisão, que preconiza pela homogeneidade dos atributos químicos do solo, é fundamental.

A desuniformidade de palha na área (figura 3A) irá repercutir em problemas com plantas daninhas, conforme relatam [24], que a palha assume grande importância no manejo destas, uma vez que ela tem a capacidade de influenciar na dormência, germinação e mortalidade de determinadas espécies daninhas, provocando modificações nas comunidades infestantes. Desta forma, nos locais em que há menor presença de palha de soja, possivelmente haverá maior incidência de plantas daninhas competindo com a cultura da aveia preta.

Embora a manutenção da palha das culturas sobre a superfície do solo seja uma importante prática conservacionista de solo, quando mal manejada pode afetar a emergência das sementes de plantas cultivadas. Neste sentido, a palha precisa garantir a máxima proteção do solo e ao mesmo tempo causar o menor efeito possível sobre a emergência das culturas. A maneira mais prática de gerenciar os resíduos da colheita é com a colhedora. A palha, portanto, deve ser espalhada uniformemente por toda a largura da plataforma de corte.

Conclusões

A variabilidade da distribuição da palha na colheita da soja influencia no estande final da aveia preta, havendo forte correlação entre estes parâmetros e variabilidade espacial de ambos.

Referencias

- [1] I. Bertol, O. Ciprandi, C. Kurtz and A. S. Baptista, "Persistência dos resíduos culturais de aveia e milho sobre a superfície do solo em semeadura direta", *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 22, pp. 705-712, 1998.
- [2] C. A. Chioderoli, R. P. Silva, R. H. F. Noronha, M. T. Cassia and E. P. Santos, "Perdas de grãos e distribuição de palha na colheita mecanizada de soja", *Bragantia*, vol. 71, pp. 112-121, 2012.
- [3] C. BAYER, L. Martin-Neto, J. Mielniczuk, A. Pavinato and J. Dieckow, "Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till", *Soil & Tillage Research*, vol. 86, pp. 237-245, 2006.
- [4] N. V. Costa, A. C. P. Rodrigues-Costa, E. M. P. Coelho, S. D. Ferreira, J. A. Barbosa, "Métodos de controle de plantas daninhas em sistemas orgânicos: breve revisão", *Revista Brasileira de Herbicidas*, vol. 17, pp. 25-44, 2018.
- [5] N. M. Correia and J. C. Durigan, "Culturas de cobertura e sua influência na fertilidade do solo sob sistema de plantio direto (SPD)", *Bioscience Journal*, vol. 24, pp. 20-31, 2008.
- [6] J. Abati, C. R. Brzezinski, C. Zucareli, F. Werner and F. A. Henning, "Seed vigor and amount of soybean straw on seedling emergence and productive performance of wheat", *Semina: Ciências Agrárias*, vol. 38, pp. 2179-2186, 2017.
- [7] S. O. Chini, "*Variabilidade em germoplasma de aveia-preta quanto a caracteres relacionados à aptidão forrageira ou cobertura do solo*", Tese (Doutorado), Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo/RS, 2017.
- [8] A. M. Ramos, L. A. R. Santos and L. T. G. Fortes, "Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990" INMET, Brasília/DF, 2009.
- [9] H. G. dos Santos, P. K. T. Jacomine, L. H. C. dos Anjos, V. A. de Oliveira, J. F. Lumbreras, M. R. Coelho, J. A. de Almeida, T. J. F. Cunha and J. B. de Oliveira, "Sistema brasileiro de classificação de solos", 3. ed. rev. ampl. Brasília: EMBRAPA, 353 p., 2013.
- [10] F. Pimentel-Gomes and C. H. Garcia, "Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais", Piracicaba FEALQ : 309, 2002.

- [11] D. B. Figueiredo Filho and J. A. Silva Júnior, "Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson (r)", *Revista Política Hoje*, vol. 18, pp. 115-46, 2009.
- [12] E. J. Seidel and M. S. Oliveira, "A classification for a geostatistical index of spatial dependence", *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 40, pp. 1-10, 2016.
- [13] V. L. Kunz, A. G. Filho, M. A. Primo, F. Gurgacz and E. Fey, "Distribuição de palha por colhedoras autopropelidas na colheita da soja", *Engenharia Agrícola*, vol. 28, pp. 125-135, 2008.
- [14] L. O. B. Schuch, J. L. Nedel, M. S. Maia, F. N. Assis, F. N. de, "Vigor de sementes e análise de crescimento de aveia-preta", *Scientia Agrícola*, vol. 57, pp. 305-312, 2000.
- [15] E. C. G. Camargo, "Geoestatística: Fundamentos e aplicações" In: G. Câmara and J. S. Medeiros (eds) *Geoprocessamento para projetos ambientais*. INPE, São José dos Campos: INPE, 1998.
- [16] G. Milone, "*Estatística Geral e Aplicada*", Pioneira Thomson Learning, São Paulo/SP, 2004.
- [17] E. H. Isaaks and R. M. Srivastava, "*An introduction to applied geostatistics*", Oxford University, New York, 561 p., 1989.
- [18] E. C. Guimarães, "*Geoestatística básica e aplicada*", Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 77 p., 2004.
- [19] J. E. Corá, A. V. Araújo, G. T. Pereira and J. M. G. Beraldo, "Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar" *Revista Brasileira de Ciência do solo*, vol. 28, pp. 1013-1021, 2004.
- [20] A. F. Orlando, E. Fey, T. Pedron, E. Lima and L. Primo, "Uniformidade de distribuição dos resíduos da cultura do trigo em colhedoras autopropelidas", In: *Jornada Científica da Unioeste*, Marechal Cândido Rondon/PR, 2005.
- [21] R. J. Veseth, C. F. Engle, J. A. Vomocil and R. E. Mcdole, "Uniform combine residue distribution for successful no-till and minimum tillage systems", *Pacific Northwest Extension Publication*, vol. 7, pp. 1-7, 1986.
- [22] L. Taiz, E. Zeiger, I. M. Moller and A. Murphy, "Fisiologia e desenvolvimento vegetal", 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 888 p., 2017.
- [23] E. C. Mantovani and A. May, "Mecanização" In: I. A. Pereira Filho and J. A. S. Rodrigues (eds) *Sorgo: o produtor pergunta, a Embrapa responde*. Embrapa, Brasília, pp 41-50, 2015.
- [24] M. S. Fileti, E. B. Pinotti, P. D. Epiphanyo, B. M. C. Barros, T. F. Silva, M. Giroto, D. P. Silva, C. G. Bosquê and F. C. C. Lima "Utilização de palhada no controle de planta daninha" *Revista científica eletrônica de agronomia*, ano X, n. 20.

Optimización económica para el cultivo de papa, zanahoria y cebolla en Cartago, Costa Rica¹

Economic optimization for the cultivation of potatoes, carrots and onions in Cartago, Costa Rica

David Barboza-Navarro², Johanna Solórzano-Thompson³,
Javier Paniagua-Molina⁴

Fecha de recepción: 27 de agosto de 2020

Fecha de aprobación: 9 de diciembre de 2020

Barboza-Navarro, D; Solórzano-Thompson, J; Paniagua-Molina, J. Optimización económica para el cultivo de papa, zanahoria y cebolla en Cartago, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-4 Octubre-Diciembre 2021. Pág 38-49.

<https://doi.org/10.18845/tm.v34i4.5184>

- 1 Este trabajo formó parte del proyecto de investigación 822-B7-518 del Centro de Investigaciones en Economía Agrícola y Desarrollo Agroempresarial (CIEDA).
- 2 Bach. Economía Agrícola y Agronegocios, Centro de Investigaciones en Economía Agrícola y Desarrollo Agroempresarial (CIEDA), Universidad de Costa Rica (UCR), Costa Rica. Correo electrónico: josdavbn@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-5444-3814>
- 3 ME. Economía Empresarial, CIEDA, UCR, Costa Rica. Correo electrónico: johanna.solorzano@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-0276-6849>
- 4 M.Sc. Administración y Dirección de Empresas, CIEDA, UCR, Costa Rica. Correo electrónico: javier.paniagua@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-2815-5437>



Palabras clave

Programación lineal; restricción económica; función de rentabilidad; rotación de cultivos.

Resumen

La producción de papa, cebolla y zanahoria es de gran importancia económica en la zona norte de la provincia de Cartago. Por esta razón es necesario procurar la optimización de las tierras agrícolas que permita programar la oferta y cumplir con las necesidades y condiciones del mercado nacional. En este estudio se optimizó la rentabilidad anual de sembrar 2,34 hectáreas de papa, cebolla y zanahoria, mediante un modelo de programación lineal. Este trabajo se llevó a cabo durante el primer semestre de 2019 con productores de la zona y se utilizaron datos de fuentes primarias de instituciones relacionadas con el sector agrícola. Se aplicaron dos escenarios de optimización de la función de rentabilidad a partir de restricciones de área aprovechable, capacidad de mercado y presupuesto. En ambos escenarios fue posible optimizar la función de rentabilidad con toda la tierra aprovechable, se respetó el rezago de los ciclos de cultivo y se utilizó el menor presupuesto disponible. La optimización de la rentabilidad de cada cultivo permitió entender el comportamiento de siembra de los productores para obtener la mayor utilización de los recursos, la mejor distribución de siembra y la mayor rentabilidad posible.

Keywords

Linear programming; economic restriction; profitability function; crop rotation.

Abstract

Potato, onion and carrot production is of great economic importance in the northern zone of Cartago province. For this reason, it is necessary to seek the optimization of agricultural land that allows programming the offer and meet the needs and national market conditions. In this study, the annual profitability of sowing 2,34 hectares of potatoes, onions and carrots, using a linear programming model. This work was carried out during the first semester of 2019 with producers in the zone and data from primary sources of institutions related to the agricultural sector were used. Two optimization scenarios of the profitability function were applied based on restrictions of usable area, market capacity and budget. In both scenarios, it was possible to optimize the profitability function with all the usable land, the lag of the crop cycles was respected and the least available budget was used. The profitability optimization of each crop provides an important contribution that allows to understand the sowing behavior of the producers in the search to obtain the greatest use of resources, the best sowing distribution and the highest possible profitability.

Introducción

En el año 2015 en la provincia de Cartago los cultivos anuales ocupaban una extensión aproximada de 10048 ha, de las cuales, el 29,28% eran dedicadas a la producción de papa (*Solanum tuberosum* L.), el 13,71% a cebolla (*Allium cepa* L.) y el 6,34% a zanahoria (*Daucus carota* L.) [1]. Del total de hectáreas (ha) sembradas a nivel nacional de estos tres cultivos, la zona alta de Cartago⁵ representó para el año 2015 el 78,52%, 84,29% y 73,87%, respectivamente [1].

5 Se entiende como zona norte de Cartago, aquellos territorios ubicados en las

La planificación de la producción en fincas depende de factores tales como el tipo y calidad del suelo, la tasa de rendimiento, las condiciones climáticas, la disponibilidad de agua e insumos agrícolas, el acceso al capital necesario, los costos de producción, la tecnología aplicada, entre otros. De acuerdo con Osaki y Batalh [2], la propiedad representativa o típica de una estructura de producción agrícola debe incluir las características de un grupo de productores en una región, dado que usan las mismas tecnologías.

En el ámbito de la investigación de operaciones, Render *et al.* [3] destacan la programación lineal (PL) como una técnica basada en el modelado matemático de una situación para facilitar la toma de decisiones con respecto a la asignación de los recursos, que bien, podrían ser limitados. Para la formulación de estos modelos existen tres elementos indispensables de identificar: a) las variables de decisión, b) la función objetivo y c) las restricciones [4]. Los modelos de PL han tenido un papel importante en investigaciones agrícolas, en especial cuando se trabaja con sistemas productivos en rotación de cultivos [5].

La programación lineal en el campo de la agricultura es una herramienta de gran utilidad debido a su capacidad para resolver problemas del mundo real, al cumplir con objetivos como la maximización de utilidades o la minimización de costos [6]. Tal es el caso de Lora-Freyre y Pellicer-Durán [7] que utilizaron PL para maximizar la producción de café y demostrar el aumento en la producción después de mejorar el plan de distribución de tierras. Bedoya-Cardoso y Salazar-Moreno [8] se enfocaron en la optimización del uso de fertilizantes en el cultivo de café y demostraron una minimización en los costos de fertilización; mientras que Miller *et al.* [9] minimizaron el costo total del empaquetado de tomate.

Para mejorar el balance alimentario en una lechería tropical se utilizó un modelo PL que permitió la distribución óptima del área utilizada para la producción de forrajes [10]. También se optimizó el uso del recurso hídrico para estimar la superficie de riego y el patrón de cultivos ideal para incrementar los beneficios netos de los productores afectados por los efectos negativos de la sequía en la agricultura, por lo que propició una reducción en la superficie de riego [11].

En lo que respecta a la maximización de beneficios, Mohamad y Said [12] desarrollaron un modelo de PL con cultivos de cosecha única, al tomar en cuenta el problema que sufren algunos agricultores en Malasia al definir qué, cuánto y cuándo sembrar. El beneficio total se maximizó en el escenario que disponía el mayor capital posible y los menores gastos administrativos, para implementar la combinación de los cultivos pak choi y lechuga.

En la región de Trigay, Etiopía, se efectuó un análisis de sensibilidad para un modelo de PL que optimizara el patrón de cultivo en función de maximizar el beneficio [13]. El modelo concluyó acerca del nivel de sensibilidad en la agricultura con respecto a la producción de cultivos como verduras, cereales, legumbres y frutas y verduras, combinadas o no con cereales [13].

Con el uso de modelación avanzada que incorpore el riesgo mediante una variante del método MOTAD⁶, se diseñó un modelo PL para una granja en Oregon [5]. Del mismo modo, su finalidad fue la maximización de beneficios, a través de todas las combinaciones posibles en un sistema de rotación y la inexistencia de limitantes en los recursos productivos. El objetivo se cumplió con una rotación continua de trigo, patatas, trigo, patatas y maíz, respectivamente. El análisis de caso fue dominado por el cultivo con el mayor retorno por acre, mismo que se ve reducido al incorporar otros cultivos para evitar la pérdida de propiedades del suelo [5].

faldas del volcán Irazú a una altitud superior a 1500 msnm.

6 Minimization of Total Absolute Deviations propuesto por Tauer [14].

En Brasil también se incorporó el riesgo en un modelo de PL para la producción de soja temprana, soja normal y maíz, con restricciones de capital inicial, al menos dos cosechas anuales, disponibilidad de horas máquina y de parcelas en el tiempo, y una rotación continua de soja temprana seguida por maíz [2]. El modelo maximizó el margen de contribución bruta sujeto al riesgo, en un área disponible de 1300 ha. La maximización de la contribución generó un beneficio máximo que asume el mayor nivel de riesgo posible. La menor exposición al riesgo se dio al optar por un margen bruto máximo que destinaba 128 ha para soja temprana y maíz, y 1172 ha a la soja normal; con un nivel de riesgo mínimo [2].

En Costa Rica la disponibilidad de investigaciones publicadas acerca de la aplicación de PL en agricultura es limitada. Una investigación de Alvarado-Boirivant [15] determinó que los cultivos de zanahoria, repollo y cebolla bajo un patrón de siembra definido cumplían con el objetivo del modelo, siendo la premisa principal, generar una influencia sobre las PYMES para que realicen este tipo de análisis y asignen sus recursos de manera óptima.

El mismo autor realizó un análisis *post-optimal* de PL aplicado a la agricultura para maximizar las ganancias e identificar las holguras en los recursos utilizados; esto quiere decir que la totalidad de los recursos disponibles en una situación específica no se utilizan por completo [16]. Posteriormente, se demostró la optimización de siembra en un asentamiento agrícola para 11 cultivos distintos y un área mínima de siembra para cada uno; como resultado se obtuvo una mayor participación en la maximización de los beneficios de los cultivos de chile, papa y vainica [17].

El objetivo de este estudio fue optimizar la rentabilidad económica de sembrar 2,34 ha de papa, cebolla y zanahoria en la zona norte de Cartago, mediante un modelo de programación lineal, para contribuir y fortalecer con la generación de conocimiento en el área de la investigación agrícola costarricense.

Metodología

La programación lineal utiliza un modelo matemático a partir de la determinación de un problema que se desea resolver. Para esto es necesario identificar cual es la función objetivo que se desea optimizar, y cuáles son las restricciones o limitantes relacionadas con la disponibilidad real de recursos [18]. El modelo matemático en su forma estándar es el siguiente:

$$Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (1a)$$

Sujeta a las restricciones,

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1 \quad (1b)$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2 \quad (1c)$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m \quad (1d)$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0 \quad (1e)$$

Los modelos de PL se resuelven a través de una solución interactiva por medio de un algoritmo como es el caso del método Simplex. Este método parte de un planteamiento algebraico utilizando renglones en forma pivotante para convertir las restricciones funcionales de desigualdad en restricciones de igual equivalentes, y reducir la matriz implícita hasta encontrar el óptimo para la función objetivo y las holguras de las restricciones [19] [18].

Datos

En este estudio se utilizaron datos de fuentes secundarias y primarias tanto para la determinación de los ingresos como de los costos, expresados en dólares estadounidenses (USD) al 31 de marzo del 2019. Se utilizó el costo de producción para una hectárea cosechada de cada cultivo a partir de las estructuras de costos publicadas por InfoAgro [20]–[22] y que fueron actualizadas -por este equipo de investigación- a marzo 2019, con cotizaciones de las casas comerciales, y la validación de las labores e insumos utilizados, con productores en la zona de estudio. De la misma manera, los rendimientos por hectárea fueron publicados por InfoAgro [20]–[22] y validados nuevamente con productores.

De acuerdo con las entrevistas a los productores se establecieron los precios promedio en finca por kilogramo (kg) de producto vendido, tanto para papa, cebolla y zanahoria. Además, se analizaron los precios de PIMA⁷ como referente de comercialización y se utilizó el índice estacional de precios mensual⁸ del año 2018 (Cuadro 1) a partir de un análisis histórico del periodo 2010-2017 [23] [24]. Aplicar el índice de variación de precios del mercado mayorista permitió estimar el precio posible en los diferentes meses del año.

Cuadro 1. Índice estacional de precios mensuales de papa (*Solanum tuberosum* L.), cebolla (*Allium cepa* L.) y zanahoria (*Daucus carota* L.). Cartago, Costa Rica. 2019.

Mes	Papa	Cebolla	Zanahoria
Ene	5,00%	34,14%	-2,78%
Feb	7,79%	10,90%	-15,41%
Mar	5,19%	-10,76%	-7,07%
Abr	5,45%	-16,63%	-4,91%
May	3,23%	-12,08%	-11,44%
Jun	5,33%	7,12%	-5,64%
Jul	14,97%	18,29%	10,01%
Ago	-10,86%	8,78%	21,23%
Set	-19,69%	-23,74%	-4,16%
Oct	-16,45%	-29,02%	-19,86%
Nov	0,39%	-12,69%	-17,00%
Dic	-0,34%	25,69%	-9,39%

Fuente: [23]

7 Programa Integral de Mercadeo Agropecuario.

8 Entiéndase índice estacional de precios como la variación en cada mes con respecto al precio promedio anual.

La rentabilidad de cada cultivo (cuadro 2), medida como la utilidad bruta generada por hectárea cosechada, se calculó como un producto del rendimiento en kg ha⁻¹ y el precio mensual por kg estimado, menos los costos totales de producción por hectárea.

$$u_{ij} = IT - CT \quad (2)$$

$$IT = p_{ij} * x_{ij} \quad (3)$$

$$CT = CV_{ij} + CF_{ij} \quad (4)$$

Donde,

u_{ij} es la rentabilidad bruta por hectárea para el cultivo j en el mes i ;

IT es el ingreso total generado por hectárea en base al precio de venta (p) por kg y el rendimiento (x) en kg cosechados para para el cultivo j en el mes i ;

CT es la suma de los costos variables (CV) y costos fijos (CF) por hectárea para el cultivo j en el mes i .

Cuadro 2. Rentabilidad mensual (USD) por hectárea según cultivos de papa (*Solanum tuberosum* L.), cebolla (*Allium cepa* L.) y zanahoria (*Daucus carota* L.). Cartago, Costa Rica. 2019.

Mes	Papa		Cebolla		Zanahoria	
	Variable	Rentabilidad	Variable	Rentabilidad	Variable	Rentabilidad
Ene	X-PT1	7984	X-ON1	3001	X-CA1	4880
Feb	X-PT2	7589	X-ON2	3704	X-CA2	4112
Mar	X-PT3	7963	X-ON3	6669	X-CA3	4794
Abr	X-PT4	9679	X-ON4	8394	X-CA4	6635
May	X-PT5	5080	X-ON5	6925	X-CA5	7956
Jun	X-PT6	3508	X-ON6	1903	X-CA6	4968
Jul	X-PT7	4085	X-ON7	1087	X-CA7	3121
Ago	X-PT8	7084	X-ON8	3609	X-CA8	7458
Set	X-PT9	6954	X-ON9	9537	X-CA9	4353
Oct	X-PT10	7904	X-ON10	10842	X-CA10	5131
Nov	X-PT11	8401	X-ON11	7252	X-CA11	3645
Dic	X-PT12	7938	X-ON12	3907	X-CA12	4626

Para el desarrollo de este modelo se consideraron los siguientes supuestos:

- Son constantes las productividades promedio en toneladas por hectárea (t ha⁻¹) de cada cultivo.
- Son constantes los costos por hectárea en cada ciclo de producción de los cultivos⁹.

9 Tres ciclos por año.

- Existe acceso a todos los recursos productivos durante todo el año y hay disponibilidad de agua.
- Se puede sembrar en cualquier mes del año.
- Las restricciones del mercado se definen utilizando la proporción de áreas cultivadas de las estadísticas nacionales asumiendo que ellas responden a las preferencias relativas de consumo.
- Se suponen pequeños productores en un ambiente de competencia perfecta que no distorsionan el mercado.

Diseño del modelo

Función de maximización de la rentabilidad

Para cumplir con la maximización de la rentabilidad, la función objetivo (ecuación 5) estima la utilidad bruta a partir de las ventas esperadas del total de kg cosechados de cada cultivo durante las etapas productivas y los costos totales de establecimiento, mantenimiento y cosecha. La función objetivo se asocia a la maximización de la utilidad bruta de una finca promedio de 2,34¹⁰ ha [1], con los tres cultivos mencionados.

$$z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m u_{ij} x_{ij} \quad i(1, \dots, n) \quad j(1, \dots, m) \quad (5)$$

Donde, u representa la utilidad bruta por hectárea para el cultivo j en el mes i ; y x es la cantidad de hectáreas sembradas para el cultivo j en el respectivo mes i ; siendo m la cantidad de productos y n la cantidad de periodos.

Restricciones de área

Sea el área disponible total la siguiente:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \leq \left(\frac{12}{d}\right)\psi \quad i(1, \dots, n) \quad j(1, \dots, m) \quad (6)$$

Donde, x_{ij} es el área para el cultivo j en el mes i ; d es la duración del ciclo de cultivo en meses; es el área promedio de la finca, que en este caso es de 2,34 ha.

Sea el área disponible en rotación de cultivos la siguiente:

$$x_{ij} = \psi - \sum_{k=1}^{\frac{12}{d}} x_{(i-k)j} \quad (7)$$

Donde, k es el mes rezagado desde el primer mes anterior hasta cumplir con los meses que conforman el ciclo dentro del año de producción; $X_{(i-k)j}$ es el área disponible para sembrar en el mes i menos el área sembrada en los meses anteriores de acuerdo con el ciclo de cultivo.

10 Área promedio de fincas de la zona norte de Cartago [1].

Es decir, el modelo se restringe a la utilización de esta área sembrada en cada mes del año; y dado que el ciclo productivo es de cuatro meses para cada cultivo, el área disponible para sembrar en el segundo mes debe ser menor o igual al área disponible total menos el área sembrada en el primer mes y sucesivamente hasta el mes en que se cumple cada ciclo.

Restricción de no negatividad

$$x_{ij} \geq 0 \quad (8)$$

Esta restricción impide que, por motivos matemáticos, el área x_{ij} destinada para el cultivo j en el mes i , sea menor que cero.

Restricciones de mercado

En el periodo 2007-2017, de las hectáreas sembradas por las fincas de la zona de estudio es aproximadamente del 50% para papa, 26% para cebolla y 24% para zanahoria. Este promedio obtenido a partir de datos anuales, es de acuerdo con el porcentaje de participación relativa del total de hectáreas para los tres cultivos. Tomándose éste comportamiento de siembra como la preferencia revelada del mercado, se utilizó como variable restrictiva para el modelo [25].

$$x_{ij} \leq 0,50x_{j=papa} \quad (9)$$

$$x_{ij} \leq 0,26x_{j=cebolla} \quad (10)$$

$$x_{ij} \leq 0,24x_{j=zanahoria} \quad (11)$$

Restricción de capital anual

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} \leq c_{j=\max} \left(\frac{12}{d} \right) \psi \quad i(1, \dots, n) \quad j(1, \dots, m) \quad (12)$$

Donde, c_{ij} es el costo de producción para el cultivo j en el mes i ; $c_{j=\max}$ es el costo de producción más alto de los cultivos involucrados.

El modelo no incluye costo financiero, pero si la restricción presupuestaria anual. Además, se utilizó el complemento Solver de la suite ofimática de Microsoft Excel para obtener la solución del modelo de PL para maximizar la rentabilidad de una finca de 2,34 ha, destinada a los cultivos de interés en tres ciclos de producción anual (cuatro meses cada ciclo).

Resultados y Discusión

Como se observa en el cuadro 2, una hectárea de cebolla genera la rentabilidad más alta y la más baja, en los meses de octubre y julio según corresponde. El cultivo de papa por su parte, presenta las utilidades más altas en todo el año de manera sostenida, por encima de la cebolla y la zanahoria.

Las soluciones óptimas maximizaron la rentabilidad del productor en los meses en que existe un mayor índice de estacionalidad de los precios, y desechó las épocas donde el comportamiento del índice es menor, por ejemplo, si el terreno se dedica únicamente a la producción de papa, cultivar en abril permitirá al productor aprovechar los precios del mes de julio, donde se presenta el mayor índice de precios, y evitará la cosecha en los meses en que existen los menores índices de precios (cuadro 1). La utilidad se maximizó en 46846 USD, con el uso del 89% del presupuesto total disponible para estos cultivos (cuadro 3).

Cuadro 3. Parámetros de maximización de la utilidad para la rotación de los cultivos de papa (*Solanum tuberosum* L.), cebolla (*Allium cepa* L.) y zanahoria (*Daucus carota* L.). Cartago, Costa Rica. 2019.

Cultivo	Utilidad anual (USD)	Presupuesto utilizado	Hectáreas utilizadas	Meses de siembra
Papa	28900	51%	3,51	Abr-Ago-Dic
Cebolla	9680	24%	1,83	Abr-Ago-Dic
Zanahoria	8266	14%	1,68	Abr-Ago-Dic
Total	46846	89%	7,02	

La solución del modelo mantiene bajo cultivo las 2,34 ha disponibles con un aprovechamiento total anual de 7,02 ha, lo anterior, debido a que dicha área se siembra varias veces durante el año.

La restricción de preferencia de mercado obliga a la solución a mantener la composición de proporcionalidad de oferta de los tres cultivos en las proporciones de 50% para papa, 26% cebolla y 24% zanahoria. Por lo tanto, se siembran en esta proporción cada vez que se realiza una siembra, esta restricción pretende contemplar la concentración de mercado, ya que si el productor siembra todo en un único periodo, los demás meses estarían desabastecidos y probablemente el índice de precios cambiaría por el impacto de la producción en el mercado.

Los resultados de rentabilidad generada por cada cultivo en el mes respectivo de siembra se resumen en el cuadro 4.

Cuadro 4. Resultados del modelo de programación lineal (PL) por cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.), cebolla (*Allium cepa* L.) y zanahoria (*Daucus carota* L.). Cartago, Costa Rica. 2019.

Cultivo	Mes de siembra	Mes de cosecha	Uso de área (ha)	Rentabilidad (USD)
Papa	Abr	Jul	1,17	11325
	Ago	Dic	1,17	8288
	Dic	Mar	1,17	9288
Cebolla	Abr	Jul	0,61	5107
	Ago	Dic	0,61	2196
	Dic	Mar	0,61	2377
Zanahoria	Abr	Jul	0,56	3726
	Ago	Dic	0,56	1942
	Dic	Mar	0,56	2598

El modelo supone que el productor tiene acceso al capital para la siembra, en este sentido, es importante mencionar que el mes de abril es el que genera mayor rentabilidad al productor y en el mes de julio se daría el mayor flujo de caja, razón por la cual, las opciones de financiamiento que tomen deberían contemplar la capacidad de pago con base en estos ciclos.

Cuadro 5. Resumen de rentabilidad (USD) según mes de siembra de papa (*Solanum tuberosum* L.), cebolla (*Allium cepa* L.) y zanahoria (*Daucus carota* L.). Cartago, Costa Rica. 2019.

Cultivo	Mes de siembra			Total
	Abril	Agosto	Diciembre	
Papa	11325	8288	9288	28900
Cebolla	5107	2196	2377	9680
Zanahoria	3726	1942	2598	8266
Total	20158	12425	14263	46846
Participación	43,03%	26,52%	30,45%	

En un segundo escenario, si el productor deseara producir los tres cultivos durante un año productivo, sin la restricción de preferencias del mercado, la solución óptima da como resultado una maximización de la utilidad bruta que ascendió a 59616 USD, con menor uso de presupuesto (84%) y se aprovecha el 100% del área disponible. El sistema responde a una sola siembra de papa en el mes de enero, una de cebolla en el mes de setiembre, y una de zanahoria en mayo.

Cuadro 6. Parámetros de maximización de la utilidad para la rotación de los cultivos de papa (*Solanum tuberosum* L.), cebolla (*Allium cepa* L.) y zanahoria (*Daucus carota* L.), sin restricción de mercado. Cartago, Costa Rica. 2019.

Cultivo	Utilidad anual (USD)	Presupuesto utilizado	Hectáreas utilizadas	Mes de siembra	Mes de cosecha
Papa	18684	34%	2,34	Ene	Abr
Cebolla	22316	31%	2,34	Set	Dic
Zanahoria	18616	20%	2,34	May	Ago
Total	59616	84%	7,02		

Resulta importante destacar que este modelo de optimización no establece de previo el plan de siembra como Alvarado-Boirivant [15], por lo que las fechas de siembra se obtienen con el resultado de la optimización que responde a la rentabilidad por hectárea esperada en cada mes del año.

El modelo asignó mayor área de siembra al cultivo de la papa, por presentar mejor rentabilidad relativa y menos a los otros dos cultivos, además el modelo seleccionó los meses de abril, agosto y diciembre, con la finalidad de que la cosecha se obtenga en los meses posteriores en donde se presentan los mejores precios de mercado. Lo anterior debido a que la estacionalidad de los precios en Costa Rica y el comportamiento del consumidor en la compra han marcado el índice de precios de manera que el productor conoce la mejor época de siembra y cosecha de los mismos, tratando siempre de mantener oferta de los tres productos. Esta consideración de la dinámica de precios coincide con resultados de investigaciones similares como las realizadas por Alvarado-Boirivant [15] y Ahumada y Villalobos [26].

El área total anual optimizada corresponde a la suma de los tres ciclos de los cultivos interactuando en el tiempo, de manera que el modelo capturó la dinámica multiciclo de forma similar a Galán *et al.* [27] en España, con la diferencia que, en este caso, el resultado de un ciclo para un cultivo no es considerado para el ciclo sucesivo.

En su trabajo, Filippi *et al.* [28] también consideraron la dinámica de precios de mercado, pero difiere de esta investigación particularmente en que utilizaron restricciones sobre ventanas en el año para realizar actividades de siembra, cuando en esta investigación no fue así, ya que se permitió el acceso al riego para poder cultivar en cualquier época del año.

El segundo modelo aplicado sin restricciones de mercado, resuelve sembrar toda el área disponible una sola vez en el año para cada cultivo y así obtener una mayor utilidad, de la misma manera que Morales y Murcia [29]. No obstante, se considera importante ampliar este modelo a otros cultivos con ciclos distintos para analizar el efecto correspondiente a las diferencias de ciclo, como fue planteado por Mohamad y Said [12].

Conclusiones

El modelo matemático de programación lineal, en el primer escenario permitió demostrar que la optimización económica del sistema de rotación productiva de los cultivos de papa (PT), cebolla (ON) y zanahoria (CA), se alcanzó al sembrarlos en los meses de abril, agosto y setiembre, para cosechar en los meses de julio, noviembre y diciembre. Esto siempre que se imponga una restricción de preferencia de mercado que obliga a respetar una proporcionalidad en la oferta de los cultivos.

Las restricciones de mercado utilizadas, facilitan la distribución de la rotación de siembra, sin embargo, genera que todos los productores trabajen igual y que no haya diferencias en las épocas de cosecha entre productores. Al ser productos poco influenciados por la importación, el mercado de precios se rige mayormente en función de la oferta nacional.

En un segundo escenario donde no existe esta restricción de mercado, el modelo busca maximizar en el mes en todo el año en donde prevalezcan los mejores precios. De ésta manera se utiliza la totalidad de la tierra disponible para un solo cultivo cada vez que se siembra, sea enero para papa, setiembre para cebolla y mayo para zanahoria y así aprovechar de una mejor forma el precio de mercado.

La solución de mayor rentabilidad se presentó en el segundo escenario, en donde los productores siembran una sola vez al año cada cultivo, y utilizan toda la tierra disponible. No obstante, esto puede generar un mayor riesgo de que si todos los productores se comportan de la misma manera, y se genere un exceso de oferta en un mismo momento que provoque una caída de precios, lo anterior, ante una realidad donde no hay mecanismos de almacenamiento del producto para distribuir esa cosecha durante el año. Se presume entonces, que sembrar más en un solo momento, genera un mayor riesgo, por lo que el segundo modelo estaría siendo más riesgoso que el primero, situación que podría evaluarse si se incluyen variables de riesgo al modelo, lo cual está fuera del alcance de este trabajo.

Referencias

- [1] INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos), *Cultivos agrícolas, forestales y ornamentales*. San José, Costa Rica: INEC, 2015.
- [2] M. Osaki y M. O. Batalha, «Optimization model of agricultural production system un grain farms under risk, in Sorriso, Brazil», *Agric. Syst.*, vol. 127, pp. 178-188, 2014, doi: 10.1016/j.agsy.2014.02.002.
- [3] B. Render, R. M. Stair, y M. E. Hanna, *Métodos cuantitativos para los negocios*, 11.ª ed. México: Pearson Education, 2012.
- [4] K. Mathur y D. Solow, *Investigación de operaciones: El arte de la toma de decisiones*. México: Prentice-Hall, 1996.

- [5] T. El-Nazer y B. A. McCarl, «The choice of crop rotation: A modeling approach and case study», *Am. J. Agric. Econ.*, vol. 68, n.º 1, pp. 128-136, 1986, doi: 10.2307/1241657.
- [6] P. Paam, R. Berretta, M. Heydar, R. H. Middleton, R. García-Flores, y P. Juliano, «Planning models to optimize the agri-fresh food supply chain for loss minimization: A review», *CSIRO Res. Publ. Repos.*, pp. 1-16, 2016, doi: 10.1016/B978-0-08-100596-5.21069-X.
- [7] R. J. Lora-Freyre y R. G. Pellicer-Durán, «Maximización de la producción de café a través de la programación lineal», *Anu. Fac. Cienc. Económicas Empres.*, vol. 3, pp. 61-70, 2012.
- [8] M. Bedoya-Cardoso y R. Salazar-Moreno, «Optimización del uso de fertilizantes para el cultivo de café», *Rev. Mex. Cienc. Agríc.*, vol. 5, pp. 1433-1439, 2014, doi: 10.29312/remexca.v0i8.1100.
- [9] W. A. Miller, L. C. Leung, T. M. Azhar, y S. Sargent, «Fuzzy production planning model for fresh tomato packing», *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 53, pp. 227-238, 1997, doi: 10.1016/S0925-5273(97)00110-2.
- [10] J. A. Herrera, A. García, y J. Suárez, «Análisis prospectivo de la base alimentaria en una lechería tropical con programación lineal», *Pastos Forrajes*, vol. 37, pp. 435-441, 2014.
- [11] D. Ortega-Gaucin, E. Mejía-Sáenz, E. Palacios-Vélez, L. Rendón-Pimentel, y A. Excebio-García, «Modelo de optimización de recursos para un distrito de riego», *Terra Latinoam.*, vol. 27, n.º 3, pp. 219-226, 2009.
- [12] N. H. Mohamad y F. Said, «A mathematical programming approach to crop mix problem», *Afr. J. Agricultural Res.*, vol. 6, n.º 1, pp. 191-197, 2011, doi: 10.5897/AJAR10.028.
- [13] J. Jebelli, B. Paterson, y A. Abdelwahab, «A linear programming model to optimize cropping pattern in small-scale irrigation schemes: an application to Mekabo Scheme in Tigray, Ethiopia», *Int. J. Environ. Agric. Res.*, vol. 2, n.º 8, pp. 24-34, 2016.
- [14] L. W. Tauer, «Target MOTAD», *Am. J. Agric. Econ.*, vol. 65, pp. 606-610, 1983, doi: 10.2307/1240515.
- [15] J. A. Alvarado-Boirivant, «La programación lineal aplicación de la pequeñas y medianas empresas», *Rev. Reflex.*, vol. 88, n.º 1, pp. 89-105, 2009.
- [16] J. A. Alvarado-Boirivant, «El análisis post-optimal en programación lineal aplicada a la agricultura», *Rev. Reflex.*, vol. 90, n.º 1, pp. 161-173, 2011.
- [17] J. A. Alvarado-Boirivant, «Modelo de optimización para un asentamiento agrícola en La Cruz de Guanacaste, Costa Rica», *Rev. InterSedes*, vol. 14, n.º 29, pp. 19-40, 2013.
- [18] F. S. Hillier y G. J. Lieberman, *Introducción a la investigación de operaciones*, 9.ª ed. México: McGraw-Hill, 2010.
- [19] D. R. Anderson, D. J. Sweeney, y T. A. Williams, *Métodos cuantitativos para los negocio*, 9.ª ed. México: Thomson, 2004.
- [20] InfoAgro, «Costos de producción de papa», *MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería)*, 2015. <http://www.infoagro.go.cr/EstadisticasAgropecuarias/CostosProduccion/Paginas/default.aspx>.
- [21] InfoAgro, «Costos de producción de zanahoria», *MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería)*, 2015. <http://www.infoagro.go.cr/EstadisticasAgropecuarias/CostosProduccion/Paginas/default.aspx>.
- [22] InfoAgro, «Costos de producción de cebolla», *MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería)*, 2018. <http://www.infoagro.go.cr/EstadisticasAgropecuarias/CostosProduccion/Paginas/default.aspx>.
- [23] PIMA (Programa Integral de Mercadeo Agropecuario), «Calendario de estacionalidad hortalizas 2018», *PIMA*, 2018. <http://www.pima.go.cr/wp-content/uploads/2018/07/Calendario-de-estacionalidad.pdf>.
- [24] PIMA (Programa Integral de Mercadeo Agropecuario), «Boletín de precios por fecha», *PIMA*, 2019. <http://www.pima.go.cr/simm/>.
- [25] FAOSTAT, «Datos sobre alimentación y agricultura», *FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations)*, 2019. <http://www.fao.org/faostat/en/>.
- [26] O. Ahumada y J. R. Villalobos, «Operational model for planning the harvest and distribution of perishable agricultural products», *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 133, pp. 677-687, 2011, doi: 10.1016/j.ijpe.2011.05.015.
- [27] A. Galán, C. Pozo, G. Guillén-Gosálbez, A. Antón, y L. Jiménez, «Multi-stage linear programming model for optimizing cropping plan decisions under the new Common Agricultural Policy», *Land Use Policy*, vol. 48, pp. 515-524, 2015, doi: 10.1016/j.landusepol.2015.06.022.
- [28] C. Filippi, R. Mansini, y E. Stevanato, «Mixed integer linear programming models for optimal crop selection», *Comput. Oper. Res.*, vol. 81, pp. 26-39, 2017, doi: 10.1016/j.cor.2016.12.004.
- [29] E. Morales y H. H. Murcia, «Aplicación de la programación simplificada en una finca de San Rafael de Alajuela», *Agron. Costarric.*, vol. 1, n.º 1, pp. 5-15, 1977.

Evaluación de la red de distribución: conexión del vehículo eléctrico híbrido enchufable

Evaluation of the power distribution network: plug-in hybrid electric vehicle connected

Jose Galarza-Linares¹, David Condezo-Hurtado²,
Bartolome Saenz-Loayza³, David Huarac-Rojas⁴

Fecha de recepción: 17 de setiembre de 2020
Fecha de aprobación: 27 de enero de 2021

Galarza-Linares, J; Condezo-Hurtado, D; Saenz-Loayza, B; Huarac-Rojas, D. Evaluación de la red de distribución: conexión del vehículo eléctrico híbrido enchufable. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-4 Octubre-Diciembre 2021. Pág 50-62.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i4.5384>

- 1 Universidad Nacional del Centro del Perú. Perú.
Correo electrónico: jgalarza@uncp.edu.pe
 <https://orcid.org/0000-0001-5569-6541>
- 2 Universidad Nacional del Centro del Perú. Perú.
Correo electrónico: dcondezo@uncp.edu.pe
 <https://orcid.org/0000-0002-1658-910X>
- 3 Universidad Nacional del Centro del Perú. Perú.
Correo electrónico: bsaenz@uncp.edu.pe
 <https://orcid.org/0000-0002-8664-8574>
- 4 Universidad Nacional del Centro del Perú. Perú.
Correo electrónico: dhuarac@uncp.edu.pe
 <https://orcid.org/0000-0003-1569-4917>



Palabras clave

Caída de tensión; demanda eléctrica; operación del sistema eléctrico; pérdidas de energía eléctrica; sistema eléctrico de prueba; vehículo eléctrico híbrido enchufable.

Resumen

La evaluación de nuevas tecnologías en el sistema eléctrico es pertinente para la planificación y operación de la red eléctrica, esto permite brindar un servicio eléctrico de calidad a los usuarios finales y preservar la operación del sistema eléctrico. La presente investigación analiza la integración de los vehículos eléctricos híbridos enchufables (VEHE) en la red eléctrica de distribución, el sistema eléctrico Europeo de Baja Tensión de 906 barras del IEEE es usado como sistema de prueba, considerando el incremento de la demanda eléctrica en función de la operación, horario de carga, tecnología y autonomía de esta nueva tecnología de movilidad. A través de una metodología analítico-no experimental, los siguientes factores fueron analizados: variación de tensión, pérdidas de energía eléctrica e incremento de la demanda en el mediano y largo plazo. Los resultados obtenidos muestran que para niveles de irrupción de esta nueva tecnología es necesario repotenciar la red eléctrica actual para preservar las condiciones de operación estables del sistema eléctrico y cumplir con la normativa del sector eléctrico, los resultados muestran que la conexión masiva y sin control tiene una gran repercusión en la operación de la red eléctrica.

Keywords

Voltage drop; power demand; power system operation; power loss; power system test; plug-in hybrid electric vehicle.

Abstract

The evaluation of new technologies in the electrical system is relevant for the planning and operation of the electrical network, this allows to provide a quality electrical service to the final users and to preserve the operation of the electrical system. The present research analyzes the integration of plug-in hybrid electric vehicles (EVs) in the electric distribution network. The European low voltage 906 busbar electric system of the IEEE is used as a test system, considering the increase of the electric demand depending on the operation, charging time, technology and autonomy of this new mobility technology. Through an analytical-non-experimental methodology, the following factors were analyzed: voltage variation, electrical energy losses and increase in demand in the medium and long term. The results obtained show that for levels of irruption of this new technology it is necessary to repower the current electrical network to preserve the stable operating conditions of the electrical system and to comply with the regulations of the electrical sector, the results show that the massive and uncontrolled connection has a great impact on the operation of the electrical network.

Introducción

Para la introducción de los vehículos eléctricos (VE) en la sociedad, es necesario el despliegue de ciertas estrategias: equipos de carga para VE, descarbonización en la producción de electricidad y la integración de los VE a la red eléctrica [1]. La tecnología del vehículo eléctrico híbrido enchufable (VEHE) con el uso del motor eléctrico para su propulsión, representa una tecnología más eficiente respecto al vehículo eléctrico híbrido convencional con motor de combustión [2]. El comportamiento de las personas en el uso de VEHE y las características

según el tipo de VEHE, son determinantes para el estudio del impacto de la conexión de esta tecnología en la red eléctrica [3], este tipo de VE necesita una gran cantidad de energía para la carga de baterías, esta demanda de energía adicional podría tener impactos negativos en la red eléctrica [4].

El estudio de la planificación del sistema eléctrico de distribución con el ingreso de VEHE debe considerar los siguientes indicadores: pérdidas eléctricas y caída de tensión; por parte del VEHE es necesario conocer la capacidad de batería, nivel de carga, autonomía eléctrica, horario de carga entre otros factores [3]. En [5] se estudió el análisis del flujo de carga a través del control de tensión dependiente para obtener los indicadores mencionados en [3]. La conexión de los VEHE en forma descoordinada pueda afectar la operación estable del sistema, su confiabilidad y seguridad; las estrategias inteligentes en función de la tecnología de carga contribuyen a la seguridad de la red eléctrica y preservan las condiciones de operación económica estable [6]. En [7] se considera a los VEHE agentes energéticos en el sistema eléctrico, para la conexión de esta tecnología a la red eléctrica se analizó el tiempo de conexión a la red, la ubicación de centro de carga y el nivel de batería; a través de una simulación del sistema eléctrico se analizó esquemas de gestión inteligente de energía para aliviar la congestión en el sistema eléctrico debido a la conexión de esta tecnología en la red eléctrica. Los VEHE y las demás tecnologías de VE son evaluados en [8] a través de un marco de referencia que las integra en la red eléctrica a través de enfoques analíticos, deterministas y estocásticos.

El presente trabajo se enmarca en las disposiciones de eficiencia energética que viene adoptando Perú, específicamente en la inclusión de VE en el parque automotor. En este contexto las redes eléctricas de distribución abastecerán de energía a estos vehículos, en consecuencia, estas redes estarán sometidas a un nuevo “stress eléctrico” sobre su funcionamiento actual. La presente investigación evalúa la carga del VE desde la red eléctrica, conocida como G2V (*grid to vehicle*) [1]. El objetivo es analizar el comportamiento de la red eléctrica en Baja Tensión ante un panorama de conexiones masiva de VEHE, el análisis de las pérdidas eléctricas, caída de tensión y la variación de la demanda, concluyen que el sistema eléctrico debe ser repotenciado para conservar su funcionamiento en los límites normales de operación. El carácter predictivo del proyecto contempla situar a las redes de distribución peruanas dentro de un funcionamiento con los niveles de confiabilidad y fiabilidad establecidos por la normativa del Sub Sector de Electricidad Peruano así mismo afrontar los nuevos escenarios a los que serán sometidos las redes eléctricas sin perjudicar la calidad del servicio eléctrico para los usuarios y la operación del sistema eléctrico.

Materiales y métodos

Materiales

Sistema Eléctrico de Prueba del IEEE (SEP-IEEE):

El SEP-IEEE utilizado en la presente investigación es un modelo matemático de un sistema de distribución en Baja Tensión (BT) Europeo, las especificaciones técnicas, así como las condiciones de operación fueron establecidas por IEEE. Este sistema es denominado *IEEE European Low Voltage Test Feeder* que pertenece al grupo *IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee's Distribution Test Feeder Working Group* [10]. A continuación, se menciona las características importantes del SEP-IEEE:

Sistema de Distribución radial en BT de 906 barras, tensión del sistema 416 V a 50 Hz, típica del sistema BT Europeo.

El alimentador del SEP-IEEE está conectado a la red MT a través de un transformador (11/0.416 kV).

El sistema presenta 55 cargas, cada una con un perfil de carga diferente, la información del consumo energético está en series de tiempo en intervalos de 1 minuto durante las 24h.

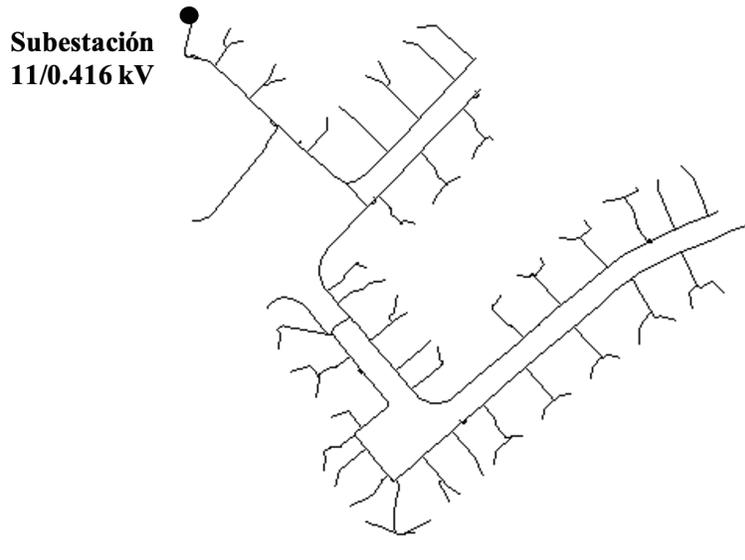


Figura 1. Sistema eléctrico IEEE de prueba (906 barras). Fuente: [10]

Entorno de Simulación:

Para la presente investigación, se consideró el modelo de red desarrollado por la empresa MathWorks [11], donde considera las 906 barras del sistema en BT. El Cuadro 1 muestra las especificaciones del software Matlab/Simulink y las herramientas utilizadas en la presente investigación, los cálculos eléctricos se realizaron a través de un *script* en Matlab.

Cuadro 1. Parámetros del entorno de simulación.

Parámetro	Descripción
Herramientas	Matlab Versión 9.3
	Simulink Versión 9.0
	Simscape Power Systems Versión 6.8
Versión Matlab/Simulink	9.3.0.948333 (R2017b)
Tipo de Simulación	Fasorial (Función acelerada activada)
Tiempo de Simulación (s)	86400 (24h)
Paso de tiempo - Ts (s)	1
Método de Solución (Solver)	Automático - Paso fijo (Ts) – ode 14x

Consideraciones de operación del VEHE:

Esta sección define los criterios para estimar el comportamiento de los usuarios:

- Los usuarios que tiene vehículo propio son utilizados para desplazamiento propio y solo para fines de transporte de personas (la capacidad de carga y remolque no es considerada).

- Los usuarios que utilizan automóviles son personas que corresponden al sector residencial, que generalmente recorren en promedio 20 – 30km diarios en ida y vuelta desde su hogar a su centro de trabajo.
- Los usuarios en promedio tienen el horario de retorno hacia sus hogares en el intervalo de tiempo de 6 pm-8 pm.
- Los usuarios en promedio tienen un solo vehículo el cual utilizan los días de semana y los fines de semana. Se ha considerado la evaluación de un día de la semana cualquiera.
- La incursión progresiva hasta el 50% de VEHE corresponde al 2060 en adelante.

Horario de carga VEHE:

El horario de llegada a una estación coincide con el horario de culminación de un viaje, es el horario de inicio del proceso de carga del VEHE. La figura 2 muestra la distribución del horario de llegada al hogar, indicando el porcentaje de VEHE que comienzan con el periodo de carga.

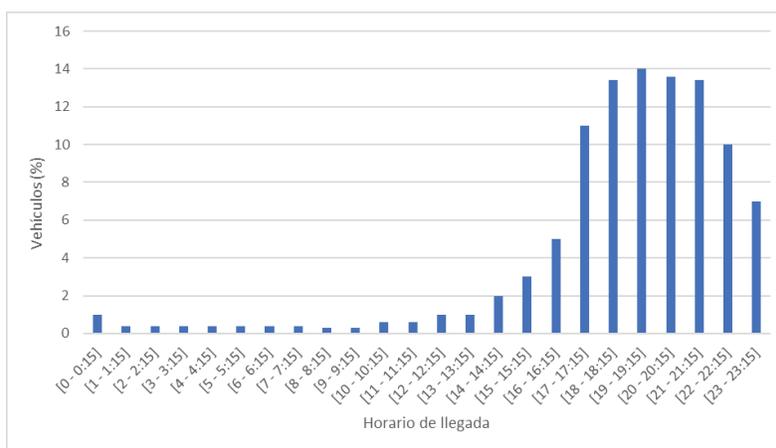


Figura 2. Distribución de la conexión de VEHE según horario de carga.

Tipos de VEHE:

En esta investigación se consideran los tipos de automóviles más comunes (Sedan y SUV). El Laboratorio Nacional del Noroeste del Pacífico realizó la estimación de la energía eléctrica consumida por kilómetro (EECK) para diferentes tipos de VEHE [12], considerando este criterio se elaboró el cuadro 2 donde se muestra 4 tipos de vehículos y sus valores EECK.

Cuadro 2. Características del VEHE según el tipo de vehículo.

Tipo de Vehículo	Sedan compacto	Sedan mediano	SUV mediano	SUV grande
Cantidad (%)	10	40	45	5
Autonomía	VEHE40	VEHE50	VEHE60	VEHE60
EECK (kW/km)	0.26	0.3	0.38	0.46

Autonomía del VEHE:

Este criterio está en relación con las marcas comerciales que al 2020 están disponibles en el mercado internacional. La nomenclatura VEHEX establece los “X” kilómetros de autonomía eléctrica máxima del vehículo. El Cuadro 2 establece valores de autonomía eléctrica para VEHEE comerciales, los valores de autonomía eléctrica son los establecidos por el fabricante: sedán compacto (Mini Countryman Cooper S E All4), sedán mediano (Hyundai Ioniq PHEV), SUV mediano (Mitsubishi Outlander PHEV), SUV grande (Volvo XC90 T8 Twin Engine).

Incremento de VEHE en el parque automotor:

Partiendo del parque automotor actual, la estimación del nivel de incursión de los VEHE para el mediano y largo plazo se muestra en la figura 3. En un escenario optimista, se considera un posicionamiento del 50% de esta nueva tecnología desde el 2060 en adelante. En relación con el SEP-IEEE, el número de VEHE considerado para el 2060 son 175 unidades.

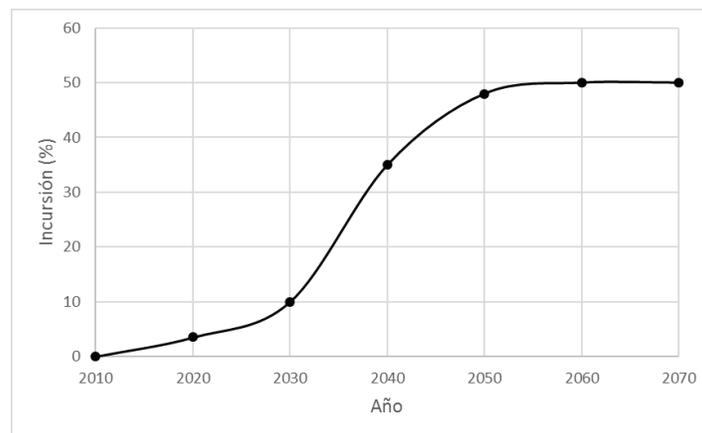


Figura 3. Incremento gradual de los VEHE en el parque automotor.

Perfil de carga diario:

El sistema eléctrico de distribución de prueba establecido en [10], tiene un perfil de carga con un consumo masivo desde las primeras horas de la mañana. Bajo las consideraciones establecidas en la sección: Consideraciones de operación del VEHE, se eligió el intervalo de 18:00 - 23:00 horas correspondientes al horario de carga.

Estimación de la demanda:

Para la presente investigación, el año 2010 es considerado como año base para realizar las proyecciones de demanda. La información del sistema de distribución presentado en [10] es considerada como información para el año de referencia. El Departamento de Energía de U.S.A, establece el crecimiento promedio 1% anual de la demanda, para esta investigación se consideró la metodología descrita en [9].

Métodos

Solución del modelo del sistema:

MathWorks ofrece una variedad de modos de solución para ecuaciones diferenciales algebraicas, la elección se alguna depende del tipo de circuito eléctrico a resolver. Para la presente investigación se optó por usar un *solver* automático de tiempo de simulación constante (T_s), en la configuración como automático, MathWorks asigna el *solver* ode14x para resolver las ecuaciones diferenciales algebraicas de paso fijo y estados continuos como se presenta en el SEP-IEEE. El *solver* ode14x, realiza una combinación del método de Newton y el proceso de extrapolación usando los valores actuales para calcular el modelo de estado en el siguiente paso de tiempo [13].

Incremento de la demanda por VEHE:

La información suministrada por [10] presenta un perfil de carga por cada minuto para un día (24h), este consumo de demanda es el que será evaluado según la incursión de VEHE y según el crecimiento de la demanda. A continuación, se describe el procedimiento utilizado para evaluar el incremento del consumo de la demanda eléctrica.

- El año 2010 es tomado como referencia para el cálculo de proyección de la demanda, según [9] se procedió a incrementar la demanda en función del año de evaluación.
- Para el año de análisis se eligió el nivel de incursión de los VEHE, desde un nivel nulo hasta un 50% en el 2060.
- Cada punto de carga corresponde al consumo de un conjunto de familias, el incremento de la demanda está en función a la cantidad, tipo y EECK del VEHE.
- Para los 55 puntos de carga en el sistema, se ha considerado el tipo de carga 0.2C durante 5 horas, el intervalo de tiempo seleccionado es de 18:00 h a 23:00 h. En forma aleatoria se realiza la distribución de VEHE en los puntos de carga, el nivel de energía que necesitan los VEHE es considerado igual a la capacidad de la batería.

Pérdidas en el sistema eléctrico:

Las redes de distribución están modeladas por una impedancia, a través de elementos pasivos: resistencias e inductancias. El procedimiento para el cálculo de pérdidas está basado en el consumo de potencia por la resistencia en los diferentes ramales de la red, las pérdidas totales están expresadas según (1).

$$P_t = \sum_{i=1}^n (I_{abc(i)})^2 \cdot R \quad (1)$$

Donde el valor de $I_{abc(i)}$ es el valor de la corriente que se inyecta a la carga ubicada en la barra i . El valor R es la resistencia total del ramal por donde circula dicha corriente. La sumatoria de las pérdidas individuales de las n ramas corresponde a las pérdidas totales del sistema de distribución.

Desviación del nivel de tensión nominal:

El cálculo de la desviación de tensión está en función de los valores obtenidos luego de resolver el circuito eléctrico a través de Matlab/Simulink, considerando cada una de las barras en el sistema eléctrico, se obtiene la desviación porcentual de tensión según (2).

$$\%V = \frac{V_c - V_r}{V_r} \quad (2)$$

Donde V_c es la tensión en el punto de carga, y V_r es la tensión de referencia (416 V).

Indicador de curva de demanda:

El diagrama de carga total muestra la sumatoria de potencias de todas las cargas individuales en un intervalo de tiempo de 24h. El factor *peak to average ratio* (PAR), muestra en general la simetría respecto de la curva de demanda respecto a la potencia promedio, este indicador esta expresado según (3).

$$PAR = \frac{P_{MAX}}{P_{PROM}} \quad (3)$$

Donde P_{MAX} corresponde a la potencia máxima en el diagrama de carga y P_{PROM} esta referido a la potencia promedio.

Resultados

Esta sección muestra los casos evaluados para el análisis del comportamiento del SEP-IEEE. Este sistema eléctrico es evaluado convenientemente teniendo presente el nivel de incremento de carga en el mediano y largo plazo, y el incremento de VEHE en el parque automotor. Luego de realizar la simulación en el entorno de Matlab/Simulink los datos obtenidos de tensiones y corrientes son utilizados para realizar los siguientes cálculos: Demanda total en kW, Variación de la Tensión en % por fase, Pérdidas totales en kW, Demanda máxima, Demanda promedio y el PAR.

Caso I:

El objetivo del presente caso es evaluar el comportamiento de la red eléctrica de distribución en condiciones normales de operación. Los resultados de P, Q e V suministrados en [10], son usados para validar los resultados del caso base. La información validada permitió implementar el SEP-IEEE con los criterios establecidos en la Sección: Incremento de la Demanda por VEHE.

La curva de demanda total mostrada en la figura 4 presenta el pico de demanda (57kW) a las 9:40 am. con relación a esta información el PAR es 2.84. Los resultados, según la demanda de energía, permite concluir que las personas realizan actividades que consumen energía durante todo el día, el factor PAR hace referencia a un perfil de carga con picos de demanda que están muy por encima del valor promedio de la demanda.

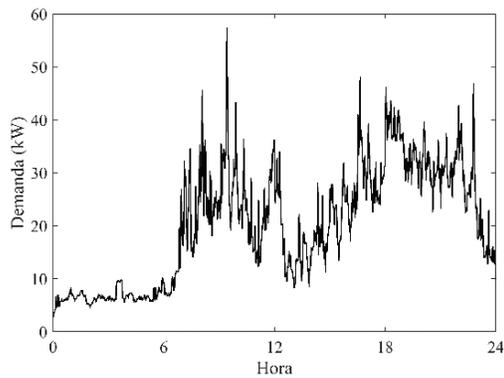


Figura 4. Caso I - Demanda total del sistema.

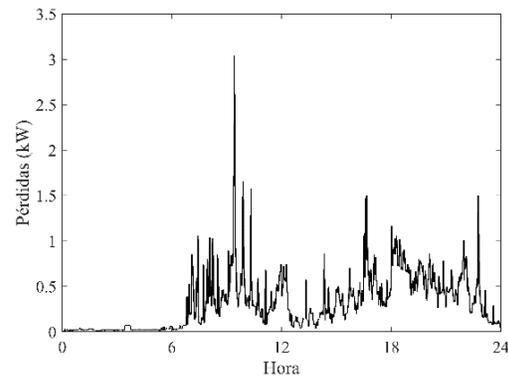


Figura 5. Caso I - Pérdidas totales en el sistema.

La figura 5 expresa las pérdidas totales del sistema en kW. Se registra un valor máximo de 3kW a las 9:40 horas pertenecientes al pico de demanda, las pérdidas totales representan el 5.2% del consumo en el horario mencionado. La figura 6 muestra la variación de tensión en la barra 32 para las tres fases, se presenta una caída de tensión máxima de 1.3% en la fase B. La desviación de tensión en las 55 barras se muestra en la figura 7, el desbalance del sistema permite apreciar una mayor cargabilidad en la fase B, la fase C presenta la menor variación de tensión, cercana a 2%.

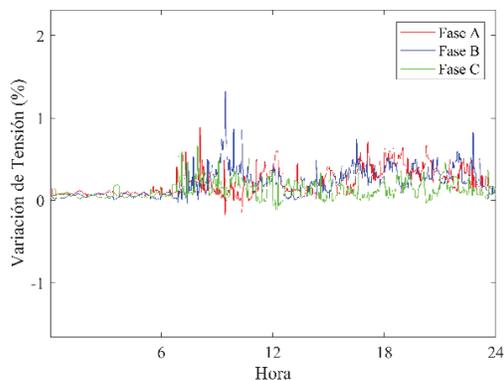


Figura 6. Caso I - Desviación de tensión barra 32.

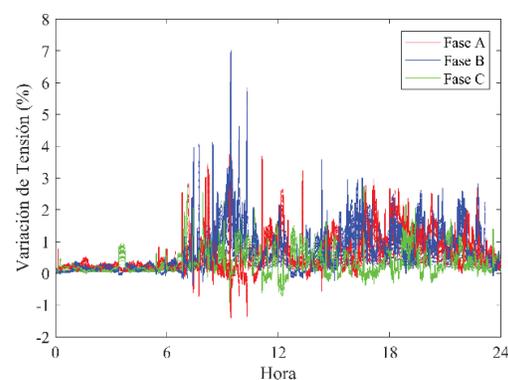


Figura 7. Caso I - Desviación de tensión en las 55 barras.

Caso II:

Para este caso se evalúa el nivel de incursión del 35% de los VEHE correspondiente al 2040 y el incremento de la demanda correspondiente. La figura 8 muestra la comparación de la nueva demanda considerando la incursión de VEHE e incremento de la demanda.

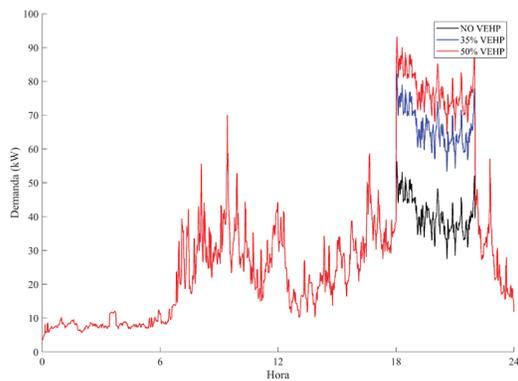


Figura 8. Caso II - Incremento del consumo energético con la incursión de VEHE.

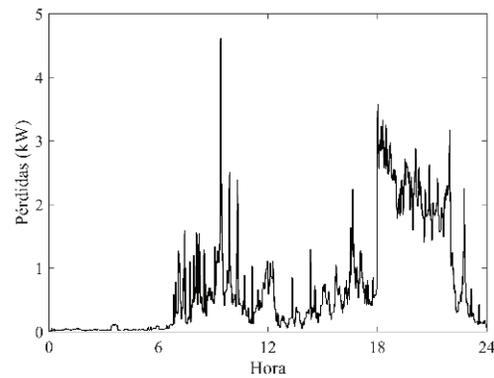


Figura 9. Caso II - Pérdidas totales en el sistema.

La máxima demanda es registrada a las 18:00 horas con 82 kW, en consecuencia, el $PAR=2.84$. La figura 9 muestra las pérdidas en función del tiempo durante las 24h, a consecuencia del incremento del consumo energético, las pérdidas se incrementaron en el horario de carga de los VEHE. Al realizar la comparación entre la figura 5 y figura 9, se determina que en el horario de inicio de carga del VEHE las pérdidas se incrementaron en 192%, a las 9.42am se registra el mayor pico de pérdidas (4.6 kW). Se eligió la barra 34 para mostrar los nuevos incrementos de la variación de tensión, la figura 10 muestra la variación de la tensión en la barra 34, se presenta un máximo de 1.8% en la fase B.

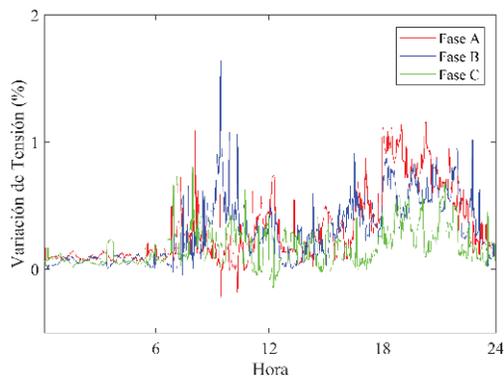


Figura 10. Caso II - Variación de tensión en la barra 34.

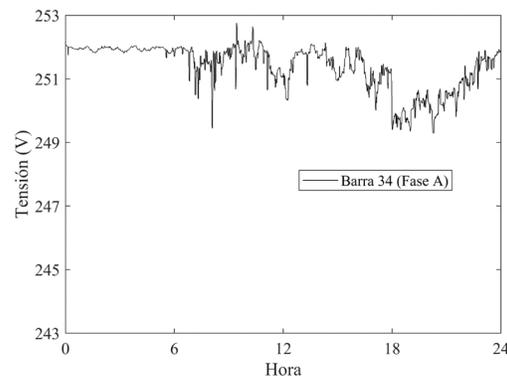


Figura 11. Caso II – Perfil de tensión en la barra 34.

La figura 11 muestra el nivel de tensión en la barra 34 (fase A), presentándose mayor desviación durante los periodos de carga del VEHE. En el horario de 18:00 – 23:00 horas se tiene la mayor disminución de la tensión debido al incremento del consumo de energía debido a la conexión de VEHE en la red de distribución. Se eligió la barra 906 (Carga 55), correspondiente a la barra más alejada desde el punto de transformación en 11/0.416 kV. La figura 12 muestra la variación de la tensión en la barra 906 correspondiente a las tres fases, al realiza la comparación con la figura 7, se concluye que el nivel de caída de tensión se duplica en las tres fases. La figura 13 muestra el perfil de la tensión en la barra 906, se presenta una disminución sustancial de la tensión en el horario de conexión de VEHE. Con los resultados obtenidos se concluye que es necesario la instalación de equipos de compensación y repotenciación de

la red de distribución. Los valores de caída de tensión están cercanos al 5%, este es el límite que establece el Código Nacional de Electricidad de USA (NEC) y el Código Nacional de Electricidad Peruano (CNEP) para zonas urbanas.

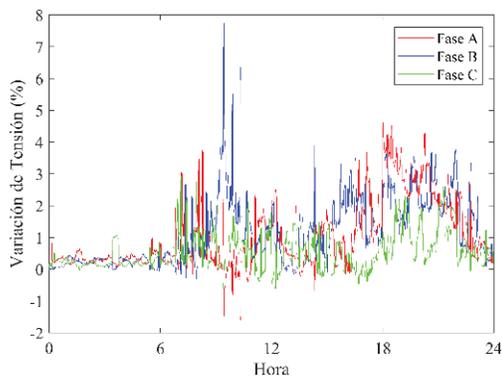


Figura 12. Caso II - Variación de tensión en la barra 906.

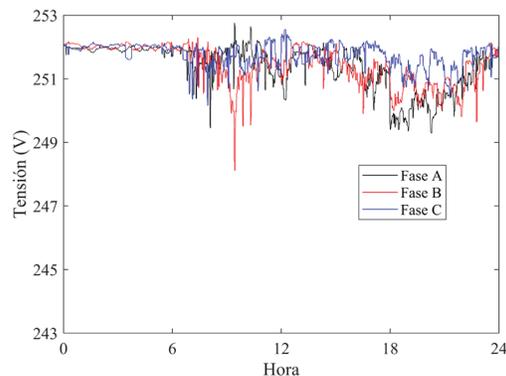


Figura 13. Caso II - Perfil de tensión en la barra 906.

Caso III:

Se analiza el nivel de incursión de VEHE en el año 2060 con incremento de hasta el 50% en el parque automotor, adicionalmente se considera el incremento anual de 1% hasta el 2060. La nueva demanda de energía se muestra en la figura 8. Para el incremento de demanda, las pérdidas también se incrementan, el pico máximo se presenta a las 18:00 horas (14 kW) según muestra la figura 14, en comparación con el caso base de la figura 5, representa un incremento de 11 veces las pérdidas eléctricas.

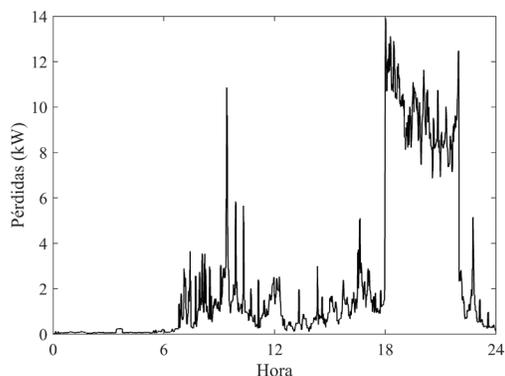


Figura 14. Caso III - Pérdidas totales en el sistema.

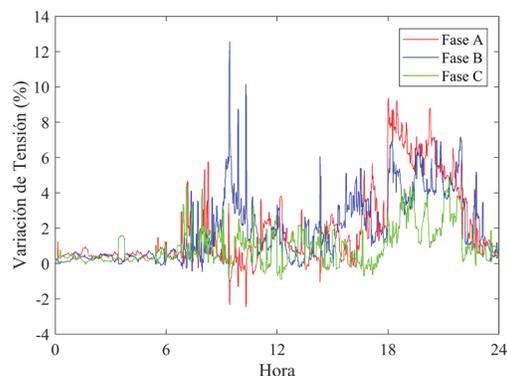


Figura 15. Caso III - Variación de tensión en la barra 906.

La figura 15 muestra la variación de tensión porcentual en la barra 906, a las 10:00 hora se registra la máxima variación con 12%, en el horario de carga de VEHE se visualiza una variación de 8% y 6% en las fases A y B respectivamente. Estos valores superan a los límites establecidos en el NEC y el CNEP, los valores hallados, confirman la necesidad de repotenciación de la red de distribución para no alterar la calidad de suministro eléctrico para los usuarios finales y la operación estable del sistema eléctrico.

Los valores nominales de la tensión en la barra 906 se muestran en la figura 16, en relación con la figura 15, los niveles de tensión disminuyen considerablemente en las tres fases durante el horario de conexión de VEHE.

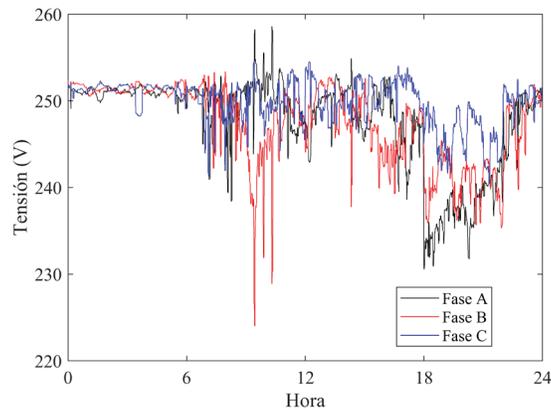


Figura 16. Caso III – Perfil de Tensión en la barra 906.

Conclusiones

Es importante señalar que la información utilizada en la simulación solo pertenece a la demanda registrada en 24 horas, para un análisis con mayor complejidad se podrá usar mayor cantidad de información. Respecto a la franja horaria donde se realiza la recarga, esta investigación considera que el consumo de energía de la batería es constante, en tanto para un análisis más realista podrá considerarse una curva de carga de un modelo matemático para la batería. Finalmente, el análisis realizado en los casos II y III representan el peor caso respecto al nivel de carga de batería, es decir la situación cuando el usuario agotó en su totalidad la capacidad de la batería, las personas llegan en simultaneo a sus hogares y la batería tiene un estado de carga prácticamente nulo.

En la presente investigación se analizó el comportamiento de la red de distribución eléctrica ante la incursión de vehículos eléctricos híbridos enchufables. En análisis considera el caso base sin VEHE, el caso con 35% y el caso con 50% de VEHE en el parque automotor. El incremento de la demanda eléctrica debido a esta nueva tecnología evidencia una mayor variación de tensión en las barras del sistema de distribución, los valores obtenidos superan al límite establecido por el Código Nacional de Electricidad Estadounidense y Peruano; las pérdidas también se incrementan, los resultados evidencian un incremento de más de 10 veces respecto al caso base ante una penetración de 50% de VEHE. La evaluación de diferentes niveles de incursión de VEHE y el análisis de indicadores como la variación de tensión y las pérdidas eléctricas, evidencia la necesidad de repotenciar las redes de distribución y la instalación de equipos de regulación de tensión con el objetivo de preservar la calidad de energía eléctrica suministrada a los usuarios en sus domicilios y preservar la operación estable del sistema eléctrico.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Nacional del Centro del Perú (UNCP) y a la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica por las facilidades financieras y técnicas para el desarrollo de la presente investigación.

Referencias

- [1] IRENA, "Electric vehicles: Technology brief," Abu Dhabi, 2017.
- [2] H. Fathabadi, "Novel solar powered electric vehicle charging station with the capability of vehicle-to-grid," *Sol. Energy*, vol. 142, pp. 136–143, 2017.
- [3] S. Shafiee, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Rastegar, "Investigating the impacts of plug-in hybrid electric vehicles on power distribution systems," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1351–1360, 2013.
- [4] M. Rastegar, M. Fotuhi-Firuzabad, and F. Aminifar, "Load commitment in a smart home," *Appl. Energy*, vol. 96, pp. 45–54, 2012.
- [5] Y. Kongjeen and K. Bhumkittipich, "Impact of plug-in electric vehicles integrated into power distribution system based on voltage-dependent power flow analysis," *Energies*, vol. 11, no. 6, p. 1571, 2018.
- [6] Z. Zhang and D. Gu, "Impacts of charging plug-in hybrid electric vehicles on the electric grid and its charging strategies," in *2012 Power Engineering and Automation Conference*, 2012, pp. 1–4.
- [7] M. D. Galus and G. Andersson, "Integration of plug-in hybrid electric vehicles into energy networks," in *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, 2009, pp. 1–8.
- [8] W. Su, J. Wang, K. Zhang, and M.-Y. Chow, "Framework for investigating the impact of PHEV charging on power distribution system and transportation network," in *IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2012, pp. 4735–4740.
- [9] U.S. Energy Information Administration, "Annual Energy Outlook 2020," Washington, 2020.
- [10] IEEE PES AMPS DSAS Test Feeder Working Group., "PES Test Feeder." [Online]. Available: <https://site.ieee.org/pes-testfeeders/>. [Accessed: 10-Jan-2020].
- [11] G. Dudgeon, "IEEE 906 Bus European LV Test Feeder in Simscape Power Systems." MATLAB Central File Exchange, 2018.
- [12] M. Kintner-Meyer, K. Schneider, and R. Pratt, "Impacts assessment of plug-in hybrid vehicles on electric utilities and regional US power grids, Part 1: Technical analysis," *Pacific Northwest Natl. Lab.*, vol. 1, pp. 1–20, 2007.
- [13] MathWorks., "Solver." [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/simulink/gui/solver.html> [Accessed: 10-Jan-2020].

Análisis de flujo de materiales de los residuos sólidos del distrito de Guápiles

Material flow analysis of solid waste in the district of Guápiles

Ariana Solís-Blandón¹, Lilliana Abarca-Guerrero²

Fecha de recepción: 9 de noviembre de 2020
Fecha de aprobación: 10 de marzo de 2021

Solís-Blandón, A; Abarca-Guerrero, L. Análisis de flujo de materiales de los residuos sólidos del distrito de Guápiles. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-4 Octubre-Diciembre 2021. Pág 63-74.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i4.5883>



- 1 Educadora Ambiental. Municipalidad de Pococí. Costa Rica. Correo electrónico: arianasolb@gmail.com
- 2 Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Química, docente e investigadora. Correo electrónico: labarca@tec.ac.cr

Palabras clave

Análisis de flujo de materiales; quemas; entierros; descargas ilegales; reciclaje; gestión de residuos sólidos.

Resumen

Ante la problemática latente en el manejo de residuos sólidos en el distrito de Guápiles, se plantea la utilización para el análisis de la situación de la herramienta denominada: “Análisis de Flujo de Materiales”, la cual es utilizada por primera vez en Costa Rica en el año 2018, año en que se realiza la presente investigación. Esta herramienta permite visualizar los flujos de los residuos sólidos dentro de un sistema para identificar los principales problemas existentes con base en la distribución de las masas de los materiales en los sitios de disposición final definidos por la población, así como los diversos actores sociales involucrados en el proceso. La metodología para la investigación fue la caracterización de residuos de ciento cuatro viviendas y cuarenta y nueve comercios, tomando como referencia la “Guía de interpretación de la metodología para la realización de estudios de generación y composición de residuos ordinarios” del programa CYMA del año 2012. Además, encuestas realizadas al sector residencial y comercial, entrevistas a gestores de residuos sólidos tanto de la municipalidad de Pococí como a empresas de acopio de materiales valorizables y recolectores privados. Finalmente, se recibieron y clasificaron materiales producto de las campañas de recuperación de residuos para el reciclaje.

De esta manera se pudo identificar la totalidad de los residuos sólidos destinados a quemas (283,80 ton/año), entierros de materia orgánica (1 204,89 ton/año), entierros de vidrio (4,71 ton/año), recuperación de residuos sólidos para el reciclaje, incluyendo los flujos menos comunes como la recuperación de residuos electrónicos y chatarra (2 115,35 ton/año) y las 7 408,04 ton/año destinadas al Relleno Sanitario Los Laureles, de las cuales 1 225,44 ton/año corresponden a descargas ilegales en el centro del distrito. Utilizando esta herramienta, es posible tomar decisiones basadas en el mejoramiento del sistema de gestión de residuos sólidos que es provisto en el distrito por los sectores: municipal, privado e informal, identificados en el proceso de recolección de datos.

Keywords

Material flow analysis; burning; burials; illegal discharges; recycling; solid waste management.

Abstract

Material Flow Analysis is a powerful tool, first time used in Costa Rica, to analyze the problems related to solid waste management in the district of Guápiles, in the province of Limón, Costa Rica. It is an analytical method to quantify flows and stocks of materials or substances in a well-defined system, allowing the visualization of solid waste and the actors involved in the process. The methodology used for the investigation was the characterization of residues of one hundred four houses and forty-nine shops, taking as reference the “Guide of interpretation of the methodology for the realization of studies of generation and composition of ordinary waste” of the CYMA program of the year 2012. In addition, surveys were conducted in the residential and commercial sector, as well as interviews with solid waste managers of the municipality of Pococí, and companies that collect recyclable materials and private collectors. Additionally, the analysis of materials received from the waste recovery campaigns for recycling. With this analysis, it was possible to identify the total amounts of solid waste being burned (283.80 tons / year), burials of organic matter (1 204.89 tons / year), glass burials (4.71 tons / year), recovery of solid waste for

recycling, including less common flows such as electronic waste and metal scrap (2 115.35 tons / year). Furthermore, it was found that 7 408,04 tons / year had gone to Los Laureles sanitary landfill, and 1 225,44 tons/ year of illegal dumping. It was concluded that this tool could be used when making decisions in relation to the improvement of solid waste management systems.

Introducción

El alto crecimiento poblacional, el auge económico, la urbanización y los cambiantes estándares de vida poblacionales han acelerado la generación de residuos sólidos en países en vías de desarrollo [1]. El servicio de su recolección es de gran importancia encontrándose por completo dentro de las responsabilidades del gobierno local, el cual debe gestionarse de manera adecuada y evitar así la atracción de insectos y roedores transmisores de enfermedades y generar lixiviados que contaminen suelos y cuerpos de agua [2].

Costa Rica, por su parte posee grandes retos para sus sistemas de gestión de residuos, siendo uno de ellos la dificultad de elaborar y actualizar datos sobre la cantidad, su composición y el manejo eficiente de ellos [3]. Esta limitación puede ser enfrentada mediante la utilización de una herramienta de gran utilidad denominada Análisis de Flujo de Materiales (AFM). Esta es una evaluación sistemática de los flujos y existencias de materiales dentro de un sistema definido en el espacio y el tiempo funcionando de apoyo en la toma de decisiones en la gestión de residuos. Conecta las fuentes de generación, los caminos y los sumideros intermedios y finales que puede tomar un material, en este caso, los residuos sólidos municipales. Mediante el equilibrio entre insumos y productos, los flujos de los residuos y cargas ambientales se hacen visibles y sus fuentes de generación pueden ser identificadas. Lo anterior es de gran relevancia debido a que, tanto la ubicación como la cantidad de materiales dentro de una ciudad deben ser conocidas de manera que se permita una fácil reutilización de los materiales y un control ambiental adecuado [4].

El objetivo de este artículo es presentar los resultados de una investigación que utilizó la herramienta de Análisis de Flujo de Materiales (AFM) para identificar la manera como fluyen los residuos sólidos y el destino final, en el distrito de Guápiles, provincia de Limón.

Marco teórico

Definición de residuos sólidos y sistemas de gestión

En Costa Rica, la Ley 8839 de Gestión Integral de Residuos, define “Residuo” como un material sólido, semisólido, líquido o gas, cuyo generador o poseedor debe o requiere deshacerse de él, y que puede o debe ser valorizado o tratado responsablemente o, en su defecto, ser manejado por sistemas de disposición final adecuados [5]. Por lo tanto, para la presente investigación se utilizará esta definición.

En Costa Rica, para el año 2014 se generaron aproximadamente 4000 toneladas de residuos, en promedio 1,1 kg por persona por día en cantones urbanos siendo la cobertura media de recolección de un 75%, y menos de un 50% en zonas rurales. Las zonas rurales han mostrado una tendencia a la disminución de hogares que entierran los residuos, pasando del 14,7% en el año 2009 al 10,21% en 2015, y un aumento en los hogares que queman los residuos, pasando del 20,9% al 29,7% en el mismo período [6].

De acuerdo con el Plan Municipal para la Gestión Integral de los Residuos del Cantón de Pococí (2017-2022), distrito donde se encuentra el objeto de este estudio, el servicio municipal de recolección de residuos sólidos es ejecutado y administrado, en su mayoría, por su respectiva municipalidad. Tales residuos son transportados hacia un relleno sanitario llamado Los

Laureles, operado por la empresa privada Corporación Tecnología Magallanes (CTM) ubicado en distrito de Cariari. A este sitio llegan aproximadamente 150 toneladas/día de residuos, las cuales incluyen residuos sólidos provenientes de la recolección municipal, recolección privada y la entrega directa de empresas [7].

A su vez el Plan indica que el servicio de recolección de residuos ordinarios actualmente se brinda a menos de un 50% de la población del cantón, por lo que surge la presencia de recolectores informales que realizan la labor en los lugares sin servicio. No obstante, existen dos sectores a los que se brinda un servicio más especializado, los cuales son el distrito de Guápiles, pues es la zona comercial más importante del Cantón, y el distrito Cariari. Según el Plan Municipal Para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos del Cantón de Pococí, para ambos casos la frecuencia de recolección de residuos es mayor.

Análisis de Flujo de Materiales

El AFM es una herramienta de modelación que permite desarrollar un panorama de cómo fluyen los materiales en un determinado lugar, en una especie de análisis de entrada-salida de residuos sólidos, rastreando los materiales desde sus fuentes hasta su disposición final [8]. De este modo, se pueden identificar los puntos más estratégicos que intervienen en esos flujos. Cuando el AFM se conduce de una manera correcta, el resultado representa los flujos, productos resultantes y emisiones, así como la pérdida y los escapes de materiales de desecho, de una manera visualmente clara y transparente. La herramienta es de gran utilidad en la formulación de estrategias que optimizan la totalidad de la ejecución de un sistema de manejo de residuos sólidos orientado al alcance de objetivos [9].

Además, el AFM puede ser aplicado para analizar el flujo de los recursos y evaluar el impacto en los cambios en los patrones de consumo poblacionales y también servir como una fuente de información de gran utilidad, que brinda ayuda a los planificadores para la toma de decisiones que optimicen el manejo de recursos en un sistema de saneamiento ambiental [10]. La figura 1 permite visualizar específicamente un ejemplo de un diagrama o sistema de análisis de flujo de materiales.

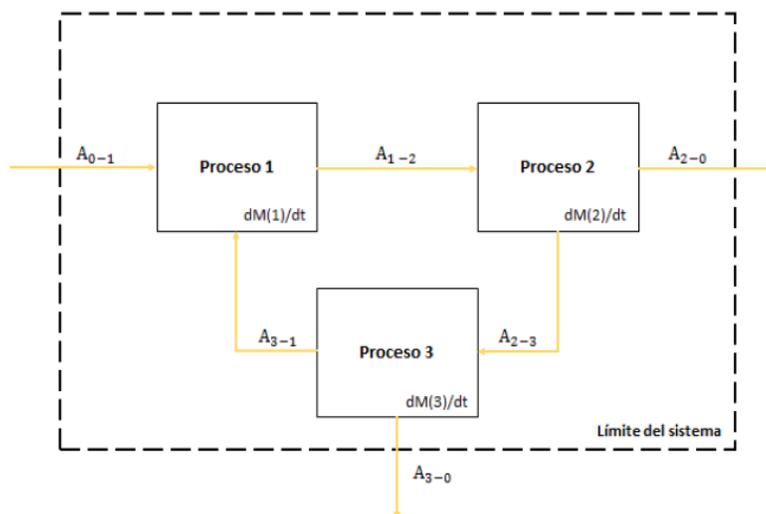


Figura 1. Sistema de Análisis de Flujo de Materiales (AFM) [10].

Metodología de la investigación

La presente investigación fue realizada en el distrito de Guápiles, localizado en el cantón de Pococí, provincia de Limón. Posee aproximadamente 36 469 habitantes y 10 787 viviendas ocupadas al año 2011 [11]. La figura 2 ilustra la ubicación del distrito:

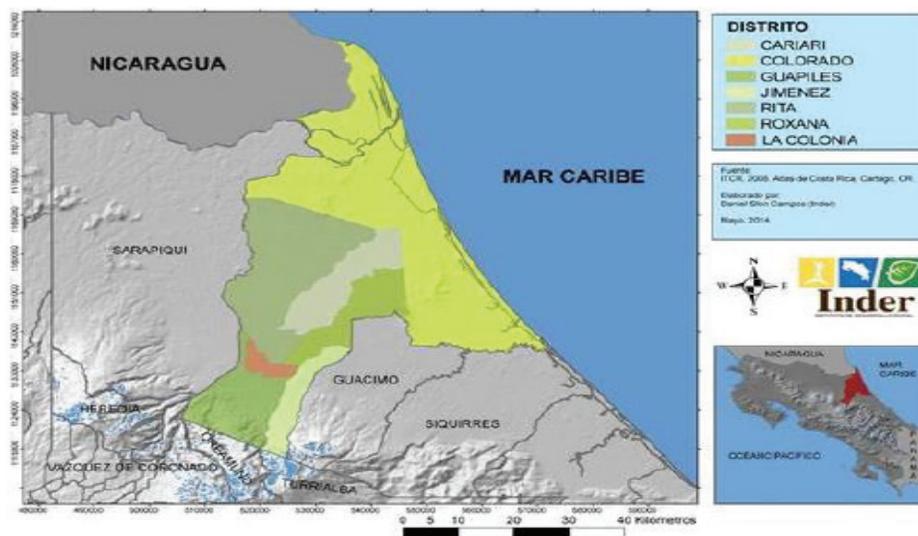


Figura 2. Ubicación del territorio de Pococí y sus respectivos distritos [12].

El estudio recolectó información por medio de varias fuentes:

1. Se realizó un estudio de caracterización de residuos sólidos del sector residencial con una muestra de 104 viviendas del distrito, para lo cual se tomó como referencia la “Guía de interpretación de la metodología para la realización de estudios de generación y composición de residuos ordinarios” del programa CYMA del año 2012 [13]. En cada vecindario se calculó el número de viviendas a muestrear y fueron seleccionadas de manera aleatoria. El análisis de los residuos se realizó en el Plantel Municipal de la Municipalidad de Pococí, en un espacio techado determinado el peso diario en una báscula digital.
2. Se efectuó la caracterización de residuos sólidos del sector comercial tomando una muestra de 49 comercios a los cuales se les recolectaron los residuos sólidos diariamente durante una semana.
3. Se aplicaron encuestas al sector residencial y comercial donde, mediante el uso de la fórmula que se presenta, se obtuvieron los valores de 608 viviendas y 301 comercios a encuestar:

$$n = \frac{Z^2 * (p * q)}{e^2 + \left(\frac{Z^2 * (p * q)}{N} \right)}$$

En donde:

n = tamaño de la muestra a calcular

N = tamaño de la población

Z = desviación del valor medio aceptado según el nivel de confianza deseado = 2,575

e = margen de error = 5%

p = proporción de la población con la característica deseada (éxito) = 0,5 cuando no se tiene información de lo esperado

q = proporción de la población sin la característica deseada (fracaso) = 0,5 cuando no se tiene información de lo esperado.

La encuesta al sector residencial contenía preguntas relacionadas con ubicación de vivienda, número de habitantes, tipo de servicio de recolección recibido, percepción del mismo, prácticas realizadas dentro de la vivienda tales como: entierro de materiales orgánicos e inorgánicos, quemas, descargas a cuerpos de agua, lotes baldíos, separación para el reciclaje, tipo de materiales separados o en su defecto, razones por las cuales no se realiza una separación de residuos en tales viviendas. Por otro lado, al sector comercial se le preguntaron los mismos aspectos que al sector residencial, donde se incluyeron además preguntas sobre el servicio de los recolectores informales.

4. Se realizaron entrevistas a gestores de residuos sólidos con el objetivo, entre otros, de determinar prácticas de reciclaje y otras conocidas por ellos y ellas. Las preguntas versaban sobre temas relacionados con datos generales del entrevistado y de la empresa/institución a la cual pertenece, acuerdo de confidencialidad, número de viviendas y comercios que se benefician con este tipo de recolección, así como información de cantidades estimadas, rutas o procesos por los que pasan los residuos sólidos una vez recolectados por estos gestores, conocimiento de otros gestores autorizados o informales que realicen funciones similares. Los gestores entrevistados fueron: la Municipalidad de Pococí, gestor de residuos privado y anónimo, Phoenix Reciclaje de Costa Rica, Plataforma Internacional Real, Recicladora la Esquina, Reciplanet, una estación de recepción de residuos valorizables, Hogar Betel, Reciclo Metálico Pococí y a don José Joaquín Rivera López, recolector informal. Además, se obtuvieron datos de todos los pesos de residuos sólidos que llegaron al sitio de disposición final ese año, según los recorridos específicos que cada uno de ellos realizó. Esta información fue brindada por la Corporación Tecnológico Magallanes S.A., empresa propietaria del Relleno Sanitario Los Laureles a través de la Municipalidad de Pococí.
5. La investigadora participó activamente en las campañas de recuperación de residuos para el reciclaje. Se trabajó en la recepción y clasificación de materiales en las campañas realizadas en la Casa de la Cultura ubicada en el distrito de Guápiles, en conjunto con instituciones como la Municipalidad de Pococí, Universidad Nacional Estatal a Distancia (UNED), Cruz Roja (comité auxiliar de Guápiles), Universidad de Costa Rica y el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA). Se llevó un registro de 8 meses de los residuos recolectados en colaboración con el centro de acopio Reciplanet HCH, quienes, al momento de esta investigación, recolectan y pesan los residuos clasificados mes a mes.

Resultados y discusión

Composición sector residencial y comercial

El estudio de composición en el sector residencial, dio como resultado (ver figura 3) que la fracción orgánica o biodegradable es la mayoritaria (alrededor del 58%) seguida por residuos sanitarios (16%) y materiales plásticos (12%).

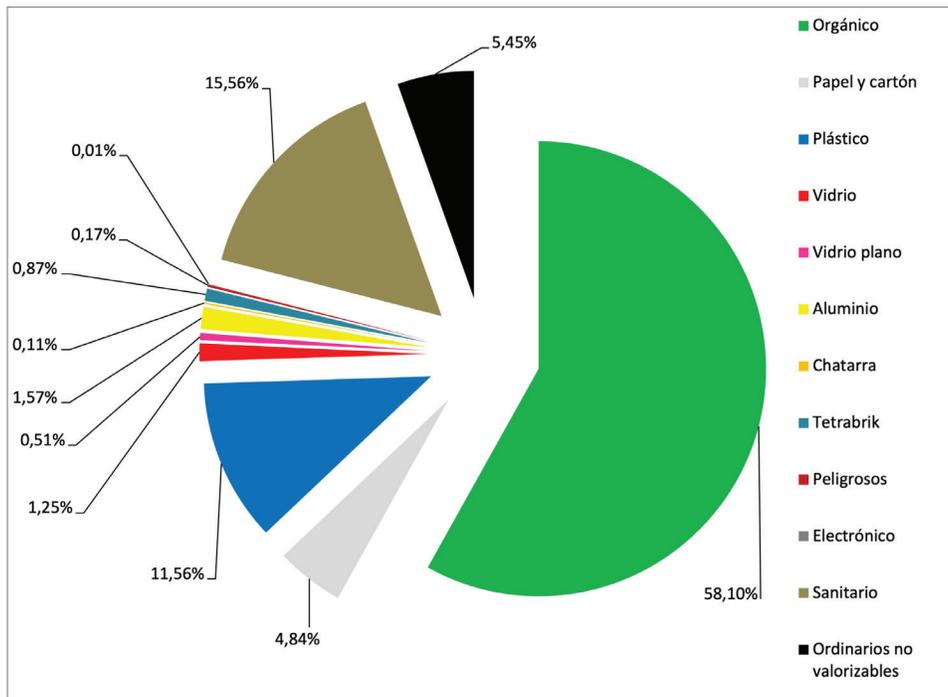


Figura 3. Composición porcentual de residuos sólidos urbanos.

Se realizaron mediciones de generación de residuos a 49 comercios de diversas actividades económicas y se obtuvo un promedio de generación de 7,21 kg/comercio-día. Ese análisis permitió determinar que la composición de los residuos corresponde también a lo orgánico o biodegradable seguido por papel-cartón (34%), como se muestra en la figura 4.

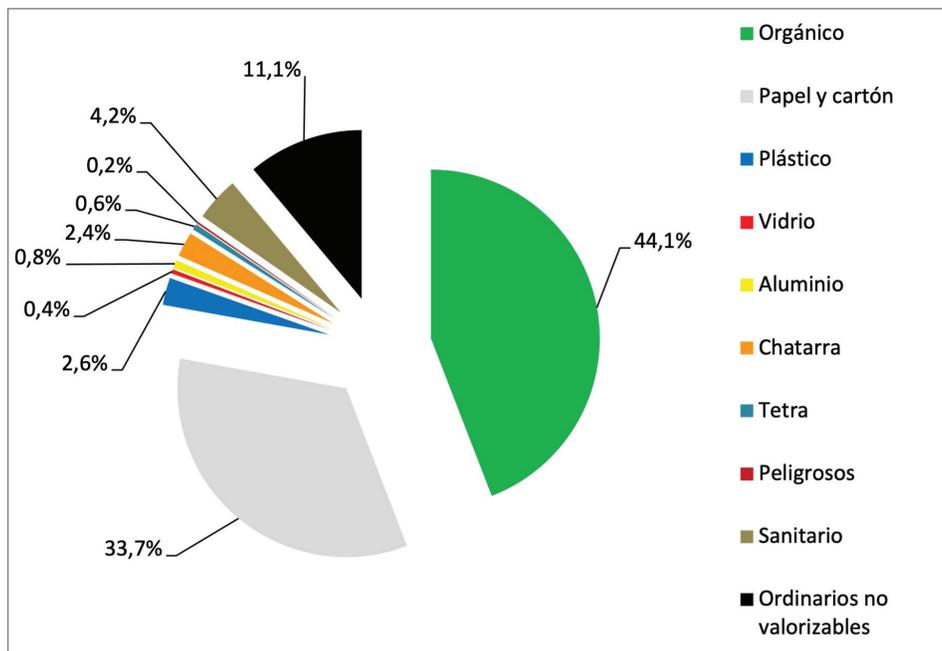


Figura 4. Composición porcentual de residuos sólidos del sector comercial.

Recolección y destino final de los residuos sólidos

Los residuos del cantón son recolectados tanto por la Municipalidad como por recolectores informales, siendo algunos de ellos apoyados económicamente por la municipalidad, en el pago de un porcentaje del costo de la disposición en el relleno sanitario. Adicionalmente, debido a que este servicio no abarca la totalidad de la población, las personas se ven obligadas a realizar prácticas tales como: quemas de residuos, entierros de materiales como vidrios, pañales, residuos sanitarios y también transporte de sus residuos a sitios a los cuales la recolección municipal tiene acceso o bien en sitios ilegales. De acuerdo con Karija *et al.* [14] la tendencia a proveer el servicio de recolección a los centros de mayor población provoca que las áreas residenciales de bajos ingresos queden descuidadas, lo cual fomenta la eliminación inadecuada de los residuos generando focos importantes de contaminación y problemas a la salud humana y al ambiente. Un sistema de recolección insuficiente (como el existente en esta comunidad), promueve acciones tales como las que se mencionaron anteriormente. Tales prácticas, ocurren frecuentemente en poblaciones de países en vías de desarrollo [15].

Se determinó, además, que las acciones de recolección de materiales valorizables para el reciclaje es predominante informal. En el estudio realizado por Vassanadumrongdee & Kittipongvises [16] en la ciudad de Bangkok, Tailandia, se indica que, debido a la falta de interés político de invertir en facilidades para el reciclaje, el sector informal es quien lleva a cabo mayoritariamente estos programas, esto debido a su flexibilidad y adaptabilidad [17].

Durante el estudio se analizaron las razones por las cuales la población no separa sus residuos y las respuestas estuvieron alrededor de los siguientes temas:

- No estoy seguro (a) de cómo se hace (no sé qué materiales se separan ni cómo se separan).
- Pereza/desinterés/falta de tiempo.
- No tengo espacio en mi casa para almacenar los materiales.
- No sé a quién entregarle mis materiales.
- La persona encargada de recolectar el material no pasa con frecuencia por mi vivienda.
- En mi barrio no se ofrece este servicio.

Según Thomas & Sharp [18], si bien las tareas de reciclaje pueden considerarse como domésticas, requieren un mínimo esfuerzo y se hacen por hábito. Sin embargo; para comenzar a separar los residuos y acondicionarlos, y que esto se convierta en parte de las tareas cotidianas, se requiere una fuerte motivación interna. Según los mismos autores, otro aspecto es que a medida que las prácticas relacionadas con el reciclaje se suman a las rutinas domésticas normales, se puede aumentar la carga doméstica, lo que también puede convertirse en una barrera para muchos hogares. También se puede tener la costumbre de no recuperar para el reciclaje y se ha demostrado que las personas con hábitos fuertes aceptan muy poca información nueva y, por consiguiente, su comportamiento no se ve fácilmente influenciado para alentarlos a cambiar.

Por otro lado, el sector comercial, a través del 49% de los que respondieron, indicaron que con frecuencia realiza la separación de sus residuos para su posterior reciclaje, contrario a 39% que revelaron que nunca lo hacen. Los materiales separados son principalmente y en orden de importancia cartón, plástico y papel.

La municipalidad realiza frecuentemente campañas de recuperación para el reciclaje. Los residuos electrónicos representan un alto porcentaje de lo recolectado mensualmente y llevados al Centro de Transferencia y Transformación de Materiales (CTTM), ubicado en Cartago y los

materiales restantes son gestionados por Reciplanet HCH, ubicado en el cantón de Guácimo, al momento de la presente investigación. Durante esta investigación se determinó que el 52% de estos residuos corresponde a material electrónico, y el restante corresponde a materiales como plástico, tetrabrik, entre otros.

Análisis de flujo de materiales

Para determinar los flujos de los materiales se realizaron cálculos utilizando los resultados de las encuestas, el estudio de composición de los residuos del sector comercial realizado en este trabajo y un estudio encontrado en literatura de composición de residuos del sector residencial [19]. Por consiguiente, se efectuaron los cálculos del sector residencial (considerando las tres diferentes comunidades encuestadas) y el sector comercial. Así mismo, se analizó el flujo de los residuos para cada gestor de residuos entrevistado, corroborando la información brindada en las entrevistas y considerando además, el aporte de las campañas de recuperación de residuos para el reciclaje. De acuerdo con el mismo trabajo la generación común en viviendas con estrato socioeconómico bajo es de aproximadamente 0,44 kg/hab.día y para el estrato socioeconómico medio es de 0,61 kg/hab.día. El resultado de los cálculos para el sector residencial se muestra en el cuadro 1 y los del sector comercial en el cuadro 2. Además el AFM para el distrito de Guápiles se muestra en la figura 5 donde se muestran los distintos flujos de residuos y su destino final.

Cuadro 1. Flujo de residuos sólidos del sector residencial para el año 2018.

Comunidad	Residuos totales generados (ton/año)	Residuos recuperados para el reciclaje (ton/año)	Residuos orgánicos esparcidos/enterrados en jardín (ton/año)	Residuos quemados (ton/año)	Vidrio enterrado (ton/año)	Residuos abandonados en el centro de Guápiles (ton/año)	Disposición final (ton/año)
Centro de Guápiles (recolección municipal)	3 906,17	311	807,80	59,70	2,73	N.A.	3 950,51
Sitios con recolección del Informal 1	1 268	78,06	271,15	103,11	1,05	N.A.	814,63
Bella Vista (recolección del informal X)	395	28,53	125,94	121,12	0,93	85,16	33,32
Total	5 569,17	417,59	1 204,89	283,80	4,71	85,16	4 798,46

N.A. = No aplica

Cuadro 2. Flujo de residuos sólidos del sector comercial para el año 2018.

Servicio de recolección	Residuos totales generados (ton/año)	Residuos recuperados para el reciclaje (ton/año)	Disposición final (ton/año)
Municipal	3 124	654,46	2 469,54
Informal 1	285,47	145,43	140,04

Existen además en la comunidad campañas de recuperación de residuos para el reciclaje. En la figura 5 se resume el movimiento o flujo de los materiales. En este se incluyen de manera separada la chatarra que incluye materiales como el zinc, hierro, carrocería, entre otros y los residuos electrónicos que contienen impresoras, monitores, procesadores, discos duro, teclados, entre otros materiales.

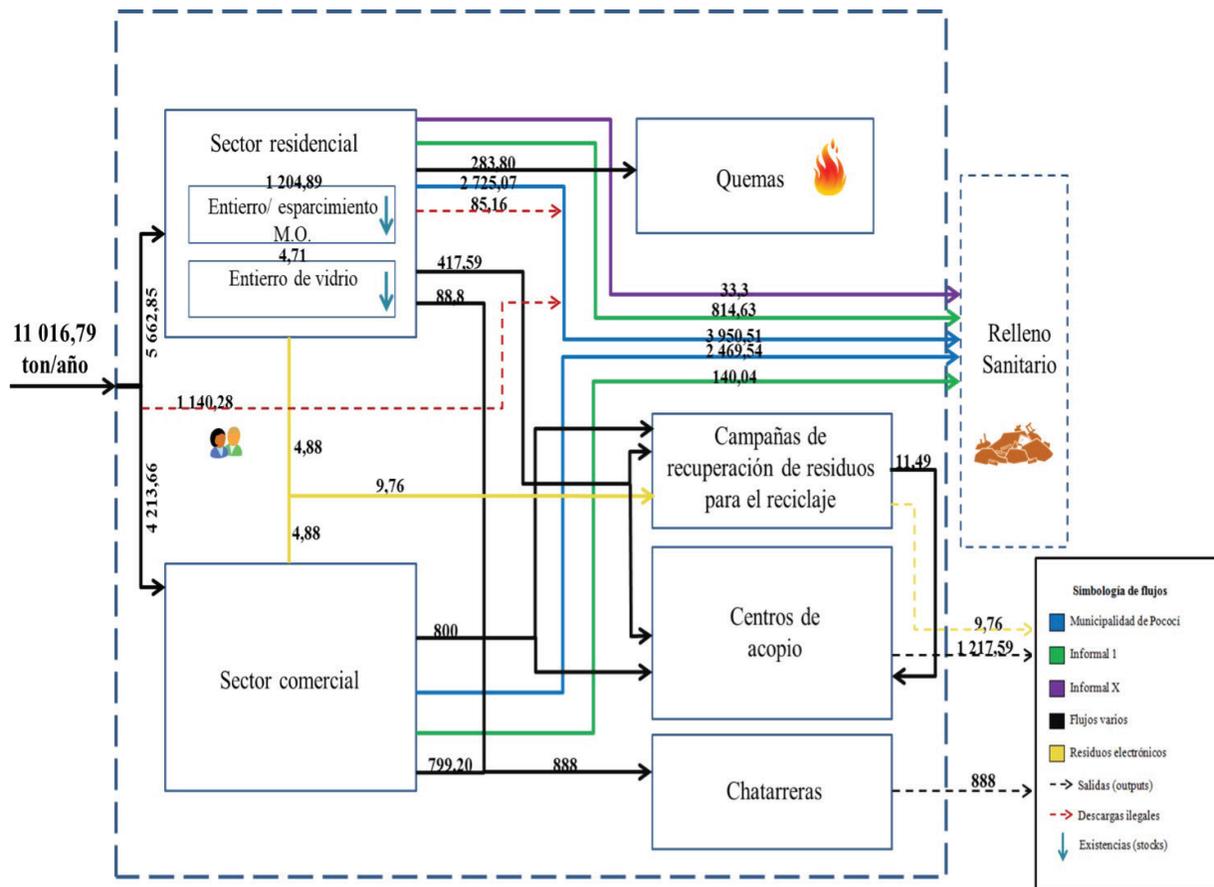


Figura 5. Flujo de Materiales del sector residencial y comercial del distrito de Guápiles para el año 2018.

Conclusiones

Los resultados del estudio de caracterización de residuos del sector domiciliario dieron como resultado, en términos generales, una composición de un 58% de material orgánico, 22% de residuos ordinarios, 0,2% de residuos electrónicos y un 20% de material valorizable, mientras que el sector comercial (supermercado) 67% de material orgánico, un 24% de material valorizable y un 8% de residuos ordinarios y el resto de comercios en general 44% de residuos orgánicos, un 40% de material valorizable y un 13% de residuos ordinarios. Con base en el estudio de este sector se obtuvo una generación aproximada de 7,21 kg de residuos sólidos diarios por comercio y 0,85 kg de residuos sólidos diarios por habitante.

La falta de divulgación de los gestores de residuos sólidos valorizables, la no identificación de las unidades utilizadas en la recolección, la inexistente divulgación de las campañas de recuperación de residuos para el reciclaje y la poca educación y concientización ambiental a la población, son algunos de los aspectos que afectan la recuperación de residuos sólidos para el reciclaje en comunidades y comercios. Tal como lo explican Thomas & Sharp [18], la falta de

información es una de las razones por las cuales las personas no realizan la separación para el reciclaje. Pese a la cercanía de un punto recolección en el centro de Guápiles, las campañas de recuperación mensuales y la existencia de gestores en barrios, muchos de los vecinos afirmaban no saber dónde disponer los materiales valorizables.

Si se logran cumplir los lineamientos propuestos en el PMGIR (2017-2022) de Pococí [7] en su Programa de Educación Ambiental Municipal, los cuales incluyen la creación de una guía para la educación y divulgación ambiental y lograr un proceso de enseñanza a través de la educación formal e informal, se podría fortalecer en una mayor medida, la educación ambiental en los diversos sectores generadores de residuos. Si se fortalece la separación de los residuos en cada vivienda y comercio las ganancias económicas anuales por la venta de material valorizable en todo el distrito serían mayores siempre y cuando existan mercados para todos los materiales.

Los sitios de disposición final identificados en todo el distrito por la herramienta de AFM son: el entierro o esparcimiento de residuos orgánicos (1 204,89 ton/año), el entierro de materiales inorgánicos principalmente como el vidrio (4,71 ton/año), la quema de residuos sólidos (283,80 ton/año), la recuperación de residuos sólidos para el reciclaje a través de las campañas existentes o la recolección del sector municipal, privado e informal (2 115,35 ton/año) y la disposición final al relleno sanitario por el sector municipal e informal de 7 408,04 ton/año, de las cuales 1 225,44 ton/año corresponden a descargas ilegales al centro de Guápiles.

La herramienta de AFM, permite visualizar las diversas problemáticas en el manejo de residuos sólidos del distrito, a través de un diagrama de fácil comprensión para personal municipal, o de sectores privado e informal.

Un AFM requiere de información detallada de prácticas comunes de manejo de residuos sólidos de parte de la población en general. En el proceso de análisis, se debe tratar de abarcar la mayor cantidad de actores sociales para obtener datos precisos, el acceso a bases de datos actualizadas ya sea de gestores, cantidades de residuos y censos poblacionales que permitan a su vez, corroborar los resultados obtenidos. En la presente investigación tuvo que realizarse un censo poblacional en campo debido a que el Departamento de Catastro Municipal no contaba con uno para realizar estas aproximaciones.

Las barreras asociadas a una disposición final adecuada de los residuos sólidos ordinarios de Guápiles, se basan en el desconocimiento de parte de los vecinos de las comunidades sobre la disposición correcta del vidrio, ya sea plano o vidrio reciclable, desconocimiento de la existencia del servicio en comunidades alejadas y la existencia de un único recolector informal en el caso de la comunidad de Bella Vista.

Un alto porcentaje de vecinos y comerciantes encuestados manifestó interés y disposición de aprender más acerca de la correcta separación de los residuos sólidos valorizables, de educarse a nivel general en temática ambiental y aprender sobre el PMGIR y el Reglamento para el manejo Integral de Residuos Sólidos del Cantón de Pococí.

La población del distrito de Guápiles desconoce la labor realizada por la Municipalidad de Pococí en el pago de la disposición final de residuos, tanto de los residuos recolectados por unidades municipales como de seis gestores más de residuos incluidos informales y una cooperativa. El desconocer que la Municipalidad ejerce su obligación en este sentido provoca un descontento poblacional en sitios con recolección informal debido a que se consideran como sitios excluidos.

Referencias

- [1] L. Abarca-Guerrero, G. Maas, and W. Hogland, "Desafíos en la gestión de residuos sólidos para las ciudades de países en desarrollo Solid waste management challenges for cities in developing countries."
- [2] P. B.-T. Daniel Hoornweeg, "What a waste: A Global Review of Solid Waste Management," *J. Med. Soc. Toho Univ.*, vol. 58, no. 3, p. 209, 2011.
- [3] D. Ben-Haddej, A. Buchenan, A. Owen, and G. Shakan, "2010-2011 Managing Costa Rica's Waste Recommendations for a Municipal Solid Waste Management Plan," 2010.
- [4] P. HBrunner and H. Rechberger, "Practical Handbook of Material Flow Analysis."
- [5] "Ley para la Gestión Integral de Residuos."
- [6] D. De, F. Operativa, and Y. Evaluativa, "División de Fiscalización Operativa y Evaluativa Área de Fiscalización de Servicio para Desarrollo Local," 2016.
- [7] M. Del, C. Pococí, S. Del, and C. Pococí, "Reglamento para la gestión integral de residuos sólidos de la Municipalidad de Pococí," pp. 1–34, 2019.
- [8] C. Zurbrügg and F. D. I. Ingegneria, *Assessment methods for waste management decision-support in developing countries*.
- [9] L. S. dos Muchangos, A. Tokai, and A. Hanashima, "Application of material flow analysis to municipal solid waste in Maputo City, Mozambique," *Waste Manag. Res.*, vol. 35, no. 3, pp. 253–266, 2017.
- [10] "Material Flow Analysis for Environmental Sanitation Planning in Developing Countries."
- [11] INEC. (Instituto Nacional de Estadística y Censo). 2011. Indicadores demográficos, sociales según provincia, cantón y distrito. Accesado junio, 2019. [En línea]. Disponible en: http://www.inec.go.cr/censos/censos-2011?keys=&at=632&prd=All&field_anio_documento_value%5Bvalue%5D%5Bdate%5D=2011
- [12] Inder. (Instituto de Desarrollo Rural). Accesado junio, 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.inder.go.cr/territorios_inder/index.aspx
- [13] CYMA, "Guía de interpretación de la metodología para la realización de estudios de generación y composición de residuos ordinarios Guía de interpretación de la metodología para la realización de estudios de generación y composición de residuos ordinarios." 2012.
- [14] Y. S. L. Martin Kajokare Karija, QI Shihua, "The Impact of Poor Municipal Solid Waste Management Practices and Sanitation Status on Water Quality and Public Health in Cities of the Least Developed Countries: the Case of Juba, South Sudan," *Int. J. Appl. Sci. Technol.*, vol. 3, 2013.
- [15] M. Bobeck, "Organic Household Waste in Developing Countries An overview of environmental and health consequences, and appropriate decentralised technologies and strategies for sustainable management," no. June, 2010.
- [16] S. Vassanadumrongdee and S. Kittipongvises, "Factors influencing source separation intention and willingness to pay for improving waste management in Bangkok, Thailand," *Sustain. Environ. Res.*, vol. 28, no. 2, pp. 90–99, 2018
- [17] P. Gerdes and E. Gunsilius, "The Waste Experts: Enabling Conditions for Informal Sector Integration in Solid Waste Management," p. 32, 2010.
- [18] C. Thomas and V. Sharp, "Understanding the normalisation of recycling behaviour and its implications for other pro-environmental behaviours: A review of social norms and recycling," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 79, pp. 11–20, 2013.
- [19] R. Campos-Rodríguez and S. Soto-Córdoba, "Estudio de generación y composición de residuos sólidos en el cantón de Guácimo, Costa Rica," *Rev. Tecnol. en Marcha*, vol. 27, no. 3, p. 122, 2014.

Pepino (*Cucumis sativus* L.) cultivado en ambiente protegido: correlaciones entre variables

Cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown under greenhouse conditions: correlations among variables

José Aníbal Cruz-Coronado¹, José Eladio Monge-Pérez²,
Michelle Loría-Coto³

Fecha de recepción: 31 de agosto de 2020
Fecha de aprobación: 25 de noviembre de 2020

Cruz-Coronado, J.A; Monge-Pérez, J.E; Loría-Coto, M.
Pepino (*cucumis sativus* L.) cultivado en ambiente protegido:
correlaciones entre variables. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-
4 Octubre-Diciembre 2021. Pág 75-91.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i4.5334>



- 1 Licenciado en Agronomía, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: cruzsanibal@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-8290-3443>
- 2 Máster en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales, Investigador de Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: melonescr@yahoo.com.mx
 <https://orcid.org/0000-0002-5384-507X>
- 3 Máster en Administración Educativa, Investigadora de Escuela de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica. Correo electrónico: michelle_loria@yahoo.com
 <https://orcid.org/0000-0003-0456-2230>

Palabras clave

Correlaciones de *Pearson*; regresión lineal; producción; agricultura protegida.

Resumen

Se calcularon las correlaciones de *Pearson* para 13 híbridos de pepino cultivados bajo ambiente protegido en temporada lluviosa, usando siete características: longitud, diámetro y peso del fruto, número de frutos por planta, rendimiento total y comercial, y porcentaje de sólidos solubles totales. Se obtuvieron ocho correlaciones (evaluadas en los 13 híbridos) que fueron altas ($r \geq 0,66$) y con significancia estadística ($p \leq 0,05$), en cuyo caso se obtuvo la regresión lineal: longitud y peso del fruto ($r=0,99$); longitud del fruto y número de frutos por planta ($r=-0,79$); peso del fruto y número de frutos por planta ($r=-0,72$); diámetro del fruto y número de frutos por planta ($r=-0,79$); diámetro del fruto y rendimiento total ($r=-0,75$); diámetro del fruto y rendimiento comercial ($r=-0,84$); número de frutos por planta y rendimiento comercial ($r=0,76$); y rendimiento total y comercial ($r=0,95$). También se hallaron otras once correlaciones altas y con significancia estadística, de acuerdo al tipo de pepino (largo, mediano o pequeño). Se concluye que el tipo de pepino ejerce un efecto importante sobre el resultado de las correlaciones.

Keywords

Pearson correlations; linear regression; production; protected agriculture.

Abstract

For 13 cucumber hybrids grown under greenhouse conditions during rainy season the researchers estimated *Pearson* correlations among seven characteristics: fruit length, fruit width, fruit weight, number of fruits per plant, total and commercial yield, and percentage of total soluble solids. Among the 13 evaluated hybrids there were eight correlations that were high ($r \geq 0,66$) and statistically significant ($p \leq 0,05$). In those cases the linear regression statistics were calculated: fruit length and weight ($r=0,99$); fruit length and number of fruits per plant ($r=-0,79$); fruit weight and number of fruits per plant ($r=-0,72$); fruit width and number of fruits per plant ($r=-0,79$); fruit width and total yield ($r=-0,75$); fruit width and commercial yield ($r=-0,84$); number of fruits per plant and commercial yield ($r=0,76$); and total and commercial yield ($r=0,95$). Statistically significant correlations were also obtained in eleven additional cases, not across all hybrids but estimated according to the cucumber type (long, medium or small). It is concluded that the type of cucumber has an important effect in the correlation results.

Introducción

El pepino (*Cucumis sativus* L.) es una planta de la familia Cucurbitaceae que se cultiva ampliamente en muchas regiones tropicales y subtropicales del mundo [1]. Existen muchos tipos de cultivares, que se distinguen por sus diferencias en forma del fruto, coloración, tamaño, tipo de cáscara, entre otras características [2]. Una de las principales clasificaciones se da a partir de la longitud del fruto, por lo que los cultivares se consideran como largos (30-36 cm), medianos (18-23 cm) o pequeños (8-13 cm) [3] [2].

El estudio de la asociación entre caracteres es el objetivo principal del análisis de correlación, técnica que mide el grado de asociación entre rasgos cuantitativos [4]. La determinación de la correlación entre caracteres de plantas es importante en la selección y el mejoramiento

genético [5]. Los estudios de correlación ayudan a decidir cuál característica contribuye con el rendimiento de manera positiva o negativa [6] [7] [8] [9]. Una correlación significativa y positiva entre dos caracteres sugiere que ambos pueden ser mejorados de forma simultánea en un programa de selección [10].

Se han llevado a cabo varias investigaciones sobre correlaciones entre características en el cultivo de pepino en diversos países [11] [12] [5] [10] [1] [13] [7] [4] [14] [9] [6] [15] [8], así como también en Costa Rica [16], aunque en esa ocasión el estudio se llevó a cabo durante la temporada seca.

El objetivo de este trabajo fue calcular las correlaciones de Pearson entre siete variables cuantitativas, para 13 híbridos de pepino cultivados bajo ambiente protegido durante la temporada lluviosa, en Alajuela, Costa Rica.

Materiales y métodos

Se cultivaron 13 híbridos de pepino (*Cucumis sativus* L.) partenocárpico (cuadro 1), en condiciones hidropónicas, en un invernadero de la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno (EEAFBM), situada en Barrio San José de Alajuela, Costa Rica, a una altitud de 883 msnm.

Cuadro 1. Híbridos de pepino utilizados en el ensayo.

Tipo de pepino	Híbrido	País de origen
Largo (n=4)	Arioso	Taiwan
	Cumlaude	Holanda
	Kalunga	Holanda
	Paisaje	Holanda
Mediano (n=7)	Corinto	Holanda
	Katrina	Holanda
	Macario	Holanda
	Modan	Holanda
	Paraíso	Holanda
	Primavera	Holanda
Pequeño (n=2)	22-20-782	Estados Unidos
	Larino	Holanda
	22-20-781	Estados Unidos

Las plántulas se trasplantaron el 15 de julio de 2015, y el período de cultivo abarcó hasta el 20 de octubre de 2015 (97 días después del trasplante-ddt), para un período de cosecha de 10 semanas.

La siembra se llevó a cabo en sacos plásticos rellenos con fibra de coco, de 1 m de largo, 20 cm de ancho y 15 cm de altura. La densidad de siembra usada fue de 2,60 plantas/m² (25 cm entre plantas y 1,54 m entre hileras). Las plantas se manejaron a un solo tallo, por lo que se eliminaron todos los tallos secundarios. Se eliminaron también los primeros cuatro frutos de la planta, con el fin de conseguir mayor uniformidad en la cosecha. La fertirrigación automática (cuadro 2) se realizó por medio de un dispositivo marca iGrow 1400.

Cuadro 2. Fertirrigación usada en la investigación.

Etapa del cultivo	Concentración del nutriente (mg/l)											
	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn	Mo	B
0-14 ddt	150	53	240	165	40	50	0,16	2,9	0,3	0,6	0,9	0,8
15-30 ddt	161	53	265	175	50	50	0,16	2,9	0,3	0,6	0,9	0,8
>30 ddt	172,5	53	290	175	55	50	0,16	2,9	0,3	0,6	0,9	0,8

Se evaluaron las siguientes variables: longitud del fruto, diámetro del fruto, número de frutos por planta, peso del fruto, rendimiento total, rendimiento comercial, y porcentaje de sólidos solubles totales, según la metodología descrita ampliamente por otros autores [16].

Se usó un diseño experimental irrestricto al azar, con cuatro repeticiones por híbrido. La parcela consistió de ocho plantas, y todas ellas fueron evaluadas. Se estimó el coeficiente de correlación de Pearson (r) entre todas las variables, y en las combinaciones de variables en las que se encontró una correlación alta ($r \geq 0,66$) y significancia estadística ($p \leq 0,05$), se estableció la ecuación de regresión lineal y el coeficiente de determinación (R^2). Se calcularon las correlaciones para los 13 híbridos en total, así como también por cada tipo de pepino.

Resultados y discusión

En los cuadros 3 al 21, se muestran los resultados de las correlaciones de Pearson para las combinaciones de variables en las cuales se obtuvo un resultado alto ($r \geq 0,66$) y estadísticamente significativo ($p \leq 0,05$), y en las figuras 1 a 11 se presentan las regresiones lineales de dichas relaciones. No se presentan los resultados para las combinaciones en que la correlación (para los 13 híbridos o para cada tipo de pepino) fue no significativa, o tuvo un valor menor a 0,66.

Con respecto a la correlación entre longitud y peso del fruto, el coeficiente hallado fue alto, positivo y altamente significativo, tanto para los 13 híbridos ($r=0,99$; $R^2=0,97$) (figura 1), como para el pepino mediano, mientras que fue no significativo para los pepinos tipo largo y pequeño (cuadro 3).

Cuadro 3. Coeficientes de correlación de Pearson entre longitud del fruto (cm) y peso del fruto (g).

Híbridos	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R^2)
Total (n=13)	0,99	**	0,97
Largo (n=4)	0,46	ns	
Mediano (n=7)	0,88	**	0,77
Pequeño (n=2)	0,66	ns	

Nota: ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

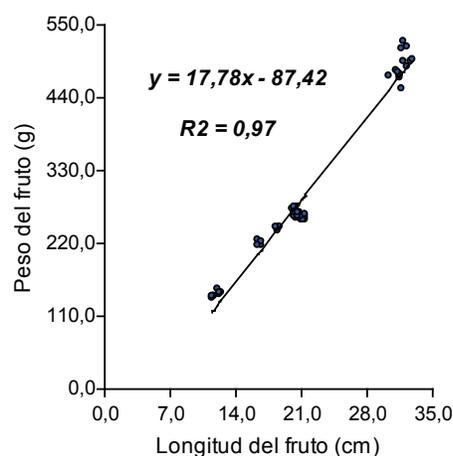


Figura 1. Regresión lineal entre longitud del fruto y peso del fruto para los 13 híbridos.

En otros estudios también se halló una correlación positiva y altamente significativa entre ambas variables ($r=0,61-0,92$) [16] [5] [15] [14] [13] [8]. Sin embargo, en otros trabajos la correlación fue baja, positiva y significativa ($r=0,21-0,24$) [1] [17], y otros autores hallaron una correlación no significativa entre ellas [12] [7] [9].

La correlación hallada entre la longitud del fruto y el número de frutos por planta fue alta, negativa, y altamente significativa, tanto para los 13 híbridos ($r=-0,79$; $R^2=0,62$) (figura 2) como para el pepino mediano, mientras que no fue significativa para los pepinos tipo largo y pequeño (cuadro 4).

Generalmente, una planta tiene una cantidad limitada de fotoasimilados, que debe repartir entre sus frutos; en un híbrido que produzca frutos de tamaño pequeño, esa cantidad de fotoasimilados puede ser capaz de llenar una mayor cantidad de frutos, en comparación con una planta que produzca frutos de mayor tamaño, en cuyo caso la planta podrá llenar una menor cantidad de frutos. En esta investigación, también se observó que las plantas de pepino pequeño pueden llegar a producir varios frutos por nudo, mientras que en las plantas de pepino largo la planta solamente produce un fruto por cada nudo, lo cual está estrechamente relacionado con el tipo de floración que presenta cada híbrido.

Cuadro 4. Coeficientes de correlación de Pearson entre longitud del fruto (cm) y número de frutos por planta.

Híbridos	Coefficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coefficiente de determinación de la regresión lineal (R^2)
Total (n=13)	-0,79	**	0,62
Largo (n=4)	0,18	ns	
Mediano (n=7)	-0,88	**	0,77
Pequeño (n=2)	0,44	ns	

Nota: ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

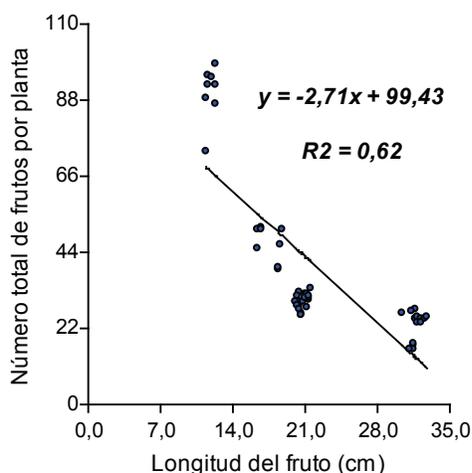


Figura 2. Regresión lineal entre longitud del fruto y número de frutos por planta para los 13 híbridos.

En otros trabajos se obtuvo también una correlación negativa y altamente significativa entre ambas variables ($r=-0,56$ a $-0,72$) [16] [15]. Por el contrario, otros investigadores encontraron una correlación alta, positiva y altamente significativa entre estas características ($r=0,78-0,91$) [13] [10]. En otros ensayos se halló una correlación positiva y significativa, aunque no muy alta ($r=0,50$) [11], y otros autores obtuvieron una correlación no significativa [5] [6] [8] [1] [14] [12] [7] [18] [17] [9].

En el caso de la correlación entre el peso del fruto y el número de frutos por planta, se halló un valor alto, negativo y altamente significativo, tanto para los 13 híbridos ($r=-0,72$; $R^2=0,51$) (figura 3) como para el pepino mediano, mientras que fue no significativo para los pepinos largo y pequeño (cuadro 5).

Cuadro 5. Coeficientes de correlación de Pearson entre peso del fruto (g) y número de frutos por planta.

Híbridos	Coefficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coefficiente de determinación de la regresión lineal (R^2)
Total (n=13)	-0,72	**	0,51
Largo (n=4)	0,26	ns	
Mediano (n=7)	-0,87	**	0,76
Pequeño (n=2)	0,50	ns	

Nota: ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

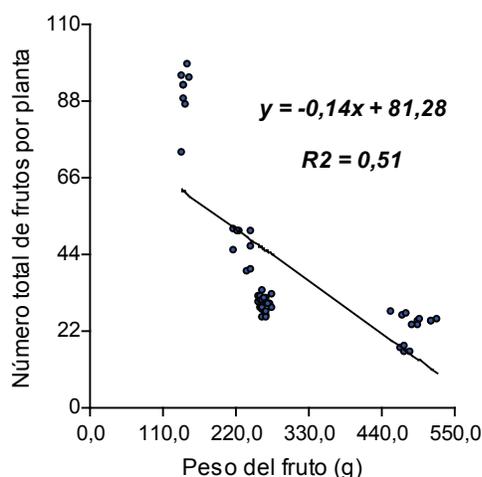


Figura 3. Regresión lineal entre peso del fruto y número de frutos por planta para los 13 híbridos.

De manera contraria a los resultados hallados en este ensayo para los 13 híbridos, otros autores encontraron una correlación positiva y altamente significativa entre ambas características ($r=0,55-0,63$) [13] [7]. No obstante, en otros estudios se obtuvo una correlación negativa, y significativa o altamente significativa ($r=-0,29$ a $-0,84$) [16] [14], y otros investigadores encontraron una correlación no significativa entre ellas [5] [8] [15] [1] [12] [17] [9].

Para la correlación entre el diámetro del fruto y el número de frutos por planta, se encontró un valor alto, negativo y altamente significativo para los 13 híbridos ($r=-0,79$; $R^2=0,62$) (figura 4), así como para los pepinos tipo largo y mediano, mientras que no fue significativo para el pepino pequeño (cuadro 6).

De manera contraria a lo obtenido en este trabajo, en otros ensayos se halló una correlación positiva y altamente significativa entre ambas características ($r=0,52-0,88$) [10] [13] [7]. Sin embargo, otros autores encontraron una correlación negativa, y significativa o muy significativa ($r=-0,26$ a $-0,77$) [16] [8] [1] [9], y en otras ocasiones la correlación no fue significativa [12] [15] [18] [17] [5] [6] [14].

Cuadro 6. Coeficientes de correlación de Pearson entre diámetro del fruto (mm) y número de frutos por planta.

Híbridos	Coefficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coefficiente de determinación de la regresión lineal (R^2)
Total (n=13)	-0,79	**	0,62
Largo (n=4)	-0,89	**	0,79
Mediano (n=7)	-0,87	**	0,76
Pequeño (n=2)	-0,55	ns	

Nota: ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

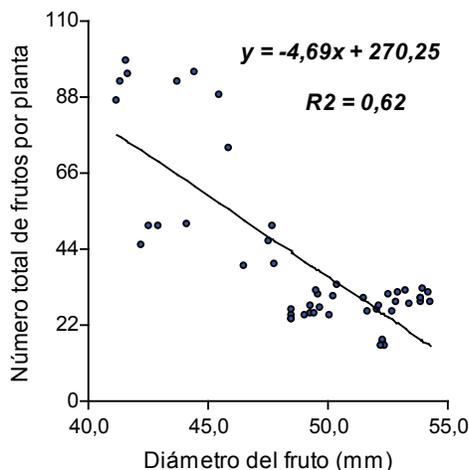


Figura 4. Regresión lineal entre diámetro del fruto y número de frutos por planta para los 13 híbridos.

La correlación hallada entre el diámetro del fruto y el rendimiento total fue alta, negativa y altamente significativa para los 13 híbridos ($r = -0,75$; $R^2 = 0,56$) (figura 5), y lo mismo sucedió para los pepinos largo y mediano, pero fue no significativa para el pepino pequeño (cuadro 7).

Cuadro 7. Coeficientes de correlación de Pearson entre diámetro del fruto (mm) y rendimiento total (kg/m^2).

Híbridos	Coefficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coefficiente de determinación de la regresión lineal (R^2)
Total (n=13)	-0,75	**	0,56
Largo (n=4)	-0,89	**	0,79
Mediano (n=7)	-0,78	**	0,61
Pequeño (n=2)	-0,68	ns	0,46

Nota: ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

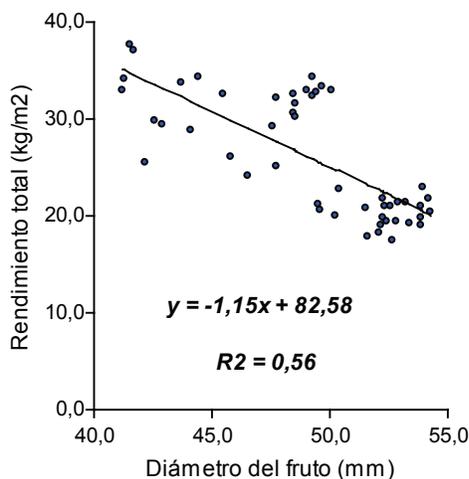


Figura 5. Regresión lineal entre diámetro del fruto y rendimiento total para los 13 híbridos.

De manera contraria a lo hallado en este ensayo, algunos autores obtuvieron una correlación positiva, y significativa o altamente significativa, entre ambas características ($r=0,39-0,88$) [7] [4] [10] [15] [13] [4] [14] [5], pero otros investigadores hallaron una correlación no significativa [17] [12] [8] [6] [18] [1] [9].

En cuanto a la correlación entre el diámetro del fruto y el rendimiento comercial, se obtuvo un valor alto, negativo y altamente significativo para los 13 híbridos ($r=-0,84$; $R^2=0,71$) (figura 6), y de forma similar sucedió para cada tipo de pepino (cuadro 8). De forma contraria a lo obtenido en la presente investigación, un autor halló un valor positivo y altamente significativo para la correlación entre estas características ($r=0,56$) [13].

Cuadro 8. Coeficientes de correlación de Pearson entre diámetro del fruto (mm) y rendimiento comercial (kg/m^2).

Híbridos	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R^2)
Total (n=13)	-0,84	**	0,71
Largo (n=4)	-0,83	**	0,69
Mediano (n=7)	-0,80	**	0,64
Pequeño (n=2)	-0,82	**	0,67

Nota: ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

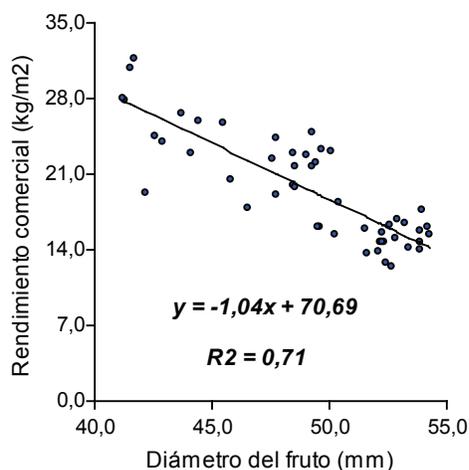


Figura 6. Regresión lineal entre diámetro del fruto y rendimiento comercial para los 13 híbridos.

La correlación hallada entre el número de frutos por planta y el rendimiento comercial fue alta, positiva y altamente significativa para los 13 híbridos ($r=0,76$; $R^2=0,58$) (figura 7); y lo mismo sucedió para cada tipo de pepino (cuadro 9). Otros investigadores hallaron también un valor alto, positivo y altamente significativo entre estas características ($r=0,51-0,92$) [16] [13].

La correlación entre el rendimiento total y el rendimiento comercial fue alta, positiva y altamente significativa para los 13 híbridos ($r=0,95$; $R^2=0,91$) (figura 8), y lo mismo sucedió con cada tipo de pepino (cuadro 10). Otros investigadores también hallaron un valor muy alto, positivo y altamente significativo entre estas características ($r=0,81-0,99$) [16] [13].

Cuadro 9. Coeficientes de correlación de Pearson entre número de frutos por planta y rendimiento comercial (kg/m²).

Híbridos	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total (n=13)	0,76	**	0,58
Largo (n=4)	0,95	**	0,90
Mediano (n=7)	0,97	**	0,94
Pequeño (n=2)	0,84	**	0,71

Nota: ns = no significativo; * = significativa (p<0,05); ** = altamente significativa (p<0,01).

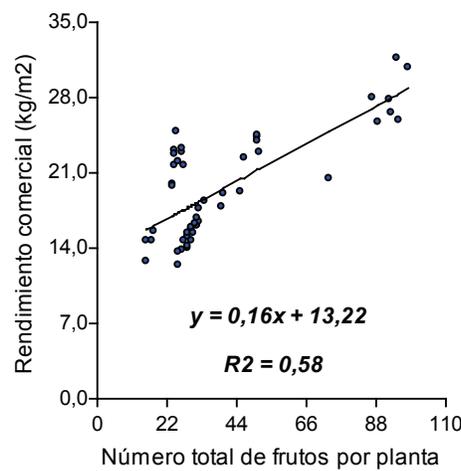


Figura 7. Regresión lineal entre número de frutos por planta y rendimiento comercial para los 13 híbridos.

Cuadro 10. Coeficientes de correlación de Pearson entre rendimiento total (kg/m²) y rendimiento comercial (kg/m²).

Híbridos	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total (n=13)	0,95	**	0,91
Largo (n=4)	0,98	**	0,96
Mediano (n=7)	0,99	**	0,98
Pequeño (n=2)	0,95	**	0,91

Nota: ns = no significativo; * = significativa (p<0,05); ** = altamente significativa (p<0,01).

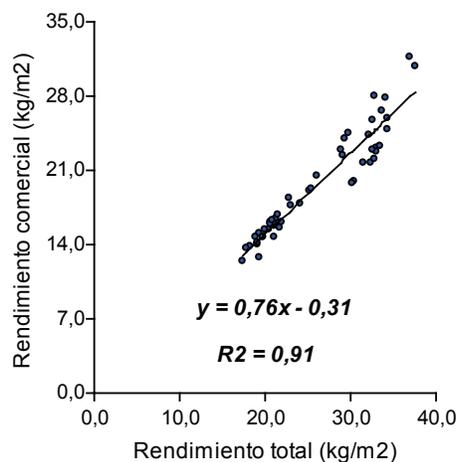


Figura 8. Regresión lineal entre el rendimiento total y el rendimiento comercial para los 13 híbridos.

La correlación entre el número de frutos por planta y el rendimiento total fue alta, positiva y altamente significativa, para los pepinos largo, mediano y pequeño por separado (cuadro 11; figuras 9, 10 y 11); sin embargo, para el total de 13 híbridos fue positivo y altamente significativo, pero no fue tan alto.

Cuadro 11. Coeficientes de correlación de Pearson entre número de frutos por planta y rendimiento total (kg/m²).

Híbridos	Coefficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coefficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total (n=13)	0,59	**	
Largo (n=4)	0,98	**	0,95
Mediano (n=7)	0,98	**	0,95
Pequeño (n=2)	0,96	**	0,93

Nota: ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

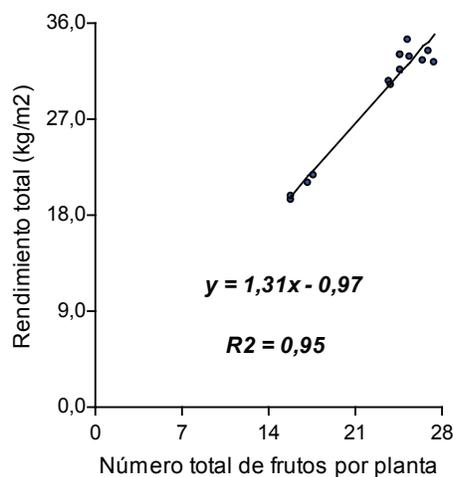


Figura 9. Regresión lineal entre número de frutos por planta y rendimiento total para los híbridos de pepino largo (n=4).

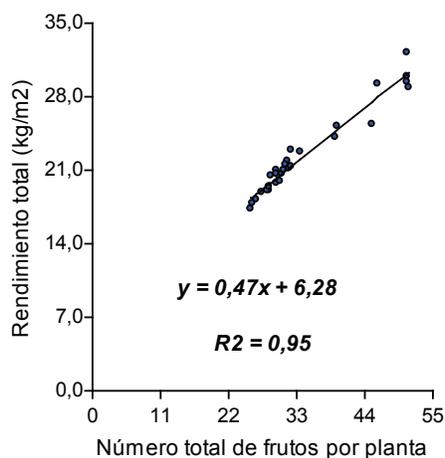


Figura 10. Regresión lineal entre número de frutos por planta y rendimiento total para los híbridos de pepino mediano (n=7).

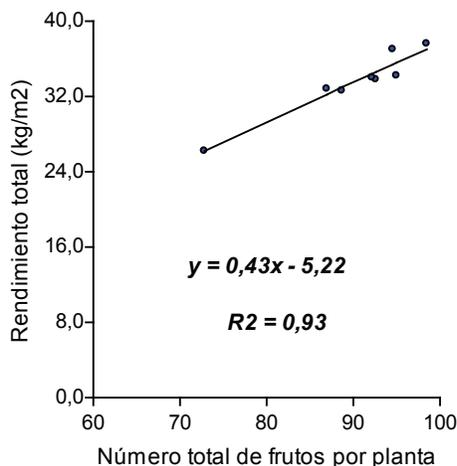


Figura 11. Regresión lineal entre número de frutos por planta y rendimiento total para los híbridos de pepino pequeño (n=2).

Otros investigadores también encontraron una correlación positiva, y significativa o altamente significativa, entre estas características ($r=0,37-0,93$) [16] [13] [12] [6] [7] [11] [10] [1] [18] [14] [9] [5] [8] [15] [17].

La correlación hallada entre el número de frutos por planta y el porcentaje de sólidos solubles totales fue alta, negativa y altamente significativa, pero solamente para el pepino largo ($r=-0,97$; $R^2=0,95$) (cuadro 12).

Cuadro 12. Coeficientes de correlación de Pearson entre número de frutos por planta y porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix).

Híbridos	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total (n=13)	-0,28	*	
Largo (n=4)	-0,97	**	0,95
Mediano (n=7)	-0,31	ns	
Pequeño (n=2)	0,07	ns	

Nota: ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

Al igual que en el presente estudio, otros investigadores hallaron una correlación negativa y altamente significativa entre estas características ($r = -0,67$) [16], mientras que otros autores hallaron una correlación no significativa [9] [14].

La correlación encontrada entre el diámetro del fruto y el porcentaje de sólidos solubles totales fue alta, positiva y altamente significativa, pero solamente para el pepino largo ($r = 0,92$; $R^2 = 0,85$) (cuadro 13).

Al igual que en el presente estudio, otros autores también hallaron una correlación positiva y altamente significativa entre ambas características ($r = 0,69$) [16]. Sin embargo, unos investigadores encontraron una correlación baja, negativa y altamente significativa ($r = -0,37$) [14], y en otro estudio la correlación no fue significativa [9].

Cuadro 13. Coeficientes de correlación de Pearson entre diámetro del fruto (mm) y porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix).

Híbridos	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total (n=13)	0,36	**	
Largo (n=4)	0,92	**	0,85
Mediano (n=7)	0,49	**	
Pequeño (n=2)	0,28	ns	

Nota: ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

La correlación entre el rendimiento comercial y el porcentaje de sólidos solubles totales fue alta, negativa y altamente significativa, únicamente para el pepino largo ($r = -0,92$; $R^2 = 0,85$) (cuadro 14).

Cuadro 14. Coeficientes de correlación de Pearson entre rendimiento comercial (kg/m²) y porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix).

Híbridos	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total (n=13)	-0,31	*	
Largo (n=4)	-0,92	**	0,85
Mediano (n=7)	-0,25	ns	
Pequeño (n=2)	-0,26	ns	

Nota: ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

La correlación entre el rendimiento total y el porcentaje de sólidos solubles totales fue alta, negativa y altamente significativa, únicamente para el pepino largo ($r=-0,97$; $R^2=0,95$) (cuadro 15). En otros estudios esta correlación no fue significativa [9] [14].

Cuadro 15. Coeficientes de correlación de Pearson entre rendimiento total (kg/m²) y porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix).

Híbridos	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total (n=13)	-0,27	ns	
Largo (n=4)	-0,97	**	0,95
Mediano (n=7)	-0,25	ns	
Pequeño (n=2)	-0,09	ns	

Nota: ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

La correlación entre el peso del fruto y el rendimiento total fue alta, negativa y altamente significativa, únicamente para el pepino mediano ($r=-0,75$; $R^2=0,57$) (cuadro 16), pero fue alta, positiva y significativa únicamente para el pepino pequeño ($r=0,71$; $R^2=0,50$). En otros estudios se obtuvo una correlación positiva, y significativa o altamente significativa, entre estas características ($r=0,25-0,92$) [13] [7] [8] [5] [1] [17] [12] [9] [14] [15].

Cuadro 16. Coeficientes de correlación de Pearson entre peso del fruto (g) y rendimiento total (kg/m²).

Híbridos	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total (n=13)	0,06	ns	
Largo (n=4)	0,47	ns	
Mediano (n=7)	-0,75	**	0,57
Pequeño (n=2)	0,71	*	0,50

Nota: ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

La correlación entre el peso del fruto y el rendimiento comercial fue alta, negativa y altamente significativa, únicamente para el pepino mediano ($r=-0,75$; $R^2=0,57$) (cuadro 17), pero fue alta, positiva y altamente significativa únicamente para el pepino pequeño ($r=0,88$; $R^2=0,78$). Un investigador halló una correlación alta, positiva y altamente significativa entre dichas características ($r=0,83$) [13].

Cuadro 17. Coeficientes de correlación de Pearson entre peso del fruto (g) y rendimiento comercial (kg/m²).

Híbridos	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total (n=13)	-0,20	ns	
Largo (n=4)	0,51	ns	
Mediano (n=7)	-0,75	**	0,57
Pequeño (n=2)	0,88	**	0,78

Nota: ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

La correlación entre la longitud del fruto y el rendimiento comercial fue alta, negativa y altamente significativa, únicamente para el pepino mediano ($r=-0,78$; $R^2=0,62$) (cuadro 18). Por el contrario, un autor encontró una correlación alta, positiva y altamente significativa entre estas características ($r=0,80$) [13].

Cuadro 18. Coeficientes de correlación de Pearson entre longitud del fruto (mm) y rendimiento comercial (kg/m^2).

Híbridos	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R^2)
Total (n=13)	-0,31	*	
Largo (n=4)	0,18	ns	
Mediano (n=7)	-0,78	**	0,62
Pequeño (n=2)	0,69	ns	

Nota: ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

La correlación entre longitud del fruto y rendimiento total fue alta, negativa y altamente significativa, únicamente para el pepino mediano ($r=-0,79$; $R^2=0,63$) (cuadro 19).

Cuadro 19. Coeficientes de correlación de Pearson entre longitud del fruto (mm) y rendimiento total (kg/m^2).

Híbridos	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R^2)
Total (n=13)	-0,05	ns	
Largo (n=4)	0,27	ns	
Mediano (n=7)	-0,79	**	0,63
Pequeño (n=2)	0,56	ns	

Nota: Simbología: ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

De manera contraria, unos autores hallaron una correlación positiva y altamente significativa entre ambas variables ($r=0,38-0,92$) [13] [4] [10] [5] [8] [14], mientras que muchos autores encontraron una correlación no significativa [7] [17] [12] [9] [6] [18] [1] [15] [11].

La correlación entre el diámetro y la longitud del fruto fue alta, positiva y altamente significativa, únicamente para el pepino mediano ($r=0,86$; $R^2=0,75$) (cuadro 20), mientras que fue alta, negativa y altamente significativa únicamente para el pepino pequeño ($r=-0,94$; $R^2=0,88$).

Cuadro 20. Coeficientes de correlación de Pearson entre diámetro del fruto (mm) y longitud del fruto (cm).

Híbridos	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R^2)
Total (n=13)	0,49	**	
Largo (n=4)	-0,29	ns	
Mediano (n=7)	0,86	**	0,75
Pequeño (n=2)	-0,94	**	0,88

Nota: Simbología: ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

Algunos investigadores encontraron una correlación positiva, y significativa o altamente significativa, entre ambas variables ($r=0,23-0,98$) [17] [4] [10] [14] [4] [13] [8] [1] [15] [5], mientras que otros hallaron un valor no significativo [6] [18] [7] [9].

La correlación entre el diámetro y el peso del fruto fue alta, positiva y altamente significativa, únicamente para el pepino mediano ($r=0,94$; $R^2=0,88$), mientras que fue negativa, alta y significativa únicamente para el pepino pequeño ($r=-0,76$; $R^2=0,58$) (cuadro 21).

Cuadro 21. Coeficientes de correlación de Pearson entre diámetro del fruto (mm) y peso del fruto (g).

Híbridos	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R^2)
Total (n=13)	0,39	**	
Largo (n=4)	-0,34	ns	
Mediano (n=7)	0,94	**	0,88
Pequeño (n=2)	-0,76	*	0,58

Nota: ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

Otros investigadores hallaron también una correlación positiva, y significativa o altamente significativa, entre estas características ($r=0,21-0,74$) [16] [7] [15] [14] [5] [13] [8] [1] [9], mientras que unos autores obtuvieron una correlación no significativa [17] [12].

En comparación con otra investigación llevada a cabo en Costa Rica en la temporada seca [16], en el presente estudio se obtuvo un mayor número de correlaciones que fueron altas ($r \geq 0,66$) y significativas ($p \leq 0,05$), ya sea en el total de híbridos de pepino, o según el tipo de pepino. Las nueve correlaciones que solamente se destacaron durante la temporada lluviosa fueron obtenidas entre: diámetro del fruto y rendimiento total; diámetro del fruto y rendimiento comercial; rendimiento comercial y porcentaje de sólidos solubles totales; rendimiento total y porcentaje de sólidos solubles totales; peso del fruto y rendimiento total; peso del fruto y rendimiento comercial; longitud del fruto y rendimiento comercial; longitud del fruto y rendimiento total; y diámetro del fruto y longitud del fruto. Este hallazgo constituye un aporte importante al conocimiento, pues se comprueba que la temporada del año (seca o lluviosa) afecta los resultados de las correlaciones entre variables en pepino producido bajo invernadero, a través de la influencia de los factores climáticos sobre la fisiología de las plantas.

Conclusiones

Se obtuvieron ocho correlaciones de Pearson (evaluadas en los 13 híbridos) que fueron altas ($r \geq 0,66$) y con significancia estadística ($p \leq 0,05$), en cuyo caso se establecieron las regresiones lineales: longitud y peso del fruto ($r=0,99$); longitud del fruto y número de frutos por planta ($r=-0,79$); peso del fruto y número de frutos por planta ($r=-0,72$); diámetro del fruto y número de frutos por planta ($r=-0,79$); diámetro del fruto y rendimiento total ($r=-0,75$); diámetro del fruto y rendimiento comercial ($r=-0,84$); número de frutos por planta y rendimiento comercial ($r=0,76$); y rendimiento total y comercial ($r=0,95$). Además, se establecieron otras once correlaciones altas y con significancia estadística, según el tipo de pepino (largo, mediano o pequeño).

Se concluye que el tipo de pepino influye de forma importante en el valor de las correlaciones.

Agradecimientos

Se agradece a CONARE y a la Universidad de Costa Rica por el financiamiento de la investigación, y a Mario Monge por la revisión de la traducción al inglés del resumen.

Referencias

- [1] M. Golabadi, P. Golkar y A. Eghtedary, "Combining ability analysis of fruit yield and morphological traits in greenhouse cucumber (*Cucumis sativus* L.)," *Canadian Journal of Plant Science*, vol. 95, pp. 377-385, 2015.
- [2] L. C. Crosby, "Growth and consumer evaluation of *Cucumis sativus* L. cultivated in controlled environments," 2008.
- [3] Johnny's Selected Seeds, "Cucumber types and terminology," 2014. [Online]. Available: <http://www.johnny-seeds.com/assets/information/cucumbers-types-terminology-8989.pdf>.
- [4] M. A. Murtadha y T. A. Sanni, "Interaction effects of seasons and farming practices on correlation and path analysis of yield of cucumber (*Cucumis sativus* L.)," *Journal of Ecobiotechnology*, vol. 10, pp. 21-24, 2018.
- [5] S. K. Deepa, H. P. Hadimani, C. N. Hanchinamani, R. Shet, S. Koulgi y Ashok, "Studies on character association in cucumber (*Cucumis sativus* L.)," *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, vol. 7, n° 11, pp. 1977-1982, 2018.
- [6] R. M. Shet, T. Shantappa, Ashok y S. B. Gurumurthy, "Genetic variability and correlation studies for productivity traits in cucumber (*Cucumis sativus* L.)," *International Journal of Chemical Studies*, vol. 6, n° 5, pp. 236-238, 2018.
- [7] A. Kumari, A. K. Singh, D. P. Moharana, A. Kumar y N. Kumar, "Character relationship and path coefficient analysis for yield and yield components in diverse genotypes of cucumber (*Cucumis sativus* L.)," *The Pharma Innovation Journal*, vol. 7, n° 5, pp. 33-38, 2018.
- [8] R. Veena, A. S. Sidhu, M. Pitchaimuthu y K. Souravi, "Character association for fruit yield and yield traits in Cucumber (*Cucumis sativus* L.)," *Electronic Journal of Plant Breeding*, vol. 4, n° 1, pp. 1108-1112, 2013.
- [9] S. Sharma, R. Kumar, S. Chatterjee y H. R. Sharma, "Correlation and path analysis studies for yield and its attributes in cucumber (*Cucumis sativus* L.)," *International Journal of Chemical Studies*, vol. 6, n° 2, pp. 2045-2048, 2018.
- [10] C. O. Ene, P. E. Ogbonna, C. U. Agbo y U. P. Chukwudi, "Evaluation of sixteen cucumber (*Cucumis sativus* L.) genotypes in derived savannah environment using path coefficient analysis," *Notulae Scientia Biologicae*, vol. 8, n° 1, pp. 85-92, 2016.
- [11] U. Afangideh y E. A. Uyoh, "Genetic variability and correlation studies in some varieties of cucumber (*Cucumis sativus* L.)," *Jordan Journal of Agricultural Sciences*, vol. 3, n° 4, pp. 376-384, 2007.
- [12] C. S. Ahirwar, D. K. Singh y M. L. Kushwaha, "Assessment of genetic variation in cucumber (*Cucumis sativus* L.) germplasm on correlation, path analysis and cluster analysis," *Chemical Science Review and Letters*, vol. 6, n° 23, pp. 1886-1893, 2017.
- [13] C. N. Hanchinamani, "Genetic variability, divergence, heterosis and combining ability studies in cucumber (*Cucumis sativus* L.)," University of Agricultural Sciences, Dharwad, India, 2006.
- [14] S. Pal, H. R. Sharma, A. Das y A. K. Pandav, "Character association and path analysis for fruit yield and its contributing traits in cucumber (*Cucumis sativus* L.)," *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, vol. 10, n° 2, pp. 163-170, 2017.
- [15] M. Z. Ullah, M. J. Hasan, A. Z. M. K. A. Chowdhury, A. I. Saki y A. H. M. A. Rahman, "Genetic variability and correlation in exotic cucumber (*Cucumis sativus* L.) varieties," *Bangladesh Journal of Plant Breeding and Genetics*, vol. 25, n° 1, pp. 17-23, 2012.
- [16] K. Chacón-Padilla y J. E. Monge-Pérez, "Producción de pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo invernadero: correlaciones entre variables," *Revista Posgrado y Sociedad*, vol. 18, n° 2, pp. 53-70, 2020.
- [17] G. E. Nwofia, A. N. Amajuoyi y E. U. Mbah, "Response of three cucumber varieties (*Cucumis sativus* L.) to planting season and NPK fertilizer rates in lowland humid tropics: sex expression, yield and inter-relationships between yield and associated traits," *International Journal of Agriculture and Forestry*, vol. 5, n° 1, pp. 30-37, 2015.
- [18] A. Soleimani, A. Ahmadihah y S. Soleimani, "Performance of different greenhouse cucumber cultivars (*Cucumis sativus* L.) in southern Iran," *African Journal of Biotechnology*, vol. 8, n° 17, pp. 4077-4083, 2009.

Optimización de las condiciones de crecimiento de la bacteria endófitra *Klebsiella oxytoca* en matraz y en biorreactor

Optimization of the growth conditions of the endophytic bacteria *Klebsiella oxytoca* in flask culture and in a bioreactor

Alexander Schmidt-Durán¹, Randall Chacón-Cerdas²

Fecha de recepción: 17 de setiembre de 2020

Fecha de aprobación: 4 de diciembre de 2020

Schmidt-Durán, A; Chacón-Cerdas, R. Optimización de las condiciones de crecimiento de la bacteria endófitra *Klebsiella oxytoca* en matraz y en biorreactor. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-4 Octubre-Diciembre 2021. Pág 92-104.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i4.5385>

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: aschmidt@tec.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-1061-6840>

2 Centro de Investigación en Biotecnología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: rchacon@tec.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-5364-4649>



Palabras claves

Klebsiella oxytoca, cultivo en matraz, biorreactor, residuos agroindustriales, modelo logístico.

Resumen

Las bacterias endófitas son aquellas que viven en el interior de las células o los tejidos de plantas superiores sin causar daño. *Klebsiella oxytoca* es una bacteria endófitas promotora del crecimiento vegetal y con efecto biocontrolador, razón por la cual, el objetivo del presente estudio fue determinar las condiciones óptimas de crecimiento de esta bacteria, en matraz y en biorreactor, obtenida de plantas de higo (*Ficus carica*) en estudios anteriores. Para esto, se evaluó el crecimiento de la biomasa de *K. oxytoca* en caldo nutritivo bajo diferentes condiciones de agitación y temperatura en matraz, determinando que las condiciones a 200 rpm y 30 °C fueron las que produjeron una mayor biomasa. Posteriormente, utilizando medio caldo nutritivo en el biorreactor de 3,7 L, se determinó que una agitación de 500 rpm presenta valores de K_L a más altos y tiempos de fermentación menores que si se trabaja a 750 rpm. Además, bajo una agitación de 500 rpm, se determinó que medios basados en residuos agroindustriales pueden funcionar como fuentes de crecimiento alternativas para este microorganismo. Por último, el tratamiento de caldo nutritivo a 500 rpm fue modelado mediante el modelo logístico y la ecuación de Pirt, obteniendo, en ambos casos, coeficientes de determinación superiores a 0,95.

Keywords

Klebsiella oxytoca; flask culture; bioreactor; agro-industrial residues; logistic model.

Abstract

Endophytic bacteria are characterized for living within plant cells and tissue without causing any harm to the plants. *Klebsiella oxytoca* is an endophyte that promotes plant growth and also has a bio-controlling effect; therefore, the objective of the current study is to determine the optimal growth conditions, in flask culture as well as in a bioreactor, for this bacteria collected from previous studies performed on fig plants (*Ficus carica*). To achieve this, biomass growth of *K. oxytoca* flask cultured in nutritive broth was assessed under different agitation and temperature conditions, and it was determined that 200 rpm and 30 °C produced the highest biomass yield. On the other hand, using a broth culture in a 3.7 L bioreactor, it was established that 500 rpm presents higher K_L values and a shorter fermentation time than when using an agitation speed of 750 rpm. Additionally, under an agitation speed of 500 rpm, the use of culture media based on agro-industrial residues can provide an alternate source of energy for this microorganism. Finally, the treatment using culture broth at 500 rpm was modeled using a logistic model and Pirt's equation, resulting in both cases, on a coefficient of determination higher than 0.95.

Introducción

Las bacterias pueden crear asociaciones cercanas con las plantas, como por ejemplo patogénicas, epífitas, endófitas, simbióticas, no simbióticas y antagonicas. Estos microorganismos forman grupos diversos filogenéticamente representados por especies pertenecientes en amplia cantidad a diferentes géneros y familias. Cuando se establecen tales vínculos, típicamente se intercambian señales con su hospedero y se desarrollan diversos mecanismos para su adaptación y colonización [1].

Los microorganismos endófitos comprenden hongos y bacterias que viven, sin causar daño, en el interior de las células y los tejidos de las plantas superiores, durante una parte de su ciclo de vida bifásico, que alterna entre la planta y el suelo [2] [3]. Principalmente, residen en los espacios intercelulares y muy pocas veces en espacios intracelulares o dentro de los tejidos vasculares [1]. Las bacterias endófitas promueven el crecimiento de las plantas, aumentan la resistencia a enfermedades, contribuyen a la fijación biológica de nitrógeno, interactúan con patógenos y brindan protección contra los mismos [4].

Diversa microbiota promotora del crecimiento vegetal se encuentra tanto en la rizósfera como dentro de las plantas en modo de bacterias endófitas. Entre ellos se encuentran géneros pertenecientes a la familia Enterobacteriaceae como *Enterobacter*, *Klebsiella* y *Serratia* [5] [6] [7]. *Klebsiella oxytoca* es un microorganismo anaerobio facultativo, Gram negativo que está presente en una variedad de fuentes ambientales como el suelo, la vegetación y el agua [8]. Se caracteriza por poseer una prominente cápsula de polisacáridos y la presencia de adhesinas [9] [10].

Klebsiella oxytoca ha sido utilizada con fines biotecnológicos en diversas áreas, presenta potencial biorremediador, pues degrada hidrocarburos [11], compuestos orgánicos hidrofóbicos [12], sustancias tóxicas como el cianuro [13], así como insecticidas organoclorados [14], nitrilos [15], ácidos benzoicos [16], colorantes azoicos [17] y el fármaco diclofenaco [18]. Además, se ha reportado la producción de bioelectricidad en conjunto con la degradación de ácidos grasos [19], ha sido capaz de llevar a cabo la desulfuración termofílica de dibenzotiofenos [20], entre otras muchas aplicaciones [21] [22] [23].

Como bacteria endófitas, esta especie ha promovido el crecimiento vegetal debido a su capacidad de fijar nitrógeno y de solubilizar el fósforo [24] [25] [26], produce auxinas [27] [26] y, además, exhibe antagonismo contra *Fusarium oxysporum* [28], *Pythium aphanidermatum* [29] y *Gaeumannomyces graminis* [30]. También ha presentado potencial como inoculante microbiano para biofortificación con selenio [30].

Por esta razón, el objetivo de esta investigación fue determinar las mejores condiciones de cultivo en matraz y en biorreactor de 3,7 L para el crecimiento de la bacteria endófitas *K. oxytoca*, aislada de plantas de higo (*Ficus carica*) como potencial microorganismo de múltiples aplicaciones biotecnológicas.

Metodología

Obtención de la bacteria endófitas *Klebsiella oxytoca*

La bacteria *Klebsiella oxytoca* se obtuvo de crioviales conteniendo 20% de glicerol y 80% de medio caldo nutritivo mantenidos a -80 °C, la cual fue previamente aislada de hojas de higo *Ficus carica* L. de la variedad "Brown Turkey" [31] e identificada molecularmente por Alvarado-Marchena y colaboradores [32]. Una asada del criovial, previamente descongelado a temperatura ambiente por 15 min, se inóculo en una placa Petri con medio agar nutritivo. Después de 24 h de crecimiento, se tomó una colonia y fue rayada en otra placa del mismo medio de cultivo.

Cultivo en matraz

Posteriormente, se realizó un inóculo de la bacteria. En matraces de 250 ml, conteniendo 50 ml de medio caldo nutritivo, se colocó una colonia de la bacteria. Se dejó creciendo el microorganismo a 100 rpm durante 18 h. Al cultivo bacteriano en matraz se le realizó un conteo celular mediante cámara de Neubauer y se agregó el volumen necesario para realizar el ensayo de optimización de condiciones de crecimiento en matraz, empezando con una concentración

inicial de $1,0 \times 10^6$ cél/ml. El ensayo se realizó con dos factores diferentes, agitación a 100, 150, 200 y 250 rpm y temperatura a 30 y 37 °C, determinando el conteo celular mediante cámara de Neubauer a las 24 h, tomando una muestra de 1 ml y realizando las diluciones requeridas de acuerdo a la concentración celular. Para cada tratamiento se realizaron tres repeticiones. A los resultados obtenidos se les realizó un análisis de varianza y una prueba de Tukey usando el programa estadístico Minitab® [33].

Crecimiento en biorreactor bajo diferentes agitaciones

Se realizó fermentaciones en un biorreactor R'ALFs de 3,7 l (Bioengineering®). El equipo se utilizó a 30 °C, con caldo nutritivo adicionando 5 g/l de glucosa, un pH de 7.0, un impulsor tipo propela marina y se probaron dos agitaciones diferentes: 500 y 750 rpm. Para cada ensayo se determinó la $K_L a$ por medio del método dinámico.

El pre-inóculo se realizó bajo las condiciones optimizadas con anterioridad, en el cual se inoculó una concentración requerida para iniciar la fermentación con $1,0 \times 10^6$ cél/ml de la bacteria. Se tomaron muestras cada 1 o 2 h y se analizó la biomasa mediante cámara de Neubauer y densidad óptica a una absorbancia de 600 nm y el consumo de glucosa mediante el método de Trinder [34].

Prueba con residuos agroindustriales

Bajo las mismas condiciones de inóculo descritas anteriormente y la agitación determinada en el ensayo anterior, se procedió a realizar las fermentaciones mediante dos medios de cultivo basados en residuos agroindustriales y un tratamiento control, correspondiente al medio caldo nutritivo suplementado con 5 g/l de glucosa. Los medios basados en residuos agroindustriales fueron procesados de cáscaras de piña y cáscaras de papaya. Para la elaboración de los medios de cultivo, los residuos se colocaron en una proporción 1:1 con agua destilada y se licuaron durante 10 min hasta su homogenización. Posteriormente, se elaboró el medio disolviendo los residuos homogenizados en una proporción 1:10 v/v con agua destilada, el caldo obtenido se calentó hasta ebullición durante 10 min y luego se filtró para eliminar los residuos sólidos. El filtrado fue el medio de cultivo utilizado en el biorreactor y se le determinó la $K_L a$ mediante el método dinámico. El biorreactor se inoculó con $1,0 \times 10^6$ cél/ml y cada hora, durante 13 horas, se tomaba una muestra en donde se le determinó la biomasa mediante cámara de Neubauer.

Modelaje de la cinética de crecimiento

A las mejores condiciones de crecimiento se les realizó un modelado primario del crecimiento de la biomasa mediante el modelo logístico [35], dado por la ecuación matemática:

$$\frac{dX}{dt} = \mu_{max} X \left(1 - \frac{X}{X_{max}} \right) \quad (1)$$

Donde X_{max} es la biomasa máxima, X es la biomasa en el tiempo y μ_{max} es la velocidad máxima de crecimiento del microorganismo. La integración de la ecuación 1 usando $X = X_0$ ($t=0$) da como resultado la ecuación

$$X(t) = \frac{X_0 e^{\mu_{max} t}}{1 - \frac{X_0}{X_{max}} (1 - e^{\mu_{max} t})} \quad (2)$$

Además, al consumo de sustrato se le realizó un modelado a través de la ecuación de Pirt [36] [37], dado por la ecuación matemática:

$$\frac{1}{Y_{x/s}} = \frac{1}{Y_{x/s}max} + \frac{m_s}{\mu} \quad (3)$$

Donde $Y_{x/s}$ es el rendimiento de la biomasa sobre el sustrato, $Y_{x/s}max$ es el rendimiento de la biomasa sobre el sustrato máximo y m_s es el coeficiente de mantenimiento. Si se sustituye la ecuación 2 en la 3, se obtiene la siguiente ecuación del modelo:

$$S(t) = S_0 - \frac{1}{Y_{x/s}} \left(\frac{X_0 e^{\mu_{max}t}}{1 - \frac{X_0}{X_{max}} (1 - e^{\mu_{max}t})} - X_0 \right) - \frac{m_s X_{max}}{\mu_{max}} \ln \left(1 - \frac{X_0}{X_{max}} (1 - e^{\mu_{max}t}) \right) \quad (4)$$

Resultados y discusión

Cultivo en matraz

En el cuadro 1 se observa la clasificación según la prueba de Tukey aplicada a los diferentes tratamientos de optimización de las condiciones de crecimiento de *K. oxytoca* en matraz. Los datos presentaron homocedasticidad ($p > 0,050$), aleatoriedad y normalidad ($p > 0,050$). El análisis de varianza determinó que existen diferencias significativas en la temperatura ($p = 0,000$) y la agitación ($p = 0,000$), además, las variables presentaron interacción entre ellas ($p = 0,000$).

Cuadro 1. Prueba de rangos de Tukey de los diferentes tratamientos realizados en matraz.

Tratamiento	Promedio Biomasa (cél/ml)*
100 rpm a 30 °C	1,2 x 10 ⁹ bc
150 rpm a 30 °C	1,8 x 10 ⁹ ab
200 rpm a 30 °C	2,4 x 10 ⁹ a
250 rpm a 30 °C	7,1 x 10 ⁸ d
100 rpm a 37 °C	6,9 x 10 ⁸ d
150 rpm a 37 °C	1,6 x 10 ⁹ ab
200 rpm a 37 °C	8,0 x 10 ⁸ d
250 rpm a 37 °C	8,9 x 10 ⁸ cd

*Letras diferentes significa que presentan diferencias estadísticas significativas.

La temperatura afecta la estabilidad y la actividad biológica de diferentes moléculas de los microorganismos, por lo que cada microorganismo tiene un rango de temperatura de crecimiento y una temperatura en donde alcanza su velocidad máxima de crecimiento [38]. Así, diferentes temperaturas permiten la obtención de diferentes rendimientos de biomasa y de productos. *Klebsiella oxytoca* presenta un amplio rango de temperaturas de crecimiento junto a otros microorganismos de su misma familia, que pueden ir desde los 25 °C hasta los 37 °C de manera óptima [39]. Bajo esta premisa, se evaluó el efecto de la temperatura en el crecimiento de *K. oxytoca*, obteniendo que una temperatura de 30°C generó una mayor biomasa de manera significativa que la obtenida a 37°C.

Este fenómeno ya se ha reportado en otras cepas de este mismo microorganismo, en donde una cepa aislada de suelos costeros, presentó un crecimiento que fue casi el doble en términos de absorbancia, a temperaturas de 30 °C con respecto a la misma cepa en una temperatura de 37 °C, no obstante, la producción de los compuestos de interés en esta investigación (2,3 butanediol y acetoina), fueron mayores a 37 °C [40] sin embargo, también hay reportes de crecimiento a 37°C de este microorganismo, para la producción de los mismos compuestos mencionados [41]. Por otro lado, se reporta la degradación de carbendazim de una cepa silvestre de *K. oxytoca* a temperatura ambiente, alcanzando concentraciones de $3,5 \times 10^7$ cél/ml, utilizando a este compuesto como fuente de carbono [42], mientras que en otro estudio de biorremediación, se ha utilizado este microorganismo a 30 °C para la degradación de cianuro [43].

En relación con la agitación, esta permite la homogenización de la biomasa, la dispersión de las burbujas de aire, del medio de cultivo, pH y del calor en medios líquidos [38]. Diferentes autores han reportado el crecimiento de *K. oxytoca* en condiciones en matraz bajo diferentes revoluciones por minuto, las cuales fueron 80 rpm [42], 150 rpm [40] [41] y 200 rpm [44] [45], lo que provocó que se evaluaran cuatro agitaciones diferentes para la producción de biomasa. Bajo las variables analizadas, se pudo determinar que existe una interacción entre las variables temperatura y agitación, determinando que, a 200 rpm con una temperatura de 30 °C, es la condición óptima de los tratamientos evaluados, para el crecimiento de *K. oxytoca*.

Prueba en biorreactor con diferentes agitaciones

En la figura 1 se observa la cinética de crecimiento por conteo celular (1a) y densidad óptica (1b) de *K. oxytoca* bajo dos condiciones diferentes de agitación. En ambos casos se observa que las cinéticas a 500 rpm llegan a fase exponencial y fase estacionaria en un menor tiempo. Sin embargo, a las 13 horas, ambas cinéticas alcanzan concentraciones de $3,0 \times 10^9$ cél/ml. Además, se denota el consumo de glucosa por parte del microorganismo (1c), en la que el tratamiento a 500 rpm agota el sustrato a las 11 h, mientras que el tratamiento a 750 rpm requirió 12 h.

Se realizó un ensayo con diferentes agitaciones de 100, 200, 300 y 400 rpm y una estrategia de dos agitaciones (300 rpm durante 15 h y 200 rpm las restantes 15 h) en la fermentación de *K. oxytoca* para la producción de 2,3 butanediol [44]. Los autores obtuvieron una mayor cantidad de biomasa al aumentar la agitación, pasando de 4,3 g/l de peso seco a 100 rpm, hasta una concentración de 5,2 g/l de peso seco a los 400 rpm. Sin embargo, la concentración máxima de butanediol se dio a los 200 rpm. La estrategia de dos agitaciones arrojó datos de 5,0 g/l de peso seco y la máxima concentración de butanediol de todos los tratamientos realizados. Por otro lado, en una fermentación con una cepa ingenierizada de *K. oxytoca* a 400 rpm se obtuvo concentraciones cercanas a los 9 g/l, utilizando glicerol puro y mayores a 13 g/l en fermentaciones con glicerol crudo [45].

De acuerdo con los resultados anteriores, se denota que existe una relación entre la biomasa y la velocidad de agitación, cuando estas son menores a los 400 rpm, sin embargo, es posible que exista una velocidad de agitación máxima, en la cual, ya no exista un mejoramiento en la biomasa obtenida. En este caso particular, la biomasa obtenida en la fermentación en el biorreactor a 500 rpm es mayor que las obtenidas en los tratamientos en matraz, y en un menor tiempo de fermentación, sin embargo, al aumentar la velocidad de agitación, esta no provocó un aumento de la biomasa, más bien, se da un aumento en el tiempo de fermentación, específicamente en la fase *lag*. Esta fase se caracteriza por ser una fase de adaptación del microorganismo al medio de cultivo y a las condiciones de crecimiento y su duración es variable dependiendo de la fisiología de las células y su grado de adaptación a las condiciones del

cultivo [38], pudiendo significar que las células bacterianas del inóculo que se encontraban en condiciones de crecimiento de 200 rpm, al adaptarse a las nuevas condiciones de agitación de 750 rpm, provocarían un mayor tiempo de adaptación, alargando el tiempo de la fermentación.

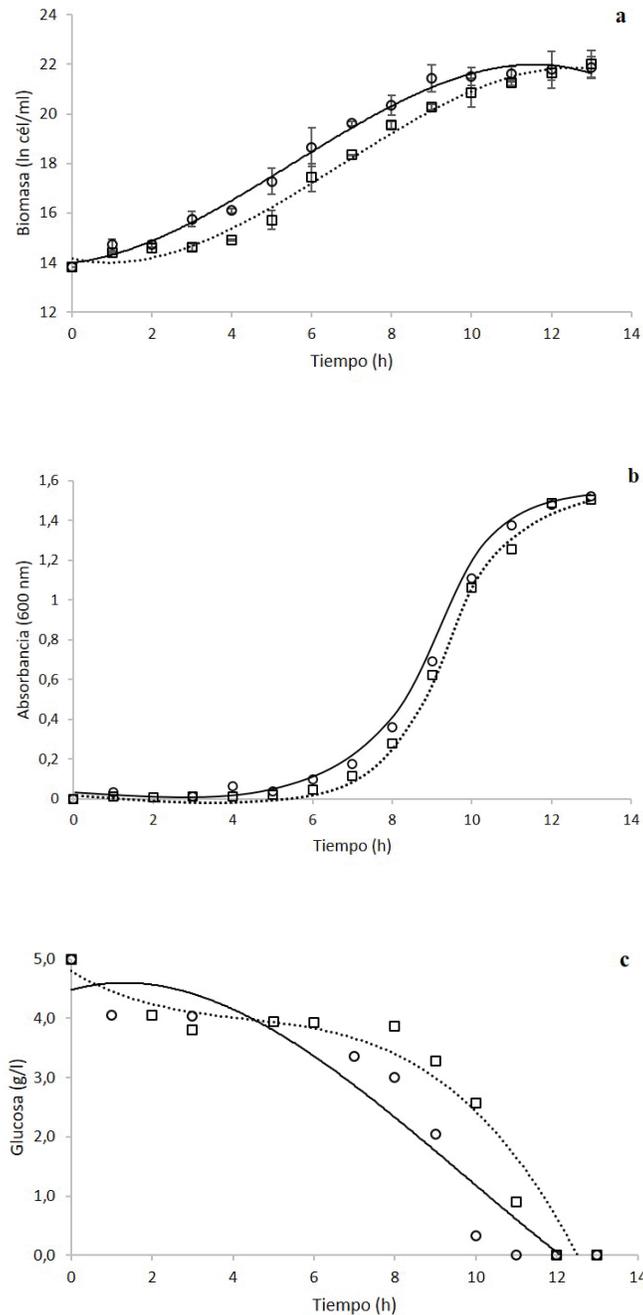


Figura 1. Cinéticas de crecimiento de *Klebsiella oxytoca* en biorreactor a 500 rpm (círculo con línea continua) y a 750rpm (cuadrados con línea discontinua de puntos) por conteo celular en cámara de Neubauer (a), densidad óptica (b) y consumo de glucosa (c).

Con respecto al coeficiente volumétrico de transferencia de masa, la $K_L a$ para el tratamiento a 500 rpm fue de $46,352 \text{ h}^{-1}$, mientras que el tratamiento a 750 rpm presentó un valor de $25,808 \text{ h}^{-1}$. Es importante señalar que la transferencia de oxígeno constituye un factor muy importante

en el crecimiento de los microorganismos y el escalado en fermentaciones aerobias, ya que el oxígeno tiende a ser muchas veces un compuesto limitante, debido a su baja solubilidad en soluciones acuosas, por lo que frecuentemente se emplean alternativas en las condiciones de operación como cambios en la velocidad de agitación, el flujo de aireación o el sistema de distribución de aire [46]. En este caso particular, se obtuvo que a mayor coeficiente de transferencia de oxígeno hay un mayor consumo de este por parte de *Klebsiella oxytoca* (datos no mostrados), pero en ninguno de los dos tratamientos el oxígeno fue un factor limitante, probablemente por ser un microorganismo anaerobio facultativo y tener una tasa de respiración baja. Además, se denota que una mayor velocidad de agitación, provocó un menor valor de $K_L a$. Esto concuerda con los resultados obtenidos por [47] en donde encontraron que, en un biorreactor de tres litros, el valor de la $K_L a$ aumentaba hasta llegar a los 618 rpm, valor en el cual, el análisis de superficie generaba la meseta y los valores de $K_L a$ tendían a disminuir. Esto puede ser provocado porque la velocidad de agitación ya no provoca una mejor distribución ni un menor tamaño de las burbujas adentro del biorreactor, sino más bien, provoca coalescencias de la misma, disminuyendo los valores de $K_L a$.

Además, de acuerdo con los parámetros de la fermentación obtenidos, los valores de velocidad de crecimiento y el tiempo de duplicación en ambas agitaciones son muy parecidos, sin embargo, a 500 rpm se obtiene un rendimiento mayor, logrando formar una generación más de células en una hora menos de fermentación, por lo que se selecciona esa agitación como la óptima para el crecimiento de *K. oxytoca* (cuadro 2).

Prueba con residuos agroindustriales

Los valores del coeficiente volumétrico de transferencia de masa fueron altos para el medio caldo nutritivo ($46,352 \text{ h}^{-1}$) y para el medio caldo piña ($37,023 \text{ h}^{-1}$), no así para el medio de caldo papaya cuyo valor es bastante menor en comparación a los otros tratamientos ($14,579 \text{ h}^{-1}$). La $K_L a$ en el biorreactor, es afectada por factores como las propiedades del medio de cultivo y del gas a utilizar, la geometría del biorreactor, las condiciones de operación y el tipo de microorganismo [46], por lo que, en este caso, las diferencias en los valores obtenidos se relacionan con la densidad, viscosidad y otras propiedades propias de los medios de cultivo, que limitaron la transferencia de oxígeno, con respecto al caldo nutritivo. Además, del mismo modo que en el ensayo de agitación, se observó que al tener un mayor valor de $K_L a$, la tasa de respiración del microorganismo fue mayor (datos no mostrados), seguramente debido a que el microorganismo es anaerobio facultativo [8].

Además, en la figura 2 se observa las cinéticas de crecimiento por conteo celular. Se evidencia que *K. oxytoca* logró alcanzar concentraciones de $3,3 \times 10^9$ cél/ml, mientras que el medio caldo piña llegó a una concentración máxima de $2,3 \times 10^8$ cél/ml y el medio caldo papaya a una concentración de $5,4 \times 10^8$ cél/ml. Se ha demostrado que este microorganismo es capaz de crecer de manera óptima bajo diferentes fuentes de carbono como lo son la glucosa, galactosa, fructosa, xilosa y sucrosa, con rendimientos cercanos entre sí [40] es decir, puede utilizar tanto azúcares reductores como no reductores.

El medio caldo piña y caldo papaya se elaboraron a partir de residuos agroindustriales de cáscaras con restos de la fruta, el análisis mediante el método de Trinder determinó que el caldo piña contenía 1,67 g/l de glucosa, el medio papaya contenía 1,57 g/l, mientras que al caldo nutritivo contenía 5 g/l de glucosa. Sin embargo, se reporta que, el corazón de la piña contiene 0,113 g de azúcares reductores por cada gramo de fruto, de los cuales 0,0114 g de éstos corresponden a glucosa [48]. Mientras que para la papaya se reportan 0,0178 gramos de azúcares reductores por cada gramo de la fruta [49].

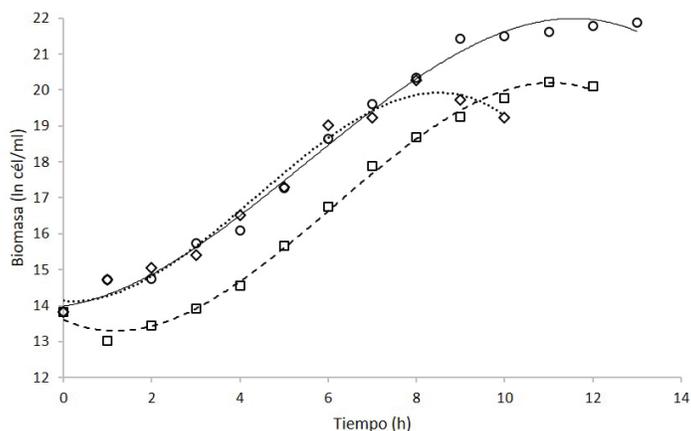


Figura 2. Cinéticas de crecimiento de *Klebsiella oxytoca* en biorreactor en medio de cultivo caldo nutritivo (círculos con línea continua), caldo piña (cuadrados con línea discontinua de puntos) y caldo papaya (rombos con línea discontinua de rayas) mediante el conteo celular en cámara de Neubauer.

A pesar de que se hace necesario realizar una cuantificación de los azúcares totales y azúcares reductores de ambos residuos agroindustriales, o en su defecto de los medios elaborados, con el fin de comprender a plenitud las diversas fuentes de carbono presentes en el medio de cultivo, así como su concentración, se evidencia que los residuos agroindustriales utilizados presentan una combinación de azúcares, algunos de los cuales son reductores, que pueden ser utilizados como fuente de carbono en fermentaciones de *Klebsiella oxytoca*, sin embargo, en este caso en particular, los medios basados en residuos agroindustriales presentaron crecimientos menores. La optimización de estos medios, podría permitir aumentar la biomasa de *K. oxytoca* y, por ende, ser utilizados como alternativa a los medios sintéticos.

Los parámetros obtenidos en las fermentaciones permiten evidenciar que el caldo nutritivo tuvo valores de crecimiento más altos, además que se obtuvieron una menor cantidad de generaciones con tiempos de duplicación más altos (cuadro 2) en comparación con los valores obtenidos en los medios de cultivo basados en residuos agroindustriales.

Cuadro 2. Comparación de parámetros en el biorreactor de 3,7 l bajo diferentes velocidades de agitación y medios de cultivo.

Fermentación	Parámetros				
	μ (h ⁻¹)	T _d (h)	Generaciones	Y _{x/s} (cél l g ⁻¹ ml ⁻¹) ¹	Tiempo de fermentación (h) ²
Caldo nutritivo a 750 rpm	0,99	0,72	8,5 ≈ 9	6,3 x 10 ⁸	10
Caldo nutritivo a 500 rpm	0,96	0,70	9,7 ≈ 10	8,1 x 10 ⁸	9
Caldo piña a 500 rpm	0,87	0,80	7,5 ≈ 8	-	8
Caldo papaya a 500 rpm	0,89	0,78	7,7 ≈ 8	-	9
Modelo ³	1,16	0,60	10,1 ≈ 10	1,3 x 10 ⁹	-

¹Rendimiento fue expresado en células/ml de biomasa / g/l de glucosa

²Tiempo de fermentación para llegar a fase estacionaria

³Parámetros obtenidos se determinaron mediante los datos obtenidos del modelo logístico y la ecuación de Pirt aplicados al tratamiento de caldo nutritivo a 500 rpm.

Modelaje de la cinética de crecimiento

Con los datos obtenidos, se seleccionó el tratamiento de caldo nutritivo a 500 rpm para realizar el modelaje cinético. De acuerdo con los datos del modelo logístico (figura 3a) (ecuación 2), el coeficiente de determinación del modelo con respecto a los datos experimentales fue de un 97,99%, dado por la regresión lineal:

Modelo logístico (ln células/ml) = 0,9236 *(Biomasa experimental ln células/ml) + 1,7626.

Mientras que, para el consumo de glucosa, la ecuación de Pirt (ecuación 4) respecto a los datos experimentales obtuvo un coeficiente de determinación de 95,98% (figura 3b), expresado mediante la regresión lineal:

Ecuación de Pirt (g/l) = 0,9992 *(Glucosa experimental g/l) - 0,1501.

Además, de acuerdo a los datos del modelo, se obtuvieron los parámetros más alto de la velocidad de crecimiento y rendimiento de la biomasa sobre el sustrato, con el menor tiempo de duplicación. Sin embargo, al final llegan a una cantidad similar de generaciones en la fermentación (cuadro 2). Se logró determinar que, en este caso, ambos modelos logran predecir el comportamiento de los datos experimentales.

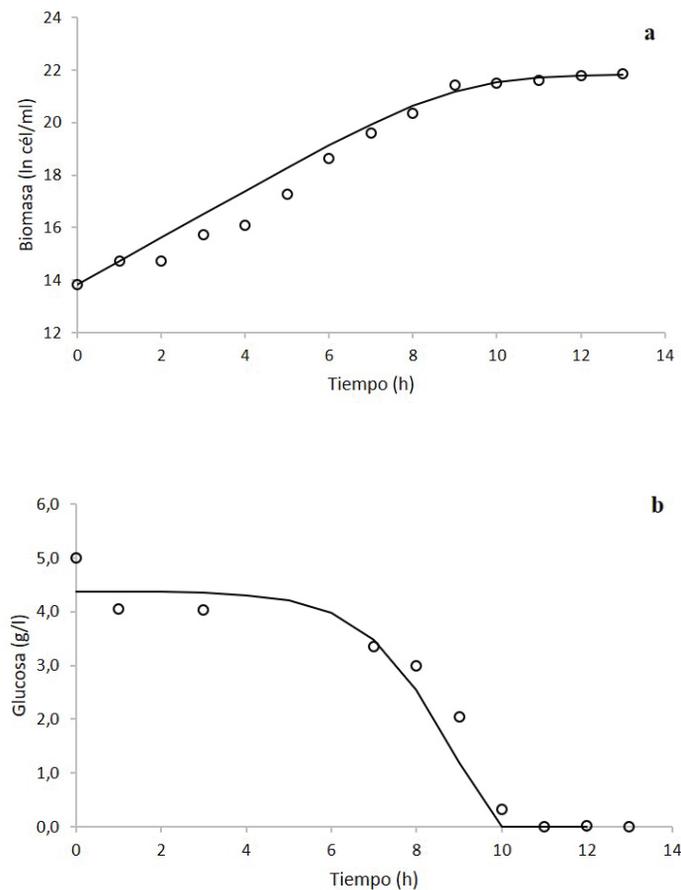


Figura 3. Modelaje de la cinética de crecimiento (a) y consumo de glucosa (b) de *Klebsiella oxytoca* en biorreactor en medio de cultivo caldo nutritivo a 500 rpm mediante el modelo logístico y la ecuación de Pirt, respectivamente. Los círculos son los datos experimentales y la línea continua son los datos del modelo.

Conclusiones

Los cambios en las condiciones de crecimiento de temperatura y agitación para *Klebsiella oxytoca* en matraz provocaron diferencias significativas en la biomasa final obtenida, evidenciando que estos factores son importantes de optimizar para la producción de biomasa de este microorganismo. Sin embargo, al evaluar velocidades de agitación en el biorreactor, se denotó que este parámetro en altas velocidades (superiores a 500 rpm) no mejora el coeficiente volumétrico de transferencia de masa ni las concentraciones finales de biomasa, más bien, produce un aumento en el tiempo de fermentación del microorganismo. Por otro lado, los medios de cultivo basados en residuos agroindustriales pueden ser utilizados para el crecimiento de *Klebsiella oxytoca* debido a su capacidad de utilizar azúcares reductores y no reductores como fuentes de carbono. A pesar de que los valores de biomasa son inferiores al medio definido, se recomienda hacer estudios de la composición química de los residuos agroindustriales que permitan optimizar el medio, al suplementarse con otros componentes, lo que podría aumentar los rendimientos y las biomásas obtenidas. Por último, se logró evidenciar que el modelo logístico y la ecuación de Pirt pueden predecir el comportamiento de las cinéticas de crecimiento y consumo de glucosa de *Klebsiella oxytoca* en biorreactor.

Referencias

- [1] A. Perez, J. Rojas, y J. Fuentes, "Diversidad de bacterias endófitas asociadas a raíces del pasto colosuana (*Bothriochloa pertusa*) en tres localidades del departamento de sucre, Colombia," *Acta Biológica Colombiana*, vol. 15, no. 2, pp. 219-228, 2010.
- [2] I. Afzal, Z. K. Shinwari, S. Sikandar, y S. Shahzad, "Plant beneficial endophytic bacteria: Mechanisms, diversity, host range and genetic determinants," *Microbiological Research*, vol. 221, pp. 36-49, 2019.
- [3] G. Santoyo, G. Moreno-Hagelsieb, M. D. C. Orozco-Mosqueda, y B. R. Glick, "Plant growth-promoting bacterial endophytes," *Microbiological Research*, vol. 183, pp. 92-99, 2016.
- [4] A. Perez, y L. Chamorro, "Bacterias endófitas: una alternativa biológica para el control de *Burkholderia glumae* en el cultivo del arroz en Colombia," *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, vol. 4, no. 1, pp. 172-184, 2012.
- [5] H. Zhang, Q. Zhang, S. Chen, Z. Zhang, J. Song, Z. Long, Y. Yu, y H. Fang, "Enterobacteriaceae predominate in the endophytic microbiome and contribute to the resistome of strawberry," *Science of The Total Environment*, vol. 727, pp. 1-9, 2020.
- [6] M. Bind, y S. Nema, "Isolation and Molecular Characterization of Endophytic Bacteria from Pigeon Pea Along with Antimicrobial Evaluation against *Fusarium udum*," *Appl Microbiol Open Access*, vol. 5, no. 163, pp. 1-12, 2019.
- [7] A. Sánchez-Bautista, C. de León-García, S. Aranda-Ocampo, E. Zavaleta-Mejía, y C. Nava-Díaz, "Bacterias endófitas de la raíz en líneas de maíces tolerantes y susceptibles a sequía," *Revista Mexicana de Fitopatología*, pp. 35-55, 2017.
- [8] L. Singh, M. Cariappa, y M. Kaur, "*Klebsiella oxytoca*: An emerging pathogen?," *Medical Journal Armed Forces India*, vol. 72, pp. 1-3, 2016.
- [9] M. D. Alcántar-Curiel, D. Blackburn, Z. Saldaña, C. Gayosso-Vázquez, N. Iovine, M. A. de la Cruz, y J. A. Girón, "Multi-functional analysis of *Klebsiella pneumoniae* fimbriae types in adherence and biofilm formation," *Virulence*, vol. 4, no. 2, pp. 129-138, 2013.
- [10] A. Ghasemian, A. Mobarez, S. Peerayeh, y A. B. Abadi, "The association of surface adhesin genes and the biofilm formation among *Klebsiella oxytoca* clinical isolates," *New Microbes and New Infections*, vol. 27, pp. 36-39, 2019.
- [11] A. Nava, A. Ronquillo, A. Cabrera, D. Silva, K. Pérez, y C. García, "*Klebsiella oxytoca*: El futuro de la biorremediación," *Revista Materia, Ciencia y Nanociencia*, vol. 2, no. 1, pp. 9-14, 2019.
- [12] D. Zhang, L. Lu, H. Zhao, M. Jin, T. Lü, y J. Lin, "Application of *Klebsiella oxytoca* Biomass in the Biosorptive Treatment of PAH-Bearing Wastewater: Effect of PAH Hydrophobicity and Implications for Prediction," *Water*, vol. 10, no. 6, pp. 1-14, 2018.
- [13] N. H. Avcioglu, y I. S. Bilkay, "Cyanide Removal in Electroplating, Metal Plating and Gold Mining Industries' Wastewaters by Using *Klebsiella pneumoniae* and *Klebsiella oxytoca* Species" vol. 78, no. 1, pp. 5-10, 2019.

- [14] M. C. Ifediegwu, K. C. Agu, N.S. Awah, A. E. Mbachu, C. B. Okeke, C. G. Anaukwu, P. O. Uba, U.C. Ngenegbo, y C. M. Nwankwo, "Isolation, Growth and Identification of Chlorpyrifos Degrading Bacteria from Agricultural Soil in Anambra State, Nigeria," *Universal Journal of Microbiology Research*, vol. 3, no. 4, pp. 46-52, 2015.
- [15] C. Liu, K. Yuan, R. P. Chen, M. J. Chen, y L. Yu, "Biodegradation kinetics of nitriles with easily degradable substrate by *Klebsiella oxytoca* GS-4-08," *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 118, pp. 95-101, 2017.
- [16] I. H. Aljundi, K. M. Khleifat, A. M. Khlaifat, A. M. Ibrahim, K. A. Tarawneh, y S. A. Tarawneh, "Biodegradation of 2-Chlorobenzoic Acid by *Klebsiella oxytoca*: Mathematical Modeling and Effect of Some Growth Conditions," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 49, no. 16, pp. 7159-7167, 2010.
- [17] A. Khalid, J. Arshad, S. Mahmood, I. Aziz, y M. Arshad, "Effect of Chromium Forms on the Biodegradation of Reactive Black-5 Azo Dye by *Psychrobacter* and *Klebsiella* species," *International Journal of Agriculture and Biology*, vol. 17, no. 6, pp. 1260-1264, 2015.
- [18] K. Stylianou, E. Hapeshi, M. I. Vasquez, D. Fatta-Kassinou, y I. Vyrides, "Diclofenac biodegradation by newly isolated *Klebsiella* sp. KSC: Microbial intermediates and ecotoxicological assessment," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 3242-3248, 2018.
- [19] A. Kingsly, D. Jothinathan, y W. R. Thilagaraj, "Degradation of oleic acid and simultaneous bioelectricity production by *Klebsiella oxytoca* ADR 13," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 39, no. 9, pp. 874-882, 2017.
- [20] S. Bhatia, y K. Sharma, "Thermophilic desulfurization of dibenzothiophene and different petroleum oils by *Klebsiella* sp. 13T," *Environ Sci Pollut Res*, vol. 19, pp. 3491-3497, 2012.
- [21] W. Meng, Y. Zhang, M. Cao, W. Zhang, C. Lü, C. Yang, C. Gao, P. Xu, y C. Ma, "Efficient 2,3-butanediol production from whey powder using metabolically engineered *Klebsiella oxytoca*," *Microbial Cell Factories*, vol. 19, no. 162, 2020.
- [22] J. Huang, S. Zhu, L. Zhao, L. Chen, M. Du, C. Zhang, y S. T. Yang, "A novel β -galactosidase from *Klebsiella oxytoca* ZJUH1705 for efficient production of galacto-oligosaccharides from lactose," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 104, no. 14, pp. 6161-6172, 2020.
- [23] N. Li, H. Chou, L. Yu, y Y. Xu, "Cadaverine production by heterologous expression of *Klebsiella oxytoca* lysine decarboxylase," *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, vol. 19, no. 6, pp. 965-972, 2014.
- [24] A. Pavlova, M. Leontieva, T. Smirnova, G. Kolomeitseva, A. Netrusov, y E. Tsavkelova, "Colonization strategy of the endophytic plant growth-promoting strains of *Pseudomonas fluorescens* and *Klebsiella oxytoca* on the seeds, seedlings and roots of the epiphytic orchid, *Dendrobium nobile* Lindl," *Journal of Applied Microbiology*, vol. 123, no. 1, pp. 217-232, 2017.
- [25] C. W. Buddhi, A. Kkiu, y Y. Min-Ho, "Isolation and characterization of phosphate solubilizing bacteria (*Klebsiella oxytoca*) with enhanced tolerance to environmental stress," *African Journal of Microbiology Research*, vol. 8, no. 31, pp. 2970-2978, 2014.
- [26] F. Ibañez, Z. Machado, H. Soto, E. Segal, y H. Ramos, "Endophytic and rhizospheric enterobacteria isolated from sugar cane have different potentials for producing plant growth-promoting substances," *Plant Soil*, vol. 353, pp. 409-417, 2012.
- [27] Y. Liu, Z. Shi, L. Yao, H. Yue, H. Li, y C. Li, "Effect of IAA produced by *Klebsiella oxytoca* Rs-5 on cotton growth under salt stress," *The Journal of General and Applied Microbiology*, vol. 59, no. 1, pp. 59-65, 2013.
- [28] J. D. C. Martínez-Rodríguez, M. D. L. Mora-Amutio, L. A. Plascencia-Correa, E. Audelo-Regalado, F. R. Guardado, E. Hernández-Sánchez, Y. Peña-Ramírez, A. Escalante, M. Beltrán-García, y T. Ogura, "Cultivable endophytic bacteria from leaf bases of *Agave tequilana* and their role as plant growth promoters," *Brazilian Journal of Microbiology*, vol. 45, no. 4, pp. 1333-1339, 2014.
- [29] H. S. Al-Hussini, A. Y. Al-Rawahi, A. A. Al-Marhoon, S. A. Al-Abri, I. H. Al-Mahmooli, A. M. Al-Sadi, y R. Velazhahan, "Biological control of damping-off of tomato caused by *Pythium aphanidermatum* by using native antagonistic rhizobacteria isolated from Omani soil," *Journal of Plant Pathology*, vol. 101, no. 2, pp. 315-322, 2018.
- [30] P. Durán, J. J. Acuña, M. A. Jorquera, R. Azcón, C. Paredes, Z. Rengel, Z. y M. D. Mora, "Endophytic bacteria from selenium-supplemented wheat plants could be useful for plant-growth promotion, biofortification and *Gaeumannomyces graminis* biocontrol in wheat production," *Biology and Fertility of Soils*, vol. 50, no. 6, pp. 983-990, 2014.
- [31] C. Castro, A. Hernández, L. Alvarado, y D. Flores, "DNA Barcodes in Fig Cultivars (*Ficus carica* L.) Using ITS Regions of Ribosomal DNA, the psbA-trnH Spacer and the matK Coding Sequence," *American Journal of Plant Science*, vol. 6, pp. 95-102, 2015.

- [32] L. Alvarado-Marchena, A. Schmidt-Durán, C. Alvarado-Ulloa, R. Chacón-Cerdas, y D. Flores-Mora, "Molecular characterization of the endophytic bacteria found in the fig crops (*Ficus carica* var. Brown Turkey) in Costa Rica," *Journal of Agricultural and Biological Science*, vol. 11, no. 7, pp. 290-297, 2016.
- [33] Minitab Inc, Versión 16, Estados Unidos, 2015.
- [34] Tico Lab S. A., "Determinación de Glucosa: Método de Trinder," Tibás, San José, 2002.
- [35] A. Zaker, M. Pazouki, y M. Vossougi, "Development of kinetic model for xanthan production in a laboratory-scale batch fermentor," *Iran J Sci Technol Trans Sci*, vol. 42, pp. 261-266, 2018.
- [36] H. Bachmann, F. J. Bruggeman, D. Molenaar, F. B. dos Santos, y B. Teusink, "Public goods and metabolic strategies," *Current Opinion in Microbiology*, vol. 31, pp. 109-115, 2016.
- [37] S. J. Pirt, "The maintenance energy of bacteria in growing cultures," *Proc R Soc Lond Ser B Biol Sci*, vol. 163, pp. 224-231, 1965.
- [38] A. Quesada, "Principios de Biotecnología Microbiana," San José, Costa Rica, Editorial UCR, Pp: 60-82, 2013.
- [39] S. Brisse, F. Grimont, y P. Grimont, "The Genus *Klebsiella*", en *The Prokaryotes, Volume 6: Proteobacteria: Gamma Subclass*, M. Dworkin, S. Falkow, E. Rosenberg, K. H. Schleifer, y E. Stackebrandt, eds, Springer, New York, Estados Unidos, pp. 159-196, 2006.
- [40] S. Cho, K. D. Kim, J. H. Ahn, J. Lee, S. W. Kim, y Y. Um, "Selective production of 2,3-butanediol and acetoin by Newly isolated bacterium *Klebsiella oxytoca* M1," *Appl Biochem Biotechnol*, vol. 170, pp.1922-1933, 2013.
- [41] J. H. Cho, C. Rathnasingh, H. Song, B. W. Chung, H. J. Lee, y D. Seung, "Fermentation and evaluation of *Klebsiella pneumoniae* and *K. oxytoca* on the production of 2,3-butanediol," *Bioprocess Biosyst Eng*, vol. 35, pp. 1081-1088, 2012.
- [42] M. L. Alvarado-Gutiérrez, N. Ruiz-Ordaz, J. Galíndez-Mayer, E. Curiel-Quesada, y F. Santoyo-Tepole, "Degradation kinetics of carbendazim by *Klebsiella oxytoca*, *Flavobacterium johnsoniae*, and *Stenotrophomonas maltophilia* strains," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, pp. 28518–28526, 2020.
- [43] P. Tang, Y. Hseu, H. Chou, K. Huang, y S. Chen, "Proteomic analysis of the effect of cyanide on *Klebsiella oxytoca*," *Curr microbial*, vol. 60, pp. 224-228, 2010.
- [44] X. J. Ji, H. Huang, J. Du, J. G. Zhu, L. J. Ren, N. Hu, y S. Li, "Enhanced 2,3-butanediol production by *Klebsiella oxytoca* using a two-stage agitation speed control strategy," *Bioresource Technology*, vol. 100, pp. 3410-3414, 2009.
- [45] S. Cho, T. Kim, H. M. Woo, Y. Kim, J. Lee, y Y. Um, "High production of 2,3-butanediol from biodiesel-derived crude glycerol by metabolically engineered *Klebsiella oxytoca* M1," *Biotechnol Biofuels*, vol. 8, no. 146, pp. 1-12, 2015.
- [46] G. Buitrago, A. M. Otálvaro, y P. G. Duarte, "Evaluación de la transferencia de oxígeno en un biorreactor convencional con aireador externo," *Rev Colomb Biotecnol*, vol. 15, no. 2, pp. 106-114, 2013.
- [47] N. González, J. Zamora, L. Ramos, E. Pérez, C. Pérez, y E. Salazar, "Transferencia y consumo de oxígeno en el cultivo de alta densidad del microorganismo con actividad bionemática *Tsukamurella paurometabola*, C924," *Revista Tecnología Química Edición Especial*, pp. 162-168, 2009.
- [48] L. Montoya-Pérez, y E. Durán-Herrera, "Producción de hidrógeno a partir de la fermentación de residuos agroindustriales de la piña," *Tecnología en Marcha*, vol. 30, no.3, pp. 106-118, 2017.
- [49] J. Concha, A. Guevara, y M. Araujo, "Obtención de polvo de papaya de monte (*Carica pubescens*) por atomización," *Revista Ingeniería UC*, vol. 9, no. 1, 2002.

Aislamiento de la región promotora del gen *FaPAL2* de *Fragaria x ananassa* Cv. “Camino Real” y evaluación de su funcionalidad en respuesta a la irradiación UV-C

Isolation of the promoter region of the *FaPAL2* gen of *Fragaria x ananassa* Cv. “Camino Real” and evaluation of it’s functionality in response to UV-C irradiation

Stephannie Masís-Ramos¹, Jesús Alonso Garduño-Hernández²,
Edmundo Lozoya-Gloria³, Giovanni Garro-Monge⁴

Fecha de recepción: 24 de agosto de 2020
Fecha de aprobación: 2 de diciembre de 2020

Masís-Ramos, S; Garduño-Hernández, J.A; Lozoya-Gloria, E; Garro-Monge, G. Aislamiento de la región promotora del gen *FaPAL2* de *Fragaria x ananassa* cv. “Camino real” y evaluación de su funcionalidad en respuesta a la irradiación uv-c. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-4 Octubre-Diciembre 2021. Pág 105-117.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i4.5207>



- 1 Associate informatics engineer, Astrix. Costa Rica.
Correo electrónico: stephie.masis1529@gmail.com
- 2 Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Irapuato. México.
Correo electrónico: alonso.garduno@cinvestav.mx
- 3 Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Irapuato. México.
Correo electrónico: edmundo.lozoya@cinvestav.mx
- 4 Centro de Investigación en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: ggarro@tec.ac.cr

Palabras clave

PAL; flavonoides; *FaPAL2*; luz UV-C; promotor; TAIL PCR; *Fragaria ananassa*; gen *GUS*.

Resumen

La proteína fenilalanina amonio-liasa o *PAL* es una enzima clave en la ruta de síntesis de los flavonoides; en fresa se han reportado 6 genes que la codifican, entre ellos el *FaPAL2*. Los flavonoides son metabolitos secundarios que participan en la protección contra luz UV de las plantas, además, son de gran interés farmacéutico debido a las propiedades antioxidantes, antibacterianas, antiinflamatorias, antimutagénicas y anticancerígenas que poseen. Se ha correlacionado el aumento de flavonoides en fresas irradiadas con luz UV-C con altos niveles de expresión del gen *FaPAL*. Para poder estudiar y controlar la expresión de genes de interés es indispensable conocer la funcionalidad de los promotores, por lo que la presente investigación se planteó por objetivo identificar y aislar el promotor del gen *FaPAL2* mediante la técnica TAIL PCR, para posteriormente evaluar su actividad ante respuesta a la luz UV-C en frutos de *Fragaria x ananassa* cv. "Camino Real" vía *Agrobacterium tumefaciens* utilizando el gen reportero *GUS*. Se consiguió aislar y secuenciar el promotor del gen *FaPAL2*, para después generar un constructo genético y evaluar su expresión genética transitoria en frutos agroinfiltrados de fresa. Se identificó una tinción histológica positiva de los frutos agroinfiltrados, tanto irradiados como no irradiados, lo que indica que el promotor del gen *FaPAL2* actúa positivamente en respuesta a luz UV-C, pero no de manera exclusiva.

Keywords

PAL; flavonoids; *FaPAL2*; UV-C light; promoter; TAIL PCR; *Fragaria ananassa*; *GUS* gene.

Abstract

The phenylalanine ammonium lyase protein or *PAL* is a key enzyme in the pathway of flavonoid synthesis; in strawberry 6 genes have been reported that encode it, including *FaPAL2*. Flavonoids are essential secondary metabolites for protection against UV light in plants, furthermore, they are of great pharmaceutical interest due to their antioxidants, antibacterial, anti-inflammatory, antimutagenic and anticancer properties. Increase in flavonoid compounds in strawberries irradiated with UV-C light has been correlated with high levels of *FaPAL* gene expression. In order to study and control the expression of genes of interest, it is indispensable to know the promoters functionality, so the present investigation aimed to identify and isolate the *FaPal2* gene promoter using the TAIL PCR technique, to later assess its activity upon response to UV-C light in *Fragaria x ananassa* cv. "Camino Real" fruits via *Agrobacterium tumefaciens* using the *GUS* reporter gene. The promoter of the *FaPAL2* gene was successfully isolated and sequenced, and later used to generate a genetic construct and evaluate its transient genetic expression in agro-infiltrated strawberry fruits. A positive histological staining was identified in the agro-infiltrated fruits, both irradiated and non-irradiated, indicating that the *FaPAL2* gene promoter acts positively in response to UV-C light, but not in an exclusive manner.

Introducción

Fragaria x ananassa es el nombre con el que se conoce a todas las variedades de fresa que se cultivan mayoritariamente en la actualidad [1]. México es el tercer proveedor de fresa fresca al mercado internacional; según datos de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo

Rural, Pesca y Alimentación [2] en el año 2016 se produjeron 468.25 miles de toneladas de la fruta en el país, y se estima que para el 2030 la producción generaría un ingreso de 866.71 millones de dólares.

Numerosos programas de mejora de este cultivo se han dirigido a optimizar las características del fruto, la resistencia a patógenos y adversidades climáticas [3]. No obstante, la biotecnología se ha planteado objetivos más específicos para potenciar su efecto beneficioso sobre la salud humana, debido al contenido de vitaminas, minerales y antioxidantes de la fruta [4], además de ser fuente de metabolitos secundarios como las antocianinas, ácidos fenólicos, taninos y flavonoides [5].

Los flavonoides son antioxidantes importantes con diversos efectos sobre la salud humana, entre ellos, efectos antivirales, anticancerígenos, antiinflamatorios y antialérgicos [6], que han sido estudiados para tratar enfermedades como el Alzheimer, la aterosclerosis, el cáncer, entre otros [7]. Otras investigaciones se han centrado en entender el mecanismo de síntesis de estos compuestos, y así buscar vías para su sobreproducción en sistemas vegetales. Dentro de su ruta biosintética, la enzima PAL juega un rol clave, debido a que es la primera enzima de la ruta de los fenilpropanoides que eventualmente genera flavonoides [8]. En fresa, se reportan 6 secuencias de los genes *PAL*, denominados *FaPAL1*, *FaPAL2*, *FaPAL3*, *FaPAL4*, *FaPAL5* y *FaPAL6* [9].

En trabajos previos realizados en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN) de Irapuato, se ha investigado la respuesta de los genes *FaPAL2* y *FaPAL6* de *F. x ananassa* cv. "Camino Real", y se encontró que estos eran expresados específicamente por iluminación con luz UV-C [10], lo que propone una vía para la sobreexpresión del gen *PAL* y producción de flavonoides. Sin embargo, se desconoce la funcionabilidad de las regiones río arriba del gen *FaPAL2*, principalmente porque no se reportan las secuencias.

Se han propuesto varias metodologías para el aislamiento de promotores genéticos, siendo una de ellas el PCR térmico asimétrico entrelazado, o TAIL PCR, desarrollado por Liu y Whittier [11], donde la amplificación se lleva a cabo entrelazando ciclos de PCR de alta rigurosidad con ciclos de rigurosidad baja, empleando *primers* degenerados y específicos para amplificar las secuencias objetivo de manera preferencial. Esta técnica se ha empleado exitosamente para el aislamiento de regiones promotoras de tres genes *PAL* de la planta *D. bulbifera* [12].

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad identificar regiones promotoras del gen *FaPAL2* de *Fragaria x ananassa* cv. "Camino Real" con el fin de evaluar su funcionabilidad en respuesta a la luz UV-C en frutos de fresa.

Metodología

Todos los experimentos fueron realizados en el Laboratorio de Bioquímica y Biología Molecular de Productos Naturales de Plantas del CINVESTAV-IPN Irapuato, durante el segundo semestre del 2019.

Material vegetal

Los frutos de fresa de la variedad se colectaron del invernadero del CINVESTAV-IPN, intentando cosechar aquellos que estuvieran iniciando el proceso de maduración. Se cosecharon frutos rojos, blancos y de coloración intermedia realizando un corte de 5 cm del pedúnculo, y para la agroinfiltración, se lavaron con agua desionizada estéril, después con una solución de cloro al 5% y, una vez en cámara de flujo laminar, un lavado con etanol al 70%, y último enjuague con agua desionizada estéril.

TAIL PCR

Se extrajo el material genético de hojas de *F. x ananassa* cv. “Camino Real” empleando el kit de E.Z.N.A. Plant DNA DS Mini Kit (Omega Bio-Tek, EUA), aplicando la elución en buffer TE. Con el material extraído se realizó un TAIL PCR siguiendo la metodología de Terauchi y Kahl (2000), empleando los 5 *primers* aleatorios “*forward*” propuestos por los autores, y 3 *primers* específicos “*reverse*” diseñados en el programa Primer3Plus para una región del gen *FaPAL2* cerca del inicio de la transcripción (cuadro 1).

Para el primer ciclo de PCR se utilizó como templado ADN genómico extraído de hoja de fresa, en el segundo ciclo se utilizó como templado una dilución 1/10 del producto del primer ciclo de PCR, y en el tercer ciclo se empleó el producto del segundo ciclo de PCR sin diluir. Para cada ciclo se trabajaron 5 muestras distintas, una por cada *primer forward*, además, en el primer ciclo de PCR se empleó el *primer reverse* A, en el segundo ciclo el *primer* B, y en el tercer ciclo el *primer* C.

Cuadro 1. Secuencias de *primers* específicos (*reverse*) utilizados en el TAIL-PCR.

PRIMER	SECUENCIA (5' - 3')	TM (°C)	%GC
A	CTTGGTTCGTCTGTGGGAGG	67.0	60.0
B	CAATAGTCAAGGTCTTTCCACCG	65.5	47.8
C	CAGAGAATGTCCAAGGAACC	61.1	50.0

Se trabajó con reacciones de 25 μ L, y el PCR se llevó a cabo siguiendo el mismo perfil térmico reportado por los autores, en un termociclador T100™ Thermal Cycler de BIO RAD.

Transformación de *Escherichia coli* TOP10 con el vector pCR4-TOPO modificado

Los productos del tercer ciclo de PCR obtenidos en la metodología anterior se analizaron mediante una electroforesis para determinar las muestras con mayor cantidad de fragmentos separados. Estos se clonaron en un vector pCR4-TOPO, empleando el Kit de Clonación de TOPO TA para secuenciación. Siguiendo el protocolo suministrado por el Kit, se prepararon reacciones de 6 μ L para cada uno de los productos del TAIL PCR.

Los plásmidos TOPO® con los fragmentos de interés se utilizaron para la transformación de células de *E. coli* quimiocompetentes. Para esto, se añadieron 10 μ L de plásmido a un tubo con 100 μ L de células competentes. Los tubos se mantuvieron en baño de hielo durante 60 minutos, seguidamente se colocaron en termobloque a 42°C durante 3 minutos, y se regresaron al hielo durante 10 minutos. Transcurrido este lapso, se añadió a cada tubo 300 μ L de medio LB sin antibióticos, y se incubaron a 37°C durante 60 minutos, a 140 rpm. Finalmente, se tomaron alícuotas de 200, 100 y 50 μ L de cada tubo, y se sembraron en placas Petri con medio LB semisólido suplementado con kanamicina (100 mg/mL) y estreptomycinina (200 mg/mL), y se incubaron a 37°C durante toda la noche. La confirmación de transformantes se realizó mediante un PCR de colonia, esperando obtener fragmentos similares a los obtenidos en el tercer ciclo del TAIL PCR. c

Purificación de los fragmentos del TAIL PCR del vector pCR4-TOPO

Se realizó una extracción de plásmido de los cultivos transformados con el fragmento de interés, utilizando el Kit PureLink™ Quick Plasmid Miniprep de Invitrogen™. Una vez obtenidos los plásmidos purificados, estos se enviaron a secuenciar a MacroGen Inc. (sucursal de Corea del Sur) y, por otro lado, se procedió a amplificar el constructo genético que será clonado en el vector pBl121, y debido a que se desconoce la posición en la que el fragmento se introduce

en el vector TOPO, se diseñaron 2 pares de *primers* distintos (cuadro 2), para asegurar que el extremo que contenga el ATG de iniciación del fragmento de interés se inserte de modo que quede flanqueando el gen *GUS* del vector pBI121. De las 2 reacciones de PCR, solamente una deberá generar amplicones.

Cuadro 2. Secuencias de *primers* utilizados en la PCR para amplificar los fragmentos de interés de los plásmidos pCR4-TOPO.

PCR	PRIMER	SECUENCIA (5'- 3')	TM (°C)	%GC
1	C15 <i>Forward</i>	GGTTCCTTGGACATTCTCTGCCTAGGTT	72.0	50.0
	M15 <i>Reverse</i>	TTAAGCTTCACTCATTAGGCACCCAGG	73.2	50.0
2	M15 <i>Forward</i>	AAAAGCTTGTAACGACGGCCAG	69.5	45.8
	C15 <i>Reverse</i>	AAGGATCCCAGAGAATGTCCAAGGAACC	73.6	50.0

Los amplificados resultantes se corrieron en una electroforesis y se procedió a purificar las bandas respectivas, empleando el Kit de Ilustra “Purificación de ADN de PCR y Bandas de Gel”, siguiendo el protocolo para la purificación de ADN proveniente de geles de agarosa y buffer TAE.

Transformación de *Agrobacterium tumefaciens* LBA4404 con el vector pBI121 modificado

Tanto el constructo de interés aislado en el paso anterior, como el plásmido pBI121 fueron digeridos con las enzimas BamHI y HindIII en reacciones de 20 µL, y dichas reacciones se utilizaron en la ligación de ambas fracciones genéticas, en reacciones de 20 µL, siguiendo los protocolos del sistema de clonación de enzimas de restricción Anza™ de Invitrogen™. Este vector pBI121 modificado se empleó para transformar, en primera instancia, células de *E. coli* TOP10 quimiocompetentes, para multiplicar el vector, y después se realizó una Miniprep, para finalmente emplear los plásmidos en la transformación de *A. tumefaciens* LBA4404.

La solución de plásmidos se dializó en agua destilada estéril empleando membranas de diálisis de 0.025 µm de la marca Merck™. Se recuperaron 7 µL del plásmido y se añadieron a un tubo con 40 µL de células electrocompetentes de *A. tumefaciens*; la mezcla se transfirió a una celda de electroporación, y esta se electroporó a 2.5 V. Se añadieron 450 µL de medio YEB, y se transfirió la mezcla a tubos de 1.5 mL, donde permanecieron en incubación a 28 °C a 140 rpm durante 3 horas. Finalmente se sembraron las células en placas Petri con medio YEB suplementado con kanamicina (50 mg/mL) y rifampicina (50 mg/mL), y se incubaron a 28°C durante 2 días. La confirmación de transformantes se realizó mediante un PCR de colonia.

Agroinfiltración de frutos de *Fragaria ananassa* cv. “Camino Real”

Se emplearon las colonias transformantes de *A. tumefaciens* con el constructo genético de interés para preparar un cultivo líquido en medio YEB suplementado con kanamicina y rifampicina, hasta que este alcanzó una OD₆₀₀ entre 0.8 y 1. Los cultivos se centrifugaron y el pellet se resuspendió en medio MMA hasta alcanzar una OD₆₀₀ entre 2 y 2.4. El cultivo se recuperó empleando una jeringa de 1 mL estéril, y se introdujo verticalmente en la parte superior de los frutos cerca del pedúnculo, y se procedió a inyectar entre 0.4 y 0.8 mL de cultivo bacteriano. Los pedúnculos se sellaron con un algodón humedecido con agua desionizada estéril, los frutos se colocaron en frascos de vidrio, y se incubaron a 27 °C con un fotoperiodo de 16 horas luz / 8 horas oscuridad durante 7 días.

Tratamiento con luz UV-C

A partir del tercer día de incubación, se seleccionaron los frutos y se cortaron rodajas de aproximadamente 2 mm de grosor en cámara de flujo laminar. Las rodajas se incubaron con una solución de cefotaxima (500 mg/L) por 10 minutos, se les secó el exceso de solución con un papel toalla, y cada grupo de rodajas se separó en dos. Solamente uno de ellos se colocó en rejillas metálicas dentro de una cámara con lámparas fluorescentes UV-C de 15 W (Tecno Lite G15T8), y permanecieron en irradiación durante 14 minutos.

Evaluación del sistema reportero GUS

De cada grupo de rodajas, cada mitad (irradiadas y no irradiadas) se colocó por separado en un tubo cónico de 15 mL, y a este se le añadió la solución X-Gluc hasta cubrir los tejidos. Los tubos se cubrieron con papel aluminio, y se incubaron a 37 °C durante 18 horas. Posteriormente, se decantó el X-Gluc, se secó el exceso de solución, y se evaluó la presencia o ausencia de coloración azul en los tejidos.

Resultados

TAIL PCR

A partir de los ciclos de amplificación del TAIL PCR se obtuvieron los fragmentos amplificados como resultado del tercer ciclo que se observan en la figura 1.

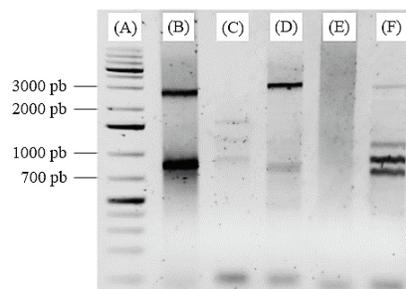


Figura 1. Electroforesis en gel de agarosa de la tercera reacción del TAIL-PCR. Corrida del marcador molecular GeneRuler™ 1 kb (A) y de los amplicones obtenidos con el *primer reverse* C y el *primer forward* AP103 (B), AP122 (C), AP138 (D), AP140 (E) y AP158 (F).

Purificación de los fragmentos del TAIL PCR del vector pCR4-TOPO recombinante

Se empleó el producto AP158 del TAIL PCR (figura 1.F) debido al menor tamaño de los amplicones, para facilitar su clonación en el vector pCR4-TOPO y transformación de *E. coli*. A partir de un PCR de colonia se confirmó que una colonia clonó el fragmento de interés de aproximadamente 1000 pb; se realizó la miniprep de esta colonia y PCR del plásmido con los *primers* M15Fw-C15Rv y C15Fw-M15Rv para definir la direccionalidad del inserto.

Se determinó que los *primers* M15Fw y C15Rv generaron el amplicón de interés, por lo que se purificó dicha banda y se analizó mediante una electroforesis (figura 2). Dicho fragmento se clonó en el plásmido pBI121 y el plásmido recombinante se empleó para transformar *A. tumefaciens*.

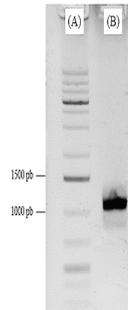


Figura 2. Electroforesis en gel de agarosa del fragmento de interés. Corrida del marcador molecular GeneRuler™ 1 kb (A), y el amplicón del vector AP158.J resultante de la purificación de la banda.

Evaluación del sistema reportero GUS en frutos de fresa agroinfiltrados

Se preparó el medio de agroinfiltración a partir de la colonia AP158.J de *A. tumefaciens* que contenía el constructo genético de interés (banda purificada del gel de la figura 2). La tinción histológica de los tejidos con X-Gluc después de 4 a 7 días de incubación se observa en la figura 3.

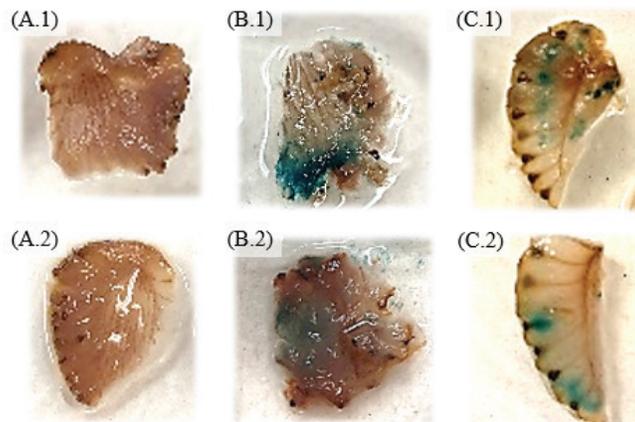


Figura 3. Expresión transitoria del gen GUS en frutos de fresa infectados con *A. tumefaciens*. Controles: Negativo sin irradiar (A.1), negativo irradiado (A.2), positivo sin irradiar (B.1), positivo irradiado (B.2). Agroinfiltrados: Con el constructo AP158.J sin irradiar (C.1), con el constructo P.AP158.J irradiado (C.2). La evaluación de los controles se efectuó en el día 4 y la de los agroinfiltrados en el día 7, posteriores al tratamiento de agroinfiltración..

Análisis *in silico* del promotor de *FaPAL2*

Con el resultado de la secuenciación del vector pCR4™-TOPO™ ligado al fragmento AP158.J, se realizó una comparación *in silico* entre la secuencia obtenida con la secuencia del gen *FaPAL2* (accesión KX450227.1) utilizando la base de datos de NCBI. Se determinó una coincidencia del 100% para la región situada corriente abajo del sitio de inicio de la transcripción, lo que comprueba que se aisló la región promotora del gen *FaPAL2*, generando una secuencia de 551 pb.

Esta secuencia se sometió a un análisis bioinformático para identificar elementos regulatorios relacionados con la respuesta a luz utilizando la plataforma y base de datos PLACE (<https://www.hsls.pitt.edu/obrc/index.php?page=URL1100876009>). Como resultado de este análisis, se lograron identificar ciertos elementos, que se resumen en el cuadro 3.

Cuadro 3. Motivos relacionados con la regulación por exposición a luz encontrados en el promotor del gen *FaPAL2*.

Motivo	Secuencia consenso	Distancia a partir del ATG (cadena +/-)
Caja-GATA	GATA	-506 (+)
Caja PAL (L)	(C/T)C(C/T)(C/T)ACC(A/T)ACC	-420 (+)
Caja L-Like	ACC(A/T)(A/T)CC	-217(+), -254 (+), -413 (+)
GT1	G(A/G)(A/T)AA(A/T)	-112 (+), -188 (-), -261 (-)
SORLIP1AT	GCCAC	-232 (+), -242 (-), -271 (+)

(+), indica la cadena codificante en sentido 5' hacia 3'; (-), indica la cadena complementaria de 3' hacia 5'.

Discusión

TAIL PCR

El ADN molde empleado en la primera reacción del TAIL PCR demostró tener la integridad y calidad idónea para el procedimiento ya que, como resultado de la tercera reacción del TAIL PCR, se obtuvieron múltiples amplicones, esto utilizando 4 de los 5 oligonucleótidos aleatorios. En la figura 1 se observan bandas definidas y sin barridos, que van desde los 700 a 3000 pb, sin embargo, se determinó que los *primers* AP103, AP138 y AP158 (figuras 1.B, 1.D y 1.F) generaron los amplificadores deseables para su posterior clonación en un vector, ya que se consideran como buenos candidatos del promotor del gen *FaPAL2*. Esto basándose en otra investigación [13], donde compararon dos técnicas, entre ellas el TAIL PCR, para aislar la región promotora del gen *RbcS* de una microalga, esto porque el TAIL es uno de los métodos más utilizados para aislar regiones flanqueantes de secuencias conocidas, a pesar de que no se garantiza la ausencia de problemas por inespecificidad u obtención de bajas cantidades de amplicones.

Esta última afirmación puede explicar por qué el *primer* AP122 (figura 1.C) generó bandas sumamente tenues, y que el *primer* AP140 (figura 1.E) no generó amplificadores. Importante destacar que la disminución en las diluciones de los productos de PCR para la segunda y tercera reacción evitó la generación de patrones manchados o amplicones tenues o barridos en la corrida de la tercera reacción, como los que se obtuvieron por [12] al correr en electroforesis los productos de la segunda reacción. Debido a que el ciclaje del TAIL se efectúa tanto en la segunda como en la tercera reacción para eliminar ruido de fondo y productos inespecíficos, esto sugiere que se requirieron productos de PCR más concentrados para eliminar dichos problemas en la tercera reacción.

Purificación de los fragmentos del TAIL PCR del vector pCR4-TOPO recombinante

Una vez obtenido y confirmado el amplicón de interés clonado en el vector pCR4-TOPO, fue necesario aplicar una estrategia de 2 pares de *primers* para amplificar los fragmentos y clonarlos con la direccionalidad correcta en el vector pBI121. El inserto está flanqueado por la secuencia del *primer C* (cuadro 1) en un extremo, y el *primer* AP158 en el otro; debido a que la secuencia de los insertos es desconocida, es imposible determinar en qué dirección se insertó el fragmento. Por otro lado, para asegurar que el ATG del fragmento se insertara en dirección al gen *GUS* del vector pBI121, se utilizó la secuencia de reconocimiento de las enzimas BamHI (flanquea posición de ATG) y HindIII (flanquea posición del promotor de *FaPAL2*).

De esta forma, si el fragmento se insertó en dirección AP-Inserto-*primer C*, debería de generar amplificadas con los *primers* M15Fw y C15Rv (cuadro 2), contrario a si el fragmento se insertó en dirección *primer C*-Inserto-*primer AP*, caso en el que se amplificaría con los *primers* C15Fw y M15Rv (cuadro 2). El *primer C*15 empleado en ambos casos está flanqueado por la secuencia de reconocimiento de BamHI, de forma que, independientemente de la dirección del fragmento, al digerirlo con esta enzima, se asegura que el sitio de inicio de la transcripción (ATG) se inserte de modo que quede corriente arriba el gen *GUS* en el plásmido pBI121. Esto se ejemplifica de manera más gráfica en la figura 4.

Al obtener una amplificación positiva con los *primers* M15Fw y C15Rv al amplificar el vector AP158.J, se confirma que el fragmento se insertó en dirección *primer AP*-Inserto-*primer C*. Este fragmento, de aproximadamente 1000 pb, coincidió con los resultados previos de TAIL PCR y PCR de colonia, por lo que se descarta la generación de productos inespecíficos durante la PCR y, asociado a esto, se comprueba que la concentración de los *primers* y de la enzima utilizada, resultó ser la óptima para la amplificación, tal y como afirma en Díaz *et al.* [14].

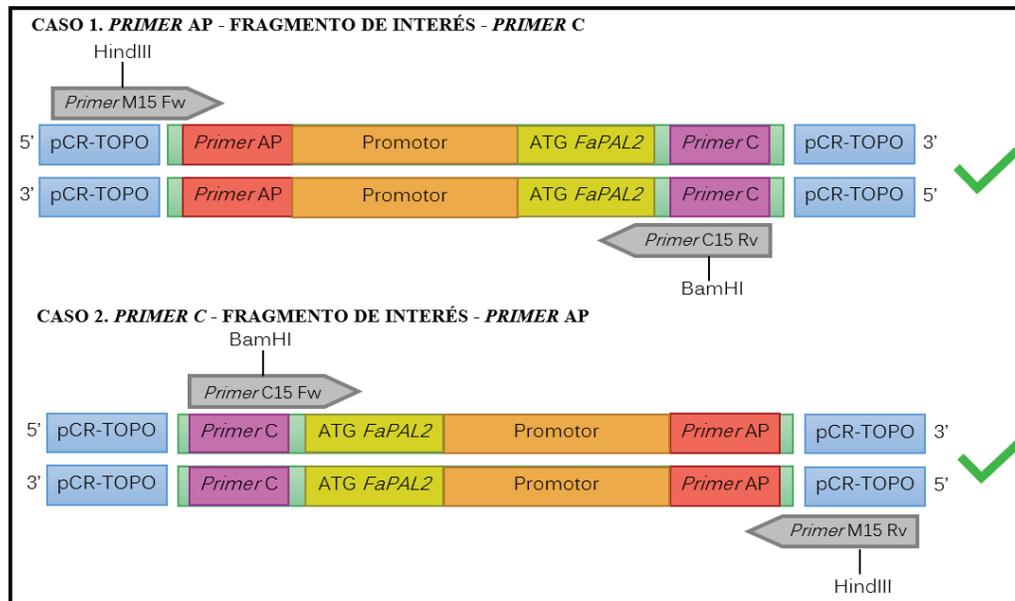


Figura 4. Representación gráfica de los casos de amplificación para los fragmentos de interés dentro del vector pCR4™-TOPO™.

Este resultado permitió determinar que la amplificación generada consiste en el constructo de interés con los elementos genéticos necesarios para ser introducido en el vector pBI121, por lo que fue necesario purificar dicha amplificación, ya que el producto de PCR no puede utilizarse directamente en la digestión o ligación porque presenta otros fragmentos y secuencias. Al cortar y purificar la banda, se obtiene un producto limpio de PCR, y al analizarlo mediante electroforesis, se obtiene una banda que garantiza la integridad de únicamente la construcción genética de interés, la cual se observa en la figura 2.

Evaluación del sistema reportero GUS en frutos de fresa agroinfiltrados

Los ensayos de expresión transitoria del gen *GUS* generaron resultados exitosos, a pesar de la variabilidad en el tamaño y madurez de los frutos de fresa. Como se observa en la figura 3.A, los controles negativos no generaron un cambio de coloración en la solución de X-Gluc, lo que indica la ausencia del gen *GUS*. Contrariamente al viraje de color que se obtuvo en el control positivo (figura 3.B), lo que manifiesta la expresión de la β -glucuronidasa codificada por el gen *GUS*, que hidrolizó el 5-bromo-4-cloro-3-indolil- β -D-glucorónido o X-Gluc [15, 16]. Estos resultados definen la confiabilidad del método para determinar la expresión del gen de interés, en este caso, promotores que responden a luz UV. Este sistema de gen reportero ha sido ampliamente utilizado en plantas transgénicas, permitiendo determinar de la expresión genética espacial y temporal [17].

Con respecto a los frutos transgénicos, transformados con la construcción AP158.J, en todos, a excepción de uno, se detectó una expresión positiva de *GUS* (figura 3.C). La expresión negativa se atribuye a una limitante persistente a lo largo del protocolo relacionada con la integridad de los frutos, lo cual pudo repercutir en la ausencia de coloración azul. Esta dificultad suele ocurrir en la transformación de frutos carnosos, debido a la presencia de grandes células parenquimáticas, lo cual puede fácilmente alterar los tejidos al manipularlos [18], con jeringas, por ejemplo.

Por esta razón, el ablandamiento de los frutos presentó un problema durante la tinción histológica, esto se presentó especialmente en el fruto que se evaluó al día 5 tras la agro-infiltración, ya que, al momento de la cosecha, este se encontraba más rojo y de menor tamaño, lo que conllevó a una mayor alteración fisiológica al momento de la infección. Resultados distintos se presentaron con los dos frutos evaluados al día 5 tras la agro-infiltración; en la figura 3.C se denotan los *spots* azules de *GUS*, en una muestra que provenía de un fruto que, al momento de cosechar, tenía una coloración entre blanca-roja, y eran de mayor tamaño. Estos resultados coinciden con las afirmaciones de Zhao *et al.* [19], quienes explican que la optimización de la expresión transitoria de genes de interés en frutos en fresa está condicionada a factores como la temperatura, periodo de incubación, y estado de desarrollo del fruto, este último factor influyó en gran medida en los resultados obtenidos.

Por otro lado, al comparar los tejidos transformados sin y con exposición a la luz UV, no se reportó diferencia aparente en la actividad de *GUS* entre ambos frutos, esto se puede notar con la presencia de puntos azules tanto en frutos irradiados y como en no irradiados, específicamente en las muestras de las figuras 3.C.1 y 3.C.2. Sin embargo, la detección de este sistema reportero no puede compararse de forma precisa, ya que es meramente una evaluación colorimétrica visual, por lo que la actividad de *GUS* no puede medirse con precisión. Se han obtenido resultados similares con la detección de β -glucuronidasa al transformar frutos de fresa con la construcción pBI121-*PrFaPAL6-GUS* [20], y esto se justificó al citar que la expresión transitoria de frutos presenta limitaciones en cuanto a la observación de resultados, uno de ellos es el efecto variado entre frutos individuales que propicia una comparación limitada entre controles y tratamientos, la causa principal parece ser la variación en el grado de expresión de cada fruto de forma individual [19].

Es de destacar que, al no contar con diferencias notorias entre los tratamientos, no es posible atribuir la expresión del gen *GUS* a la presencia de promotores que responden de manera exclusiva ante luz UV. Por lo que es necesario analizar las secuencias clonadas en los plásmidos pCR4-TOPO recombinantes.

Análisis *in silico* y de la funcionalidad del promotor de *FaPAL2*

Como resultado del análisis *in silico* de la secuencia aislada del promotor *FaPAL2* se identificaron varios elementos en *cis* asociados a la regulación de genes por exposición a luz, que se muestran en el cuadro 3. En el caso de la GATA-box y el motivo GT1, se ha comprobado que ambos están involucrados en la regulación por luz, y la combinación de ambos es necesaria para la respuesta a este estímulo [21]. Sin embargo, ninguno de estos son elementos exclusivos para promotores de genes regulados por luz, ya que, por ejemplo, se encuentra también en el promotor *CaMV 35S* [22].

También se identificó la caja PAL (L); hay estudios que reportan que este es un sitio putativo del promotor del gen *PAL-1*, y que aparecen huellas de este después de tratamientos con luz [23], sin embargo, hay otros estudios que afirman que, si bien es un elemento necesario y exhibe expresión basal alta, no posee la actividad genética suficiente para ser inducido por exposición a la luz [24].

Por otro lado, también se identificó la Caja L-Like, que son distintas variaciones de la caja L, que también se han comprobado ser elementos regulatorios que responden a la luz [25]. Y, por último, se identificó el motivo SORLIP1, que se ha identificado en promotores de genes inducidos por luz en arroz y *Arabidopsis* sp., y se ha logrado identificar este motivo en los promotores de los genes *PAL1* y *PAL2* provenientes de durazno [26, 27, 28].

La identificación de todos estos motivos permitió determinar que el promotor de *FaPAL2* puede estar activando mayormente por la exposición a luz, incluyendo UV-C, pero este estímulo no es un factor exclusivo que propicia su activación, lo cual apoya los resultados de la expresión transitoria de *GUS* discutidos en el punto anterior. Asociado a esto, se ha demostrado que la expresión de genes *PAL* responde a otros factores abióticos, por ejemplo, se ha estudiado el efecto sinérgico que tiene el daño mecánico con tratamientos de luz UV en la síntesis de compuestos fenólicos en zanahorias, y se determinó que la actividad de *PAL* aumentó en zanahorias cortadas y expuestas a luz UV-C, contrario a lo que ocurrió en zanahorias enteras [29]. Por otro lado, se ha comprobado que la irradiación con luz UV-C de frutos de fresa promueve la expresión de *FaPAL6*, pero durante un periodo corto de tiempo, ya que no se detectó una expresión positiva después de 20 minutos de exposición al tratamiento [10].

Estos últimos estudios pueden sugerir que el daño mecánico efectuado al rebanar los frutos de fresa para su posterior tinción con X-Gluc pudo intervenir en el estudio de la inducción exclusiva del tratamiento con luz UV-C. Adicionalmente, el tiempo empleado para evaluar la expresión de *GUS* en frutos tratados y no tratados, pudo haber sido muy prolongado, lo que impidió observar diferencias de expresión entre ambos tratamientos.

Por otra parte, en relación con el promotor *CaMV 35S*, que es ampliamente utilizado en experimentos de transformación, se ha comprobado su alta actividad en órganos florales y polen de plantas transgénicas de fresa [30]. Este promotor manifestó efectivamente una mayor actividad que el promotor de *FaPAL2*, lo que se evidenció comparando la tinción del control positivo y los frutos transgénicos (figura 3), ya que en los últimos las áreas teñidas se notan en menor proporción.

Conclusiones

La técnica TAIL PCR permitió aislar secuencias corriente arriba del gen *FaPAL2*, que se pudieron asociar a promotores y motivos que tienen una respuesta positiva a luz UV-C. Además, la técnica de electroporación probó ser más eficiente para la transformación de células electrocompetentes de *A. tumefaciens*, en comparación con la transformación química de células quimiocompetentes de *E. coli*.

El fragmento aislado corriente arriba del gen *FaPAL2* demostró ser funcional como promotor, ya que promovió la expresión de β -glucuronidasa en frutos transgénicos de fresa. Sin embargo, al no observar diferencia de dicha expresión en los tratamientos empleados, se sugiere que el promotor está siendo activado de forma basal, y asociado a este resultado destacan el daño mecánico a los frutos y el tiempo prolongado de evaluación del sistema reportero *GUS*, que ambos limitaron la evaluación de la influencia exclusiva de la exposición a luz UV-C sobre el promotor de *FaPAL2*.

Referencias

- [1] Angulo, R. (2009). *Fresa Fragaria x ananassa*. Colombia, Bogotá: Bayer CropScience.
- [2] Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2017). *Planeación agrícola nacional 2017-2030 de la fresa mexicana*. Recuperado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257075/Potencial-Fresa.pdf>
- [3] Bianchi, P. G. (2018). *Guía completa del cultivo de las fresas*. Ciudad de México, México: De Vecchi.
- [4] Baldi, P., Orsucci, S., Moser, M., Brilli, M., Giongo, L., & Si-Ammour, A. (2018). Gene expression and metabolite accumulation during strawberry (*Fragaria x ananassa*) fruit development and ripening. *Planta*, *248*(5), 1143-1157.
- [5] Nowicka, A., Kucharska, A. Z., Sokół-Lętowska, A., & Fecka, I. (2019). Comparison of polyphenol content and anti-oxidant capacity of strawberry fruit from 90 cultivars of *Fragaria x ananassa* Duch. *Food chemistry*, *270*, 32-46.
- [6] Suryawanshi, S. (2019). Chemistry and Health benefits to humans of Some Flavonoids: An Overview. *Current pharma research*, *9*(2), 2799-2804.
- [7] Panche, A. N., Diwan, A. D., & Chandra, S. R. (2016). Flavonoids: an overview. *Journal of nutritional science*, *5*.
- [8] Li, X., Zhang, L., Ahammed, G. J., Li, Z. X., Wei, J. P., Shen, C., & Han, W. Y. (2017). Nitric oxide mediates brassinosteroid-induced flavonoid biosynthesis in *Camellia sinensis* L. *Journal of plant physiology*, *214*, 145-151.
- [9] Pombo, M. A., Martínez, G. A., & Civello, P. M. (2011). Cloning of *FaPAL6* gene from strawberry fruit and characterization of its expression and enzymatic activity in two cultivars with different anthocyanin accumulation. *Plant science*, *181*(2), 111-118.
- [10] Martínez-Zavala, S. A. (2018). *Respuesta molecular del fruto de la fresa (Fragaria x ananassa Dutch cv. Camino Real) ante la iluminación con luz UV-C*. Tesis de Maestría en Ciencias en Biotecnología de Plantas, CINVESTAV-IPN Unidad Irapuato, México.
- [11] Liu, Y. G., & Whittier, R. F. (1995). Thermal asymmetric interlaced PCR: automatable amplification and sequencing of insert end fragments from P1 and YAC clones for chromosome walking. *Genomics*, *25*(3), 674-681.
- [12] Terauchi, R., & Kahl, G. (2000). Rapid isolation of promoter sequences by TAIL-PCR: the 5'-flanking regions of *PAL* and *PGI* genes from yams (*Dioscorea*). *Molecular and general genetics MGG*, *263*(3), 554-560.
- [13] Thanh, T., Chi, V. T. Q., Abdullah, M. P., Omar, H., & Napis, S. (2012). Efficiency of ligation-mediated PCR and TAIL-PCR methods for isolation of RbcS promoter sequences from green microalga *Ankistrodesmus convolutus*. *Molecular biology*, *46*(1), 58-64.
- [14] Díaz, A. S., Rentería, L. F., Cortez, J. A., & Palacios, E. S. (2008). PCR: reacción en cadena de la polimerasa. *Herramientas moleculares aplicadas en ecología: aspectos teóricos y prácticos*.
- [15] Naleway, J.J. (1992). *Histochemical, spectrophotometric, and fluorometric GUS substrate*, pp. 61-76. In: *GUS Protocols: Using the GUS Gene as a Reporter of Gen Expression*. California, USA: Academic Press Inc.
- [16] Chi, G., Goh, H. L., Hoo, K., & Legavre, T. (1998). *GUS* gene expression in *Anthurium andreaeanum*, *Oncidium Gower Ramsey* and *Brassolaeliocattleya* Orange Glory Empress after particle bombardment. In *International Symposium on Biotechnology of Tropical and Subtropical Species Part 2*, 461, 379.
- [17] Martínez, L. (2016). *Replication-Competent Reporter-Expressing Viruses*. Basel, Switzerland: MDPI
- [18] Spolaore, S., Trainotti, L., & Casadoro, G. (2001). A simple protocol for transient gene expression in ripe fleshy fruit mediated by *Agrobacterium*. *Journal of experimental botany*, *52*(357), 845-850.
- [19] Zhao, Y., Mao, W., Chen, Y., Wang, W., Dai, Z., Dou, Z., & Liu, T. (2019). Optimization and standardization of transient expression assays for gene functional analyses in strawberry fruits. *Horticulture research*, *6*(1), 1-13.

- [20] Garduño, A. (2020). *Evaluación de la funcionalidad de la región promotora del gen de FaPAL6 de Fragaria x ananassa en respuesta a luz UV-C* (Tesis de maestría). Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Irapuato, México.
- [21] Chattopadhyay, S., Puente, P., Deng, X. W., & Wei, N. (1998). Combinatorial interaction of light-responsive elements plays a critical role in determining the response characteristics of light-regulated promoters in *Arabidopsis*. *The plant journal*, *15*(1), 69-77.
- [22] Terzaghi, W. B., & Cashmore, A. R. (1995). Light-regulated transcription. *Annual review of plant biology*, *46*(1), 445-474.
- [23] Da Costa e Silva, O., Klein, L., Schmelzer, E., Trezzini, G. F., & Hahlbrock, K. (1993). BPF-1, a pathogen-induced DNA-binding protein involved in the plant defense response. *The plant journal*, *4*(1), 125-135.
- [24] Logemann, E., Parniske, M., & Hahlbrock, K. (1995). Modes of expression and common structural features of the complete phenylalanine ammonia-lyase gene family in parsley. *Proceedings of the national academy of sciences*, *92*(13), 5905-5909.
- [25] Maeda, K., Kimura, S., Demura, T., Takeda, J., & Ozeki, Y. (2005). DcMYB1 acts as a transcriptional activator of the carrot phenylalanine ammonia-lyase gene (*DcPAL 1*) in response to elicitor treatment, UV-B irradiation and the dilution effect. *Plant molecular biology*, *59*(5), 739.
- [26] Hudson, M. E., & Quail, P. H. (2003). Identification of promoter motifs involved in the network of phytochrome A-regulated gene expression by combined analysis of genomic sequence and microarray data. *Plant physiology*, *133*(4), 1605-1616.
- [27] Jiao, Y., Ma, L., Strickland, E., & Deng, X. W. (2005). Conservation and divergence of light-regulated genome expression patterns during seedling development in rice and *Arabidopsis*. *The plant cell*, *17*(12), 3239-3256.
- [28] Irisarri, P., Zhebentyayeva, T., Errea, P., & Pina, A. (2016). Differential expression of phenylalanine ammonia lyase (*PAL*) genes implies distinct roles in development of graft incompatibility symptoms in *Prunus*. *Scientia horticulturae*, *204*, 16-24.
- [29] Surjadinata, B. B., Jacobo, D. A., & Cisneros, L. (2017). UVA, UVB and UVC light enhances the biosynthesis of phenolic antioxidants in fresh-cut carrot through a synergistic effect with wounding. *Molecules*, *22*(4), 668.
- [30] De Mesa, M. C., Santiago, N., Pliego, F., Quesada, M. A., & Mercado, J. A. (2004). The *CaMV 35S* promoter is highly active on floral organs and pollen of transgenic strawberry plants. *Plant cell reports*, *23*(1-2), 32-38.

Determinación del caudal ambiental mediante una metodología hidrobiológica, considerando variables de cambio climático en el río Pejibaye, Cartago, Costa Rica

Determination of the environmental flow using a hydrobiological methodology, considering variables of climate change in the Pejibaye river, Cartago, Costa Rica

Fernando Watson-Hernández¹, Laura Chavarría-Pizarro²,
Francisco Quesada-Alvarado³, Isabel Guzmán-Arias⁴

Fecha de recepción: 16 de agosto de 2020

Fecha de aprobación: 8 de diciembre de 2020

Watson-Hernández, F; Chavarría-Pizarro, L; Quesada-Alvarado, F; Guzmán-Arias, I. Determinación del caudal ambiental mediante una metodología hidrobiológica, considerando variables de cambio climático en el río Pejibaye, Cartago, costa rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-4 Octubre-Diciembre 2021. Pág 118-129.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i4.5223>

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: fwatson@tec.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-8258-4668>

2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: laura.chavarria@tec.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-7630-1104>

3 Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico franQAL@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-9025-3009>

4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: iguzman@tec.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-5553-3977>



Palabras clave

Caudal ambiental; ecohidráulica; preferencia de hábitat; insectos acuáticos; peces.

Resumen

En Costa Rica el caudal ambiental se calcula como un 10% del aforo caudal medio del río. Este porcentaje ha carecido de fundamento científico en relación con las condiciones fluviales aptas para preservar los ecosistemas presentes en los cauces. Las concesiones de agua para los diferentes usos han provocado un impacto ambiental que se ve reflejado en las condiciones de disponibilidad del recurso hídrico y en las condiciones fisicoquímicas y ecológicas de los cauces. Este estudio responde a la ruta de investigación que busca la selección y validación en campo de diferentes metodologías para obtener el caudal ambiental requerido en una fuente de agua superficial. En este caso, el estudio está centrado en la adaptación y validación de una metodología hidrobiológica de cálculo del régimen de caudal ambiental en la cuenca del río Pejibaye en Jiménez de Cartago. Se utilizaron series de datos históricas de variables hidrológicas para analizar la condición actual y proyectada a futuro, se seleccionaron especies de macroinvertebrados y peces que permitieran evaluar la calidad de los ecosistemas asociados, finalmente se establecieron los parámetros hidráulicos de preferencia de hábitat para definir el régimen de caudal ambiental actual, cuyos resultados revelan un comportamiento de estacionalidad, el cual se acentúa en la proyección a futuro. Se determinó que el género de insecto *Anacroneuria* y la especie de pez *G. nudus*, son los mejores para determinar caudales ambientales.

Keywords

Environmental flow; ecohydraulic; habitat preference; aquatic insects; fish.

Abstract

The environmental flow, in Costa Rica, is calculated as 10% of the average flow of the river. This percentage has lacked scientific basis in relation to the river conditions suitable for preserving the ecosystems present in the rivers. The water concessions for the different uses have caused an environmental impact that is reflected in the conditions of availability of the water resource in some vulnerable points of the country, as well as in the physicochemical and ecological conditions of the channels. The proposed project responds to the research route that seeks the selection and field validation of different methodologies to obtain the required environmental flow in a surface water source. In this particular case, the project is focused on the adaptation and validation of a hydrobiological methodology for calculating the environmental flow regime in Pejibaye river basin, Jiménez de Cartago. Historical hydrological data variables were used to analyze the current and projected future condition, the species of macroinvertebrates and fish that allowed evaluating the quality of the associated ecosystems were selected, finally, the hydraulic parameters of habitat preference were established to define the current environmental flow regime, whose results reveal a seasonality behavior, which is accentuated in the future projection. The insect genus *Anacroneuria* and the fish species *G. nudus* were determined to be the best for determining environmental flows.

Introducción

El caudal ambiental establece cuánto del régimen hidrológico natural de un río debería seguir fluyendo aguas abajo y hacia la planicie de inundación para mantener los valores característicos del ecosistema [1]. A nivel mundial, se utilizan los caudales ambientales como herramienta de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos que permite abordar la problemática generalizada de su uso excesivo y del deterioro de los ecosistemas acuáticos [2]. El proceso de cambio climático también ha dejado en evidencia la situación crítica en la que se encuentran muchos ecosistemas acuáticos; en algunos países la situación ha empeorado tanto en los últimos años, que grandes cuerpos de agua han llegado a desaparecer, como: el Lago Mead, y el Lago Badwater en Estados Unidos; el Lago Poopó en Bolivia y el Mar Aral en Kasajistán [3].

A pesar de que el agua es un recurso imprescindible para el mantenimiento de la vida, los ecosistemas acuáticos han sufrido un proceso de degradación y sobreexplotación, que ha provocado entre otros problemas, la reducción del caudal necesario para mantener la biodiversidad y los servicios que obtienen las comunidades de éstos [4]. Costa Rica emplea, como medida para la función de estos ecosistemas un 10% del caudal de estiaje, valor que no tiene un respaldo científico y representa un modelo insostenible para una adecuada administración del recurso hídrico. Al no contar el país con un procedimiento apropiado, ha sido una prioridad de las autoridades encargadas de administrar el recurso hídrico, la implementación de una metodología donde pueda determinar el caudal ambiental necesario para mantener la funcionalidad de los ecosistemas acuáticos y sus procesos naturales (tomando en cuenta el deterioro ambiental y el proceso de cambio climático), y que además tiene un efecto directo sobre la disponibilidad del recurso para uso de las poblaciones.

Debido a que el rescate del capital hídrico, esencial para proteger y conservar las fuentes de agua, se han realizado varias iniciativas en el país para utilizar metodologías más acordes con el cálculo de los requerimientos reales [5]. Diferentes instituciones han aplicado metodologías de acuerdo con las necesidades de sus proyectos, sin embargo, no se ha logrado determinar cuál sería la más apropiada en cada caso particular; por ejemplo, algunas metodologías, dependiendo del tipo de concesión y de las características que tenga el río y su zona de influencia, podrían no ser aplicables. En el caso de la metodología holística, una de las más complejas y utilizada por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), podría no ser adecuada para una valoración de aprovechamiento a muy baja escala y de un caudal pequeño. No obstante, la determinación del caudal debe ser atendida en toda su dimensión real de complejidad según las condiciones en que se encuentra la fuente y la demanda por el aprovechamiento del agua. Este estudio pretende determinar el caudal ambiental requerido para río Pejibaye, mediante la implementación de una metodología de cálculo hidrobiológica, considerando variables de cambio climático. La consecución de este objetivo se dio por medio de: establecer la respuesta hidrológica actual y futura de la cuenca del río Pejibaye ante escenarios de cambio climático; seleccionar los indicadores biológicos para el requerimiento de caudal ambiental y generar el régimen de caudal ambiental del río tomando en cuenta los componentes metodológicos establecidos y los escenarios de cambio climático.

Metodología

La cuenca del río Pejibaye está ubicada en el cantón de Jiménez en la provincia de Cartago, pertenece al sistema de la Cuenca Alta del Río Reventazón ubicada en la vertiente del caribe de Costa Rica, esta cuenta con un área aproximada de 250 km² y un rango de altitud que va desde 570 a los 2680 m.s.n.m, presenta áreas con pendientes mayores a 60%. Esta cuenca se encuentra cubierta por el 80% de bosque denso, el resto de la superficie presenta usos del suelo como: caña de azúcar, pastos, café y maleza. Asimismo, se caracteriza por tener

un promedio anual de precipitación entre los 2800 y 8000 mm, en la zona centro oeste de la cuenca la precipitación puede ser de 9000 mm/año, esto provoca que sea una de las zonas más lluviosas del país, con gran potencial hidroeléctrico, registrando caudales en promedio anual de 34 m³/s, haciendo un aporte importante al Proyecto Hidroeléctrico Angostura [6].

Los trayectos seleccionados para la determinación de caudales ambientales se establecieron por medio de criterios de uso de suelo, condiciones hidráulicas y biológicas, disponibilidad de datos históricos de caudales y con longitudes de entre 160 a 200 m de longitud para la obtención de representatividad de hábitats, caracterizadas hidráulicamente por la existencia de zonas con calados mayores al promedio (pozas), flujos supercríticos, subcríticos y áreas mixtas. Bajo estas condiciones, se seleccionaron tres trayectos, dos en el río Pejibaye y uno sobre el río Gato. Nombrados según el orden de recolección de muestras durante las giras de campo. El primero definido como P1 estaba en el río Pejibaye a 350 m al sureste de la plaza de deportes del pueblo de Pejibaye, bajo el puente que comunica con el poblado Gato, el segundo punto P2 se ubica el río Gato a 400 m del campo de futbol del poblado del mismo nombre y el tercer punto P3 sobre el río Pejibaye, se ubica aguas arriba del puente sobre la carretera nacional 225. Los trayectos P1, P2 y P3, para fines hidrológicos, representan los puntos de aforo de la cuenca y subcuencas en estudio; Cuenca P1, Cuenca P2 y Cuenca P3 (ver figura 1). Las cuencas P1 y P3 cuentan con datos de precipitación (P), temperatura (T) y caudal (Q) para el periodo 2000-2009 a escala diaria, en tanto, la cuenca P2 tiene información de P y T para el mismo periodo de tiempo y misma escala temporal. La cuenca P2, al no tener datos de caudal, no se le realizó una calibración directa, sino que se utilizaron los valores de los parámetros de calibración de la cuenca P3, que es con la que presenta mayores similitudes en cuanto a distribución de uso de suelo y pendiente media de la cuenca.

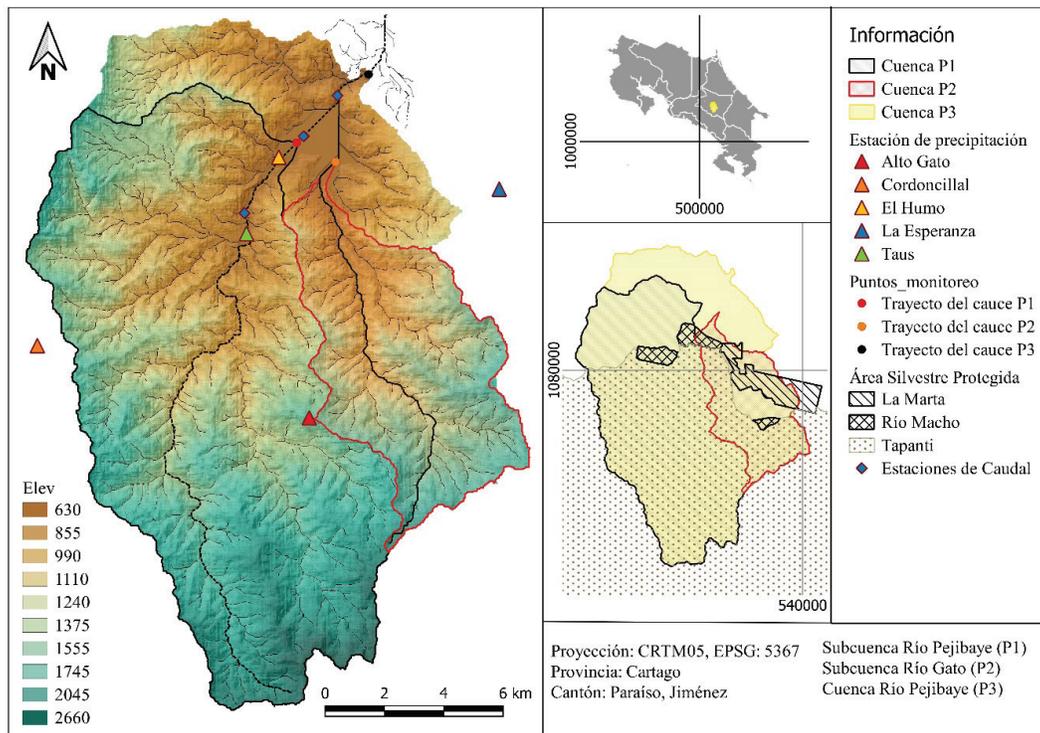


Figura 1. Ubicación de estaciones de medición (caudal y precipitación), áreas silvestres protegidas, puntos de muestreo y subdivisión de cuencas.

Con el análisis de precipitación, temperatura atmosférica y caudales registrados, además del análisis geoespacial, se desarrolló el modelado hidrológico de las tres microcuencas correspondientes al área de influencia de los puntos seleccionados. Posteriormente se construyeron los escenarios de cambio climático con proyecciones para los periodos 2000-2019, 2040-2059, 2080-2099.

Se seleccionaron como organismos indicadores de caudal a insectos acuáticos y peces. Estos organismos fueron seleccionados ya que están adaptados a las fluctuaciones naturales en magnitud, frecuencia, y duración de las corrientes de flujo (alto, intermedio o bajo). Específicamente, para macroinvertebrados acuáticos se tomaron muestras de ninfas de los órdenes de insectos Ephemeroptera (Baetidae; *Baetodes sp.*) y Plecoptera (Perlidae; *Anacroneuria sp.*).

En cuanto a los peces como indicadores de caudal, para este estudio se utilizó a las especies *Gobiexis nudus*, *Rhamdia laticauda* y *Astyanax aeneus*. En el caso de *Gobiexis nudus*, es una especie que suele habitar en los sistemas tipo rápidos y turbulentos, por lo que puede ser un buen indicador de caudal, debido a que los rápidos y las cataratas son los microhábitats más perjudicados al reducir el caudal. *Rhamdia* y *Astyanax*, se han registrado en distintos microhábitats determinados por la velocidad del agua, sin embargo, en el caso de *Astyanax* son más frecuentes en pozas y aguas calmas. Aun así, es importante corroborar su eficacia como especies indicadoras de caudal ambiental.

Luego, se elaboraron las curvas de preferencia de hábitat y se estableció tres categorías de preferencia: hábitat óptimo, es el rango donde se encuentra la mayor abundancia de organismos; regular, son el conjunto de rangos donde hay presencia de organismos, pero en menor abundancia; inadecuado, es el rango (os) donde no hay presencia del organismo objetivo. Posteriormente, por medio del software Iber 2.5.1, se realizaron simulaciones de hábitat, que son modelos que tienen como objetivo evaluar la relación del caudal con la formación de hábitat físico óptimo, regular o inadecuado para las especies objetivo, y de esta forma evaluar los efectos del cambio de caudal. Para realizar la simulación se utilizaron los datos obtenidos de los indicadores biológicos y los parámetros hidrológicos: profundidad y velocidad del agua. Finalmente, se determinó el régimen de caudal ambiental para cada uno de los tres puntos de estudio, según los criterios establecidos para establecer las características del caudal óptimo.

Resultados

Por medio de la simulación de hábitat, se generaron las curvas de área utilizable ponderada (WUA) en unidades porcentuales del área del espejo de agua. La variación de WUA está en función del caudal sobre el cauce. Estas curvas se obtuvieron para los trayectos de cauce de las tres cuencas para las especies *Anacroneuria*, *Astyanax aeneus*, *Baetodes*, *Gobiexis nudus* y *Rhamdia laticauda*. A manera de ejemplo, se muestra el análisis en el punto P3, el cual muestra al igual que en el cauce de la cuenca P1 y P2, que la especie *Baetodes* tiene la mayor área de hábitat útil (ver figura 2), alcanzando un máximo de 93,5% del espejo de agua para un flujo de 10 m³/s. La curva de *Astyanax aeneus* igualmente, es la segunda que mayor área de hábitat utilizable presenta con un 75% del espejo de agua para para un caudal de 2 m³/s. La especie que presenta un menor pico es la *Rhamdia laticauda* con un hábitat máximo de 53% para un flujo de 4 m³/s.

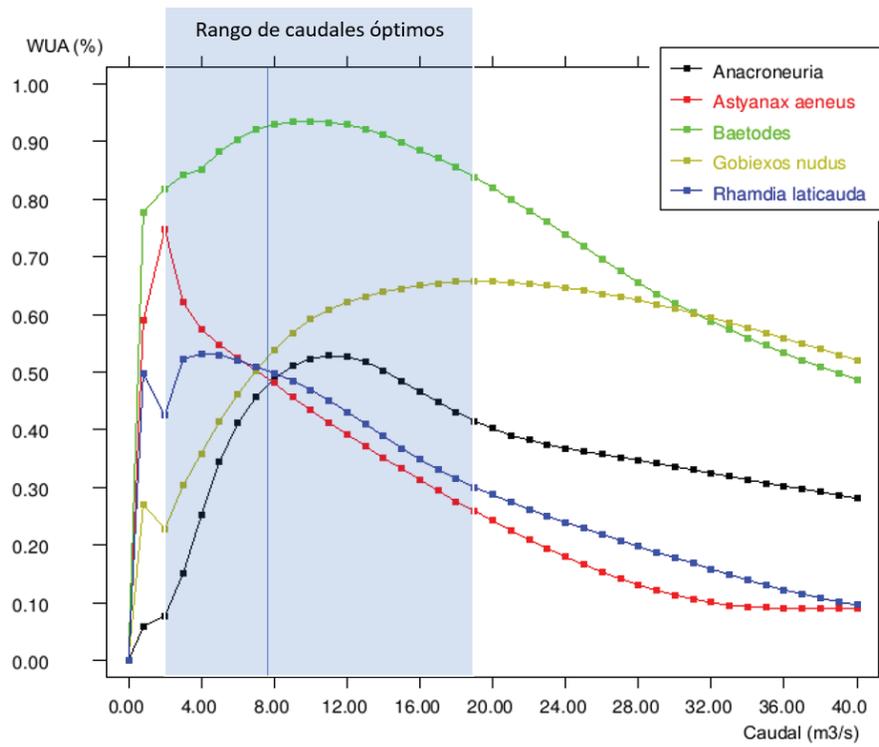


Figura 2. Comportamiento del Área utilizable ponderada (WUA%) en respuesta del caudal en el cauce de la cuenca P3 para las 5 especies indicadoras.

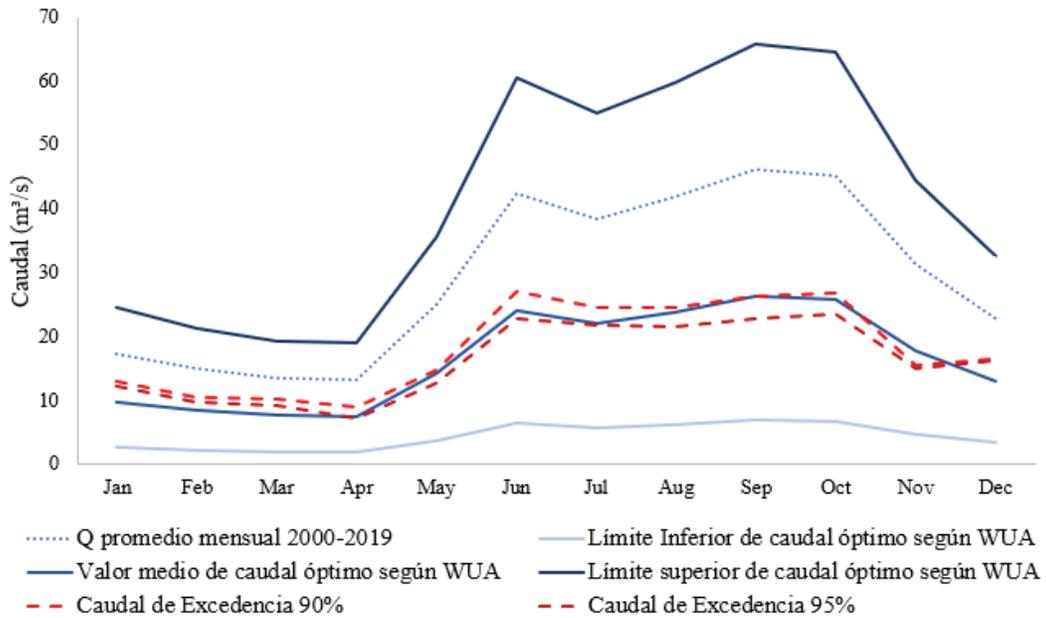


Figura 3. Resumen de las propuestas para establecer el régimen de caudal ambiental.

El rango de caudales óptimo es el más amplio del estudio, con caudales entre 2 a 19 m³/s. Aplicando la misma metodología, se establece un valor medio 7,6 m³/s (ver figura 3). De igual forma, el caudal más bajo se presenta en abril con 13,33 m³/s, los valores de caudal óptimos de 2, 7,6 y 19 m³/s. Los porcentajes de disminución son del 85%, 43% para límite medio e inferior, de igual forma, esta cuenca tiene un límite superior de caudal óptimo mayor que el caudal medio del mes de abril. En este caso se tomó el límite medio para establecer la recomendación del régimen de caudales, según se muestra en la figura 4.

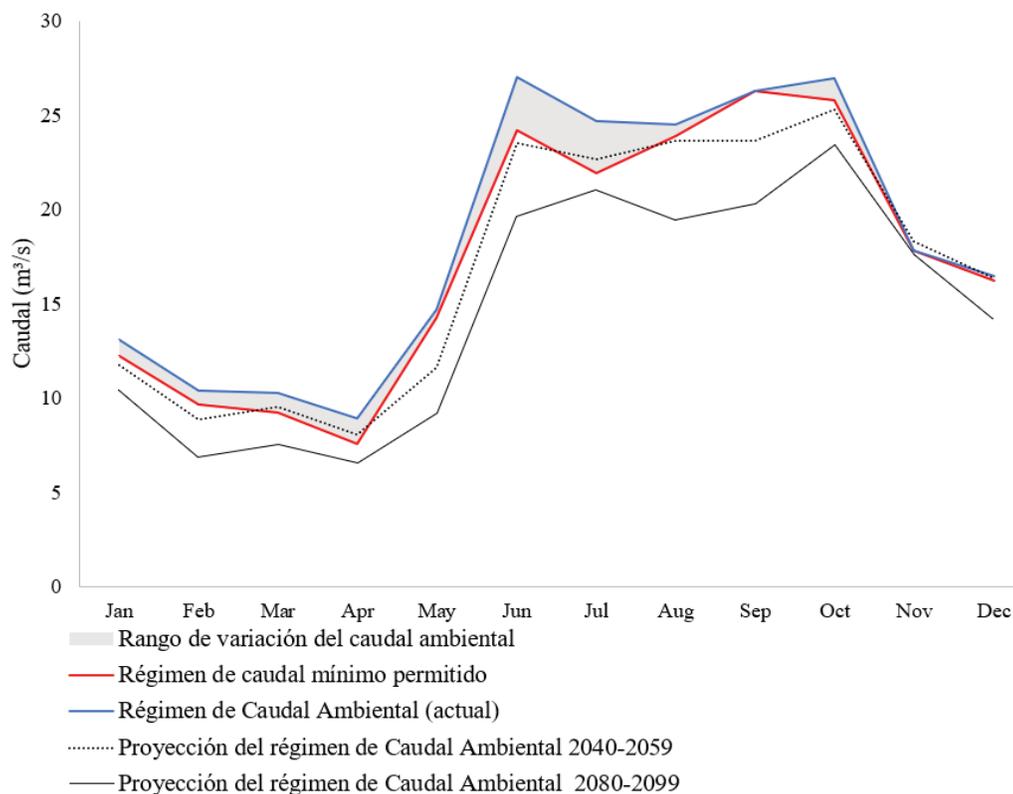


Figura 4. Régimen de caudal ambiental recomendado para la cuenca P3.

Al simular este régimen de flujo recomendado se obtiene que *Baetodes* en los primeros 4 meses del año presenta valores de WUA del 93%, el valor mínimo lo presenta en octubre con un 68% y el promedio anual está en el 82% del espejo de agua. *Astyanax aeneus* presenta el valor promedio anual menor de 29%, presentando su máximo del 46% en abril. En el cuadro 1 se detallan los valores de WUA calculados para cada una de las especies en función de los caudales del régimen hídrico recomendado, producto de la simulación espacial del comportamiento de las áreas utilizables para cada especie.

Cuadro 1. Comportamiento del área utilizable ponderada en respuesta del régimen de caudal ambiental recomendado.

Mes	Caudal	WUA Gobiexos nudus (%)	WUA Astyanax aeneus (%)	Rhamdia laticauda (%)	WUA Anacroneuria (%)	WUA Baetodes (%)
Jan	13,1	63%	37%	41%	52%	92%
Feb	10,4	60%	43%	46%	53%	94%
Mar	10,3	60%	43%	46%	53%	94%
Apr	8,9	57%	46%	49%	51%	93%
May	14,7	64%	34%	37%	49%	90%
Jun	27,0	63%	14%	21%	35%	68%
Jul	24,7	64%	17%	23%	36%	72%
Aug	24,5	64%	17%	23%	37%	73%
Sep	26,3	64%	15%	22%	36%	69%
Oct	27,0	63%	14%	21%	35%	68%
Nov	15,4	65%	33%	36%	48%	89%
Dec	16,5	65%	30%	34%	46%	88%
Máximo Caudal/WUA		19,0/66%	2,0/75%	4,0/53%	11,0/53%	10,0/94%

Discusión

Requerimiento del caudal ambiental según indicadores biológicos

El flujo de agua tiene una gran influencia en el establecimiento de los organismos acuáticos, ya que afecta la composición del sustrato, las propiedades químicas del agua, el movimiento de nutrientes y partículas orgánicas, así como la disponibilidad e idoneidad del hábitat [7]. Las actividades humanas podrían extender los períodos de caudal reducido a lo largo del año; por este motivo, es importante identificar aquellos organismos con requerimientos de caudal más estrictos, para garantizar un flujo que permita su supervivencia y la de especies asociadas. En el caso del río Pejibaye, se encontraron organismos bioindicadores que permitirían la determinación del caudal ambiental como se muestra a continuación.

Insectos

A pesar que *Baetodes* fue encontrado en un rango mayor de hábitats, al igual que *Anacroneuria* fue encontrado en hábitats no muy profundos y con corriente, esto se debe a que ambas especies presentan adaptaciones para establecerse en zonas con corriente como un cuerpo aplanado y alargado, así como uñas para adherirse a los sustratos [8]. De acuerdo con Brown & Brussock [9] los efemerópteros como *Baetodes* tienen adaptaciones para habitar diferentes rangos de velocidad y caudal, por este motivo posiblemente no presentaron una preferencia particular de hábitat.

En general, ambas especies no fueron encontradas en hábitats con valores muy altos y bajos de caudal. En el caso de un caudal alto, podría desfavorecer la presencia de estos insectos al provocar el arrastre de sedimentos como hojarasca, cantos rodados y piedras que ofrecen refugio y alimento para los individuos de ambas especies (de *Baetodes* como raspador, y *Anacroneuria* como depredador de larvas de otros insectos) [10] [11]. Por otra parte, un caudal

bajo (natural o artificial) también tiende a reducir la densidad de macroinvertebrados en los cuerpos de agua [12] [13]. Esta reducción en la densidad, se da como respuesta a un aumento en las dinámicas de competencia y depredación, ya que, al disminuir la cantidad de hábitat, disminuye la cantidad y calidad del alimento [12].

Según los resultados obtenidos se puede concluir que *Baetodes* es más generalista y puede habitar un rango mayor de hábitats, mientras que *Anacroneuria* es más selectivo y presenta preferencia por hábitats con características más específicas, sugiriendo que ésta especie podría ser un buen indicador en la determinación del régimen de caudal cuando estuviera presente en el cuerpo de agua estudiado. Adicionalmente, ambas especies fueron encontradas en diferentes épocas del año lo que favorece la utilización en este tipo de organismos en este tipo de estudios.

Ictiofauna

Para las tres especies de peces evaluadas en el río Pejibaye, se observó que, al aumentar la profundidad y velocidad del agua, aumentó la cantidad de organismos, sin embargo, se llegó a un punto de quiebre y la abundancia empezó a disminuir. De igual forma, al aumentar el caudal aumentó el porcentaje de hábitat utilizable, pero el aumento continuo del caudal provocó la disminución en la cantidad de hábitat disponible. Estas condiciones obedecen a que los organismos cuentan con adaptaciones morfológicas que les permiten establecerse en uno o varios tipos de microhábitats, pero ante condiciones extremas se empieza a registrar menor cantidad de organismos [14].

La especie *Gobiesox nudus*, cuenta con una ventosa ventral y cuerpo aplanado dorsoventralmente, que le permite mantenerse en las zonas con mayor velocidad y turbulencia y de esta forma evitar depredadores [15]. No obstante, a velocidades mayores a los 1,2 m/s es posible que la especie experimente mayor dificultad para mantenerse o desplazarse esto debido a la incidencia del número de Reynolds por su tamaño [16] y de ahí se dé una disminución en su frecuencia, también considerando que los organismos evitan los sitios donde pierden más energía de la que adquieren alimentándose [14]. Para *Rhamdia laticauda* y *Astyanax aeneus*, la mayor abundancia se dio a velocidades que van desde los 0 m/s hasta los 0,6 m/s; esta condición de no estar presentes en mayor abundancia a velocidades extremas puede estar medida por la forma corporal y hábitos alimenticios de cada especie [17]. La posición de la boca de *A. aeneus*, le permite picar el fondo y superficie del agua para cazar insectos y frutos, y por su forma corporal ovoide [15], le dificultan permanecer en zonas con mayor fuerza de arrastre. Por su parte, *R. laticauda*, su boca se encuentra direccionada de forma frontoventral, permitiéndole alimentarse del fondo del río, por lo que se puede registrar con mayor frecuencia en zonas lentas [15]. Sin embargo, su cuerpo de forma de torpedo, le permite de igual forma movilizarse y asentarse en hábitats de mayor velocidad [18], pero siempre protegiéndose u ocultándose entre las piedras cercanas al fondo, donde la velocidad es menor [19].

En el caso de estas tres especies de peces el rango de hábitat y las curvas de preferencia, no pueden ser comparadas con otros estudios, ya que no hay registro bibliográfico sobre este tema para estas especies. No obstante, [20] en su estudio determinaron la relación entre la forma del cuerpo y los aspectos ecológicos con respecto al uso del hábitat, utilizando varias especies de talla media, entre ellas el género *Astyanax* sp y la especie *Imparfinis minutus* (familia Heptapteridae, al igual que *R. laticauda*). En su estudio observaron que la mayor abundancia de *Astyanax* sp. se dio entre las velocidades de 0,5 y 1,0 m/s y en el rango de profundidad entre los 40 y 60 cm, similar a la especie costarricense *A. aeneus*. Mientras que *I. minutos* fue registrada con mayor abundancia entre las velocidades entre 1,5 y 2,0 m/s, diferente a *R. laticauda* la cual prefirió velocidades menores, sin embargo, esta disimilitud puede deberse a que a pesar de que pertenecen a la misma familia y con características morfológicas similares, tienen distintas

preferencias por la velocidad del agua, o bien, porque durante en varios muestreos en el río Pejibaye no se pudo utilizar la electropesca dificultando así la observación en los macrohábitats turbulentos. En cuanto a la profundidad, *I. minutos* la registraron entre 10 y 20 cm, mientras que *R. laticauda* fue registrada con mayor abundancia entre 40 y 50 cm, por lo que para esta variable también hay diferencias.

Por otro lado, [21] obtuvieron curvas de preferencia de hábitat para cinco especies de peces, todas con cuerpo en forma de torpedo y de tamaño pequeño, y observaron la misma tendencia que en el río Pejibaye, donde las especies logran utilizar velocidades nulas y de corriente moderada a fuerte, pero menores a los 1 m/s. Aun así, la presencia de una especie en un tipo de hábitat no solo puede estar medida por la forma corporal [20], sino también por sus hábitos alimenticios y, por lo tanto, donde se encuentre las presas que consumen con mayor frecuencia [22]. A la vez, en el caso de la ictiofauna se recomienda a la especie *G. nudus* como la mejor especie indicadora de caudal ambiental, ya que cuentan con menores rangos de velocidad y profundidad consideradas como óptimas, por lo que variaciones con tendencia a la disminución pueden representar la disminución de sus respectivos hábitats idóneos y como lo menciona [23], ante disminución de caudal los hábitats más perjudicados son los rápidos y las cataratas, poniendo en riesgo a las especies reófilas.

Caudal ambiental

Muchas investigaciones han combinado los modelos ecológicos e hidrodinámicos para determinar la relación entre el caudal y la preferencia del hábitat físico en especies acuáticas. Las curvas de preferencia de hábitat, han sido usadas para caracterizar la preferencia de hábitat y la disponibilidad y calidad del hábitat de especies acuáticas [24]. Así, a través de modelos de cuantificación del porcentaje de hábitat idóneo para las especies acuáticas según un caudal, se puede determinar bajo cuál o cuáles volúmenes de agua se puede mantener las condiciones requeridas por una o varias especies en aquellos ríos donde haya permisos de extracción de agua. En el caso del río Pejibaye, con las curvas de área utilizable ponderada o porcentaje de hábitat idóneo para las especies acuáticas en el sitio P1, se pudo determinar que caudales entre los 1 y 4 m³/s, fue donde se genera la mayor cantidad de hábitat disponible para estas especies, y que durante la época seca o de estiaje para este tramo el caudal ambiental mínimo aceptable sería de 4 m³/s. Para el sitio P2, caudales entre los 1 y 5,5 m³/s, generan la mayor cantidad de hábitat disponible (más del 50%) para las cinco especies acuáticas estudiadas, con un caudal ambiental mínimo aceptable de 1 m³/s. Por último, el sitio P3 la mayor cantidad de hábitat disponible para las especies estudiadas se da entre 2 y 18 m³/s, y bajo un caudal de 8 m³/s es donde la mayoría de las especies cuentan con más de un 50% de hábitat idóneo. El caudal ambiental mínimo aceptable para este tramo cercano a los 8m³/s.

Sin embargo, se debe recalcar que el caudal mínimo aceptable no es solo para la época de estiaje, sino que durante la época lluviosa también se determina un caudal mínimo aceptable para cada tramo del río Pejibaye. Por lo que también se maneja el término de caudal ambiental adaptativo, que es aquel que permite cambios durante todo el año para dar mantenimiento al río, las especies acuáticas y todos los procesos ecológicos propios del ecosistema acuático. De esta manera en la época lluviosa, para el sitio P1 el rango de caudal ambiental es de 4,2 a 4 m³/s, para el sitio P2 es de 1,45 a 1,4 m³/s y para el sitio P3 sería de 8,9 a 7,6 m³/s. el caudal ambiental puede variar en ese rango sin que represente una amenaza al ecosistema. En la época lluviosa pueden estar variando constantemente a valores mayores.

En una proyección de cambio climático a los periodos 2040 – 2059 y 2080 – 2099, el caudal ambiental se establece en 4,14 y 3,68 m³/s respectivamente para P1, en 1,37 y 1,09 m³/s para P2 y en 8,08 y 6,56 m³/s para P3. En estos escenarios, los caudales se acercan o sobrepasan en algunos casos, al límite inferior actual, lo cual evidencia el impacto en el régimen disponible de caudal en el río.

Conclusiones y Recomendaciones

La respuesta hidrológica actual y futura de la cuenca del río Pejibaye ante escenarios de cambio climático, evidencia un comportamiento de estacionalidad en la actualidad, el cual se acentúa en la proyección a futuro conforme se extiende el periodo de tiempo proyectado, así lo demuestran las curvas de excedencia del periodo base 2000-2019 con los periodos 2040-2059 y 2080-2099, donde se obtuvo que el primer trimestre es el que presenta una mayor afectación relativa.

Por su menor rango en la selección de hábitat óptimo, el género de insecto *Anacroneuria* y la especie de pez *G. nudus*, son los mejores para determinar caudales ambientales.

El utilizar un conjunto de especies acuáticas para determinar sus preferencias de hábitat puede ser más efectivo para determinar caudales ambientales, ya que se puede observar los distintos tipos de requerimientos y bajo a cuáles caudales se obtienen.

Según las preferencias de hábitat y el porcentaje de hábitat idóneo para cada especie acuática, en época de estiaje (abril) se recomienda un caudal de 4 m³/s para el sitio P1, 1 m³/s en el sitio P2 y 8 m³/s en P3.

Estos caudales representan un factor del 0,43, 0,56 y 0,57 del caudal de excedencia del 50% para el mes de abril. Utilizando estos mismos coeficientes aplicados a los demás meses del año y con la condición estar entre los caudales de excedencia del 90 al 95% se establecieron los regímenes de caudal ambiental en las tres cuencas.

Bajo el escenario de cambio climático, se determinó que al aplicar la misma metodología para el periodo 2040-2059, las cuencas en el primer semestre del año presentarán caudales inferiores al mínimo permitido del periodo actual y en el periodo 2080-2099 esta condición se produce en todo el año.

Referencias

- [1] R.E. Tharme, «A Global Perspective on Environmental Flow Assessment: Emerging Trends in the Development and Application of Environmental Flow Methodologies for Rivers,» *River Res. Appl.*, vol. 19, pp. 397–441, 2003.
- [2] M. Dyson, G. Bergkamp, y J. Scanlon, «Caudal. Elementos esenciales de los caudales ambientales». UICN-ORMA San José CR, 2003, pp xiv+125.
- [3] “8 ríos y lagos que se están secando por el calentamiento global”, *Ecoosfera*, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://ecoosfera.com/2016/02/8-rios-y-lagos-que-se-estan-secando-por-el-calentamiento-global/>. [Accedido: 30 Mayo 2020]
- [4] Guzmán-Arias, I; Watson, F; Villagran-Mendoza, K. Determinación del caudal ambiental en el río Birrís, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-4. Octubre-Diciembre 2019. Pág 18-27, 2019
- [5] J. Calvo Alvarado, J. A. Jiménez, E. González, F. Pizarro, and A. Jiménez, “Determinación preliminar del caudal ambiental en el río Tempisque , Costa Rica: el enfoque hidrológico con limitación de datos,” *Kurú*, vol. 5, no. 13, pp. 1–18, 2008
- [6] Zuleta, C. Estimación de los efectos del cambio climático y el cambio en el uso del suelo en el caudal de la cuenca del río Pejibaye-Costa Rica, mediante el modelo hidrológico Swat. *Análisis del comportamiento del recurso hídrico ante cambios en el uso del suelo y el cambio climático en la cuenca del río Pejibaye, Costa Rica*, 21-67, 2013

- [7] Z.S. Dewson, A.B.W. James, y R.G. Death, «A review of the consequences of decreased flow for instream habitat and macroinvertebrates, » *Journal of the North American Benthological Society*, vol 26, no. 3, pp. 401–415, 2007.
- [8] D. Vásquez, R.W. Flowers, y M. Springer, «Life history of five small minnow mayflies (Ephemeroptera: Baetidae) in a small tropical stream on the Caribbean slope of Costa Rica, » *Aquatic Insects: International Journal of Freshwater Entomology*, vol. 31, no 1, pp. 319-332, 2009.
- [9] A.V. Brown, y P.P. Brussock, «Comparisons of benthic invertebrates between riffles and pools, » *Hydrobiologia*, vol. 220, pp. 99-108. 1991.
- [10] D. F. Buss, D. F. Baptista, J.L. Nessimian, y M. Egler, «Substrate specificity, environmental degradation and disturbance structuring macroinvertebrate assemblages in neotropical streams,» *Hydrobiologia*, vol. 518, no. 1, pp. 179-188, 2004.
- [11] M.P. Silveira, D.F. Buss, J.L. Nessimian, y D.F. Baptista, «Spatial and temporal distribution of benthic macroinvertebrates in a Southeastern Brazilian river,» *Brazilian Journal of Biology*, vol. 66, pp. 623-632. 2006.
- [12] M.D. McIntosh, M.F. Benbow, y A. J. Burky, «Effects of stream diversion on riffle macroinvertebrate communities in a Maui, Hawaii, stream, » *River Research and Applications*, vol. 18, pp. 569–581. 2002.
- [13] R. A. I. Kinzie, C. Chong, J. Devrell, D. Lindstrom, y R. Wolff, «Effects of water removal on a Hawaiian stream ecosystem, » *Pacific Science*, vol. 60, pp. 1–47, 2006.
- [14] P. Parasiewicz y M.J. Dunbar. “Physical habitat modelling for fish – a developing approach. *Large Rivers*. 12 (2-4), 239-268. 2001.
- [15] W. Bussing. “Peces de las aguas continentales de Costa Rica”. Editorial Universidad de Costa Rica, San Pedro, Costa Rica. 468 pp, 1998.
- [16] Baumgart, J. & Friedrich, B. Swimming across scale. *Nature Physics*, 10 (10), 758-761, 2014.
- [17] F. Quesada-Alvarado, y F. Campos. “Morphometry and burst swimming in six continental fish species from Costa Rica”. *Cuadernos de investigación*, 11(3), 395-402, 2019.
- [18] N. Gordon, T. McMahon y B. Finlayson. “Stream Hydrology An Introduction for Ecologists”. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England. 2004.
- [19] H.B. Hynes. “The ecology of running waters”. Liverpool University Press, Liverpool, U.K. 1970.
- [20] C. Gontijo, N. Tadini, y P. Santos. “Morphology and habitat use by fishes of the Rio das Velhas basin in southeastern Brazil”. *Environmental Biology of Fishes*, 90 (1), 143-157. 2011.
- [21] I. Dongkyun, C. Sung-Uk, y C. Byungwoong. “Physical habitat simulation for a fish community using the ANFIS method”. *Ecological Informatics*, 43, 73-83. 2018.
- [22] K. Seung y C. Sung. “Prediction of suitable feeding habitat for fishes in a stream using physical habitat simulations”. *Ecological Modelling*, 385 (1), 65-77. 2018.
- [23] R. M. Cortes, M. T. Ferreira, S. V. Oliveira, y D. Oliveira. “Macroinvertebrate community structure in a regulated river segment with different flow conditions. *River Research and Applications*”. 18(4), 367–382. 2002.
- [24] F. Wang y B. Lin. “Modelling habitat suitability for fish in the fluvial and lacustrine regions of a new Eco-City”. *Ecological Modelling*, 267, 115–126. 2013.

Generalidades del recurso eólico en Costa Rica: caso de estudio de la provincia de Cartago

Costa Rica's wind resource assessment: A case study for Cartago province

Gustavo Murillo-Zumbado¹, Gustavo Richmond-Navarro²,
Pedro Casanova-Treto³, Julio César Rojas-Gómez⁴

Fecha de recepción: 6 de julio de 2020

Fecha de aprobación: 27 de octubre de 2020

Murillo-Zumbado, G; Richmond-Navarro, G; Casanova-Treto, P; Rojas-Gómez, J.C. Generalidades del recurso eólico en Costa Rica: caso de estudio de la provincia de Cartago. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-4 Octubre-Diciembre 2021. Pág 130-145.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i4.5274>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: gmurillo@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-1947-3567>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: grichmond@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-5147-5952>
- 3 Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: pedro.casanova@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-8508-6293>
- 4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: jrojas@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-1375-2191>



Palabras clave

Recurso eólico; intensidad de turbulencia; rosa de los vientos.

Resumen

La evaluación del recurso eólico es vital para el desarrollo e implementación de sistemas de aprovechamiento eólico para la generación de energía. Costa Rica no posee estudios por zonas de manera específica como se plantea, que permita a los profesionales en el área tomar decisiones en función del potencial y características del viento. Con el presente estudio se brinda por primera vez la caracterización del recurso eólico en la provincia de Cartago. La caracterización se realiza para la capa límite superficial, con datos medidos a 10 m de altura sobre el nivel del suelo tomando la magnitud de la velocidad y dirección del viento obtenidas de ocho estaciones meteorológicas. Durante la caracterización del recurso eólico se analizaron los datos de forma estadística y usando códigos computacionales que permitieron obtener resultados de la información colectada. Al procesar la información brindada por las estaciones meteorológicas se determina que los promedios de velocidades del viento se encuentran entre los 3 m/s y 5 m/s a una altura de 10 m sobre la superficie. Además, la intensidad de turbulencia se registra entre 15% y 30% y se determinaron dos periodos bien marcados en cuanto a la magnitud del viento, de noviembre a febrero para intensidades fuertes y septiembre a octubre para intensidades más bajas. Para la provincia de Cartago las direcciones que predominan son las componentes Norte o Este, siendo las dos componentes más recurrentes en los datos analizados.

Keywords

Wind resource; turbulence intensity; wind rose.

Abstract

Wind resource assessment is essential for the development and implementation of wind power systems. Costa Rica have no studies by zones in a specific way as proposed, which allows professionals in the area to make decisions based on the potential and characteristics of the wind. This study provides for the first time the characterization of the wind resource in the province of Cartago. The characterization is carried out for the surface boundary layer, with data measured at 10 m above ground level, taking the magnitude of the wind speed and direction obtained from eight meteorological stations. During the characterization of the wind resource, the data was analyzed statistically and using computational codes that allowed obtaining results from the information collected. When processing the information provided by the meteorological stations, it is determined that the average wind speeds are between 3 m/s and 5 m/s at a height of 10 m above the surface. In addition, the intensity of turbulence is recorded between 15% and 30% and two well marked periods were determined in terms of the magnitude of the wind, from November to February for strong intensities and September to October for lower intensities. For the province of Cartago, the directions that predominate are the North or East components, being the two most recurrent components in the analyzed data.

Introducción

A nivel global las energías renovables y la eficiencia energética son pilares de la transformación energética y una de las claves para mitigar el efecto del cambio climático. En 2017, el sector eléctrico sumó 167 GW de capacidad energética renovable global, esto es un crecimiento

del 8,3% con respecto al año 2016 y una continuidad de las tasas de crecimiento de años anteriores, con una media del 8% anual desde 2010. Siendo de destacar que, entre el 2008 y el 2017, la capacidad global se duplicó [1].

En el caso de la energía eólica, la capacidad instalada acumulada en el planeta en 2001 fue de 23 900 MW y en 2017 alcanzó 539 123 MW, representando un aumento de más de 22 veces en un periodo de 16 años [2].

En particular, un país que se ha comprometido a alcanzar una matriz de energía eléctrica 100% renovable para el año 2030 es Costa Rica [3]. Una nación reconocida en la comunidad internacional por sus políticas de conservación y protección de la biodiversidad y que aspira a la carbono neutralidad para el 2100 [4].

Debido a la crisis del petróleo de la década de los 70's, los países como Costa Rica se vieron forzados a buscar nuevas fuentes de producción energética, los primeros estudios sobre energía eólica se realizan finalizando esa década. En la zona de Tilarán se da la construcción de los primeros parques eólicos en la década de los 90's, posteriormente se desarrolló el parque eólico Tejona, perteneciente al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y que inició sus operaciones en 2002 [5].

De acuerdo con el Plan Nacional de Desarrollo 2015-2018: "Alberto Cañas Escalante", Costa Rica pretende suplir su demanda de energía mediante una matriz que asegure un suministro óptimo, continuo y promoviendo el uso eficiente de energía, con predominio de fuentes renovables y al menor costo [6].

Para el año 2017, el 99,67% de la generación bruta anual de energía fue mediante fuentes renovables, siendo 11,49% energía eólica [7]. Además, considerando que en Costa Rica las tres principales fuentes que conforman la matriz energética son: la hidroeléctrica, la eólica y la geotérmica (en ese orden), una de las ventajas de la energía eólica es que forma un buen complemento de la energía hidroeléctrica, pues los vientos se aceleran cuando baja el caudal de los ríos [8].

Para el correcto aprovechamiento de la energía del viento, son necesarios los mapas de potencial eólico. El primero fue realizado en 1984 [9]. Entre 2008 y 2009 el ICE y la Universidad de Costa Rica emplearon modelos de meso-escala, similar al estudio de [23], para elaborar mapas y archivos con datos del recurso eólico en Costa Rica y hasta 20 km dentro del mar [5], un estudio de 2011 presenta el mapa de velocidad del viento media anual [9], siendo el más reciente de 2017, cuando el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) realiza un estudio para manejar e incorporar una mayor variedad de energías renovables en Costa Rica [10].

Considerando este panorama, se puede afirmar que Costa Rica no cuenta con estudios sobre el recurso eólico en regiones específicas del país, a partir de datos de estaciones meteorológicas. Al profundizar en este recurso, se podría revelar un potencial en alguna localidad particular, partiendo de un análisis más detallado, como el desarrollado por [11], que basado en variables como la velocidad y, dirección del viento, evidencia un gran potencial en una región colombiana.

Estudios similares en Reino Unido han permitido identificar las mejores zonas para el uso de turbinas de pequeña escala [12]. En Suecia, mediciones directas de la velocidad del viento, mediante mástiles de 100 m de altura, se emplean para determinar los sitios adecuados para el emplazamiento de parques eólicos [13]. En Nigeria se han desarrollado estudios del perfil de velocidad de viento, procesando mediciones de velocidad de viento a 10 m de altura, mediante redes neuronales [14] feed-forward, back-propagation network with different configurations, designed using the Neural Toolbox for MATLAB. The monthly mean daily wind speed data

monitored at 10 m above ground level for a period of 20 years (1983-2003). Entre tanto en Japón, se emplean técnicas avanzadas de mecánica de fluidos computacional para predecir el comportamiento del viento sobre terreno complejo [15].

El tema de evaluación del recurso eólico es de interés en localidades alrededor de todo el mundo como Pakistán [16], Burkina Faso [17] y Australia [18]. Siendo de interés incluso en desiertos en China [19] y con técnicas sumamente variadas como mediante satélites con escaterómetro en el mar Mediterráneo [20] o bien técnicas estadísticas en tres dimensiones a partir de datos medidos en tierra, empleadas en Alemania, pero exportables a cualquier otra área en el mundo [21].

Con este panorama, en el presente trabajo se caracteriza el recurso eólico en la provincia de Cartago, Costa Rica, la cual contaba con un 65% de su territorio cubierto por zonas boscosas, para el año 2005 [22]. Esta caracterización se realiza para la capa límite superficial, con datos medidos a 10 m de altura sobre el nivel del suelo, siendo el primer estudio en su tipo en Costa Rica.

Metodología

Descripción de la zona de estudio

Este estudio se concentra en la provincia de Cartago, de las siete provincias en las que se divide Costa Rica, Cartago es la segunda más pequeña con área aproximada de 3124,67 km² y se encuentra ubicada en la parte central del país, como se muestra en la figura 1. Está formada por ocho cantones: Cartago, Paraíso, La Unión, Jiménez, Turrialba, Alvarado, Oreamuno y El Guarco [24].



Figura 1. Ubicación geográfica de la provincia de Cartago. Fuente: Atlas de cantones de Costa Rica.

Según su clima, se ubica en la región climática del Valle Central. La región del valle central es afectada por las vertientes del Pacífico y del Caribe, esto genera un clima mixto que permite subdividir la región en oriental y occidental. Cartago se ubica en la parte oriental, zona con mayor influencia de la vertiente del Caribe [25]. La lluvia media anual presente en el valle central va de 1950 mm a 2820 mm y la temperatura media anual se encuentra en el rango de 15 °C a 22 °C [26].

Descripción de los datos

Los datos disponibles son magnitud de la velocidad y dirección del viento. Proviene de ocho estaciones meteorológicas, cuyos detalles se presentan en el cuadro 1 y su ubicación en la Figura 2. Las estaciones ITCR Cartago, RECOPE Ochomogo y Volcán Irazú son administradas por el Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN), suministran datos con resolución temporal horaria y abarcan un periodo de 10 años de mediciones. Las estaciones Campamento, Terrena Guatuso, San Pablo y Tierra Blanca son administradas por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), presentan datos con resolución temporal diaria y comprenden un período de 5 años. Por último, la estación meteorológica ITCR CIVCO administrada por el Centro de Investigación en Vivienda y Construcción (CIVCO), con iguales coordenadas de ubicación de la estación ITCR.

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas del IMN en la provincia de Cartago.

ID	Nombre	Latitud Norte	Longitud Oeste	Periodo	
				Inicio	Fin
1	ITCR Cartago	09° 51' 08"	83° 54' 31"	01/01/2007	31/12/2017
1	ITCR CIVCO	09° 51' 08"	83° 54' 31"	31/08/2011	02/05/2017
2	RECOPE Ochomogo	09° 53' 40,21"	83° 56' 19,41"	01/01/2007	31/12/2017
3	Volcán Irazú	09° 58' 47,53"	83° 50' 16,14"	01/01/2007	31/12/2017
4	Campamento	09° 52' 52,65"	83°38'46,28"	01/01/2013	31/12/2017
5	Terrena de Guatuso	09°49'18,90"	83°56'37,63"	01/01/2013	31/12/2017
6	San Pablo	09°56'14,34"	83°50' 06,30"	01/01/2013	31/12/2017
7	Tierra Blanca	09°54'47,16"	83°53'12,85"	01/01/2013	31/12/2017



Figura 2. Ubicación de las estaciones meteorológicas según ID mostrado en el cuadro 1.

Los datos son adquiridos con estaciones meteorológicas marca Campbell Scientific, que poseen anemómetros que mide la magnitud de la velocidad del viento en un rango de 0 m/s a 50 m/s con una precisión de $\pm 0,5$ m/s y un valor umbral de 0,5 m/s. Para la medición de la dirección del viento, disponen de una veleta que mide en un rango de 0° a 360° con una precisión de $\pm 5^\circ$ y un valor umbral de 10° para velocidades entre 0,8 m/s y 1,8 m/s y de 5° para velocidades de 1,8 m/s o mayores. También se utilizan estaciones meteorológicas marca Davis, equipadas con un anemómetro que mide magnitudes de la velocidad del viento en el rango de 0 m/s a 80 m/s con una precisión de ± 1 m/s, una resolución de 0,1 m/s y un valor umbral de 0,4 m/s. La dirección del viento, se determina a través de una veleta que mide en un rango de 0° a 360° con una precisión de $\pm 3^\circ$ para valores de velocidad de 1,6 m/s o superiores.

Descripción de los métodos de análisis

Para caracterizar el recurso eólico se analizan los datos con el apoyo del software Matlab, mediante la escritura de códigos computacionales que permiten obtener resultados de la información colectada.

El primer análisis que se realiza es la representación de las series de tiempo de la velocidad del viento, posteriormente se grafica la velocidad del viento de forma mensual y horaria, para visualizar variaciones estacionales y a lo largo de las 24 horas del día, respectivamente.

El segundo análisis que se efectúa es la distribución de frecuencia para las distintas velocidades del viento.

El tercer análisis que se efectúa es la intensidad de turbulencia, únicamente en la estación CIVCO, debido a su frecuencia de muestreo, que es cada 1 minuto.

Se utiliza la estadística descriptiva para poder representar, organizar y analizar la información recopilada de las estaciones meteorológicas. Este método permite identificar rangos o valores importantes; o patrones temporales del recurso eólico. Esto mediante medidas de tendencia central, en particular la media muestral, definida como: el promedio aritmético simple de los datos [27].

En el análisis de los datos se utiliza la media muestral de dos formas distintas, la primera para estimar distintos promedios del periodo de estudio, obteniendo datos horarios, diarios y mensuales. Con esto se tiene una descripción de la variación horaria y mensual del valor promedio del período comprendido por las estaciones meteorológicas. Los datos horarios, representan la variación del viento a lo largo de las 24 horas del día. Los datos mensuales permiten ver estacionalidad en los datos e identificar periodos de variación del viento a lo largo del año.

La segunda forma de utilizar la media muestral es para obtener los datos diarios y mensuales. De modo que se tiene una serie de tiempo diaria y mensual de los diez años de estudio, para cada estación meteorológica.

Se realizan histogramas de frecuencia, de modo que se representa gráficamente la distribución de frecuencia de los datos, se utiliza la frecuencia relativa.

También se utilizan medidas de dispersión, en particular la desviación estándar muestral, definida como la raíz cuadrada de la varianza muestral, es decir, de la medición de la distancia de los datos respecto a la media muestral.

Tanto la media muestral como la desviación estándar muestral se utilizan para el cálculo de la intensidad de turbulencia (I_T), una de las medidas básicas de la turbulencia del viento [28], dada por la ecuación (1).

$$I_T = \frac{S}{\bar{x}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i} \quad (1)$$

Donde S es la desviación estándar, \bar{x} es el promedio de los datos, i es el i ésimo dato, n es la cantidad total de datos y x_i es el dato en la i ésima posición.

Para el análisis de intensidad de turbulencia se toman los datos cada 1 minuto, disponibles únicamente en la estación CIVCO, se realiza mediante Matlab el procesamiento de los datos para generar promedios y desviaciones estándar cada 10 minutos. Posteriormente se eliminan todas las entradas que tienen velocidad cero, pues en este caso no es posible calcular la intensidad de turbulencia.

Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados del análisis estadístico de la intensidad y dirección del viento en las provincias de Cartago. Para mostrar el comportamiento general del recurso eólico, en las figuras 3 y 4 se muestra la serie de tiempo de la magnitud de la velocidad del viento, en el período comprendido por cada estación. La figura 3 se refiere a las estaciones administradas por el ICE y muestra intensidades máximas entre los 5 m/s y 7 m/s en la estación de San Pablo de Cot; las menores intensidades están entre 0 m/s y 1 m/s en la estación de Campamento. En el eje horizontal se ubica la escala temporal, se abarcan todos los datos de disponibles desde 2013 hasta 2018 y se coloca para orientación el mes de enero de cada año, indicado como “Jan”.

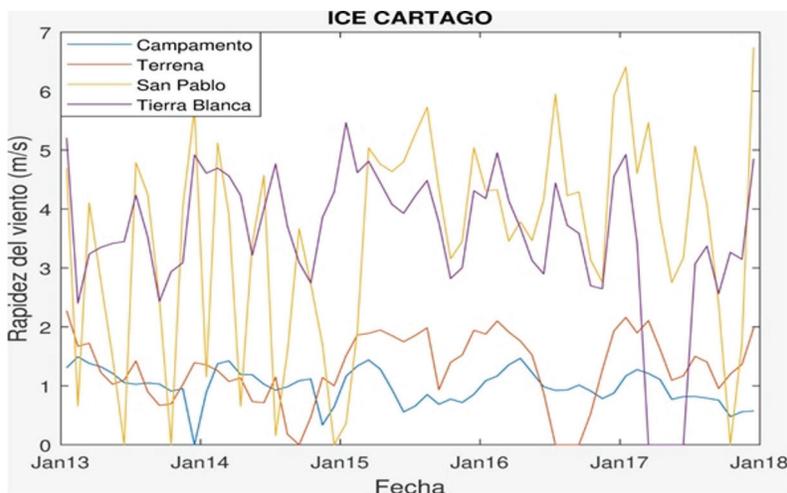


Figura 3. Series de tiempo de la magnitud del viento en las estaciones meteorológicas ubicadas en la provincia de Cartago, administradas por el ICE.

La figura 4 se refiere a las estaciones administradas por el IMN y muestra intensidades máximas entre los 5 m/s y 7 m/s en la estación de RECOPE en Ochomogo; las menores intensidades están en la misma estación en periodos de calma (0 m/s).

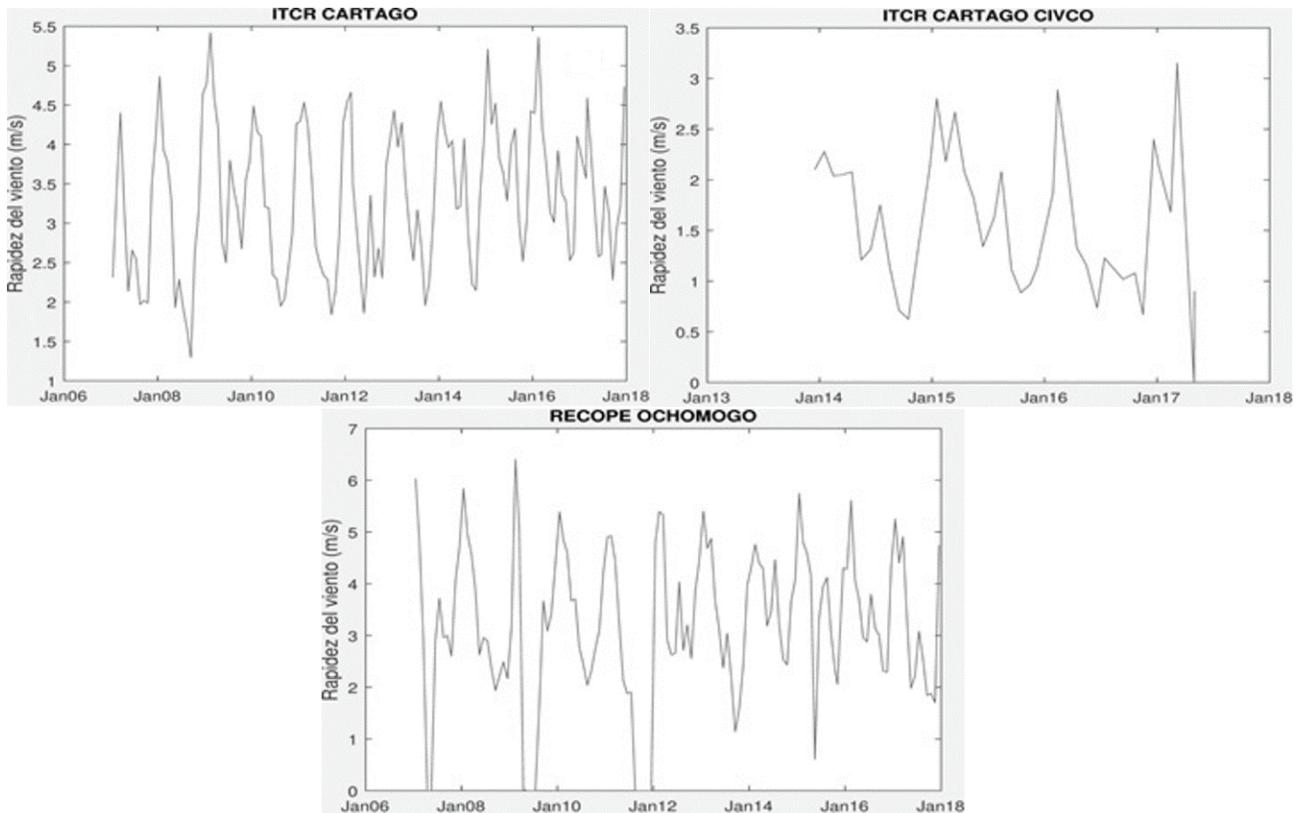


Figura 4. Series de tiempo de la magnitud de la velocidad del viento en las estaciones meteorológicas ubicadas en la provincia de Cartago, administradas por el IMN.

Variación mensual del viento

Al analizar los promedios anuales de todos los datos disponibles, se obtiene que para la región del valle central la variación mensual presenta un aumento del viento para los meses de fin de año e inicio de año, es decir los meses que van de noviembre hasta febrero. Luego se presenta una disminución de los datos con un pequeño aumento entre junio o julio, periodo conocido como las canículas; un mínimo se presenta en setiembre y octubre. En la figura 5 se presenta la distribución mensual de la magnitud de la velocidad del viento para las estaciones meteorológicas del estudio. Se muestra una distribución típica para la región climática.

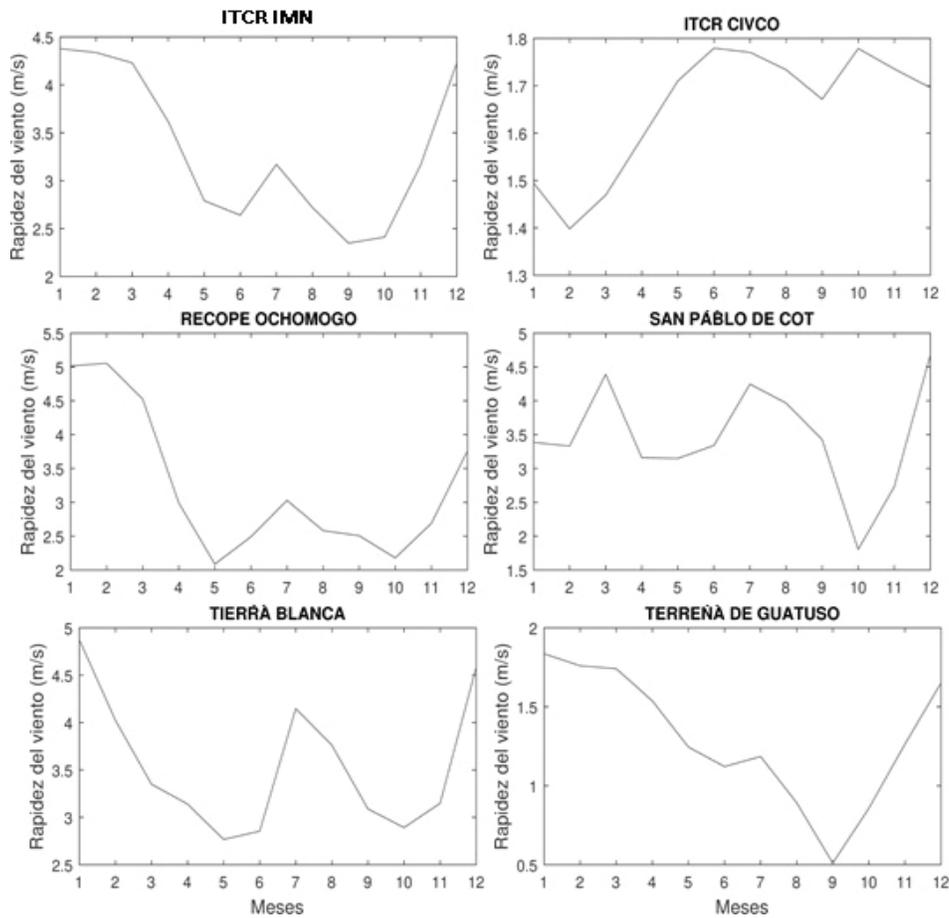


Figura 5. Distribución mensual de la magnitud del viento en las estaciones meteorológicas ubicadas en la provincia de Cartago (el eje horizontal indica el mes).

Variación horaria del viento

Utilizando las estaciones meteorológicas administradas por el IMN y el CIVCO, se logra ver la distribución a lo largo de las 24 horas del día. Donde los máximos de velocidad del viento se presentan cerca de mediodía, figura 6. Los máximos son entre 3 m/s y 5 m/s aproximadamente, la estación del CIVCO se encuentra a una altura menor que las estaciones del IMN, esa diferencia de altura se traduce en una diferencia en la magnitud del viento de 2 m/s en el máximo y un desfase del máximo de dos horas aproximadamente, como se ve en la Figura 6. La estación del IMN ubicada en el Volcán Irazú presenta un comportamiento distinto, con intensidades casi constantes de 6 m/s en horas de la noche y madrugada, con un decaimiento de la intensidad a partir de las 7:00 a.m. llegando al mínimo de 4 m/s, cerca de las 4:00 p.m., según se aprecia en la figura 6.

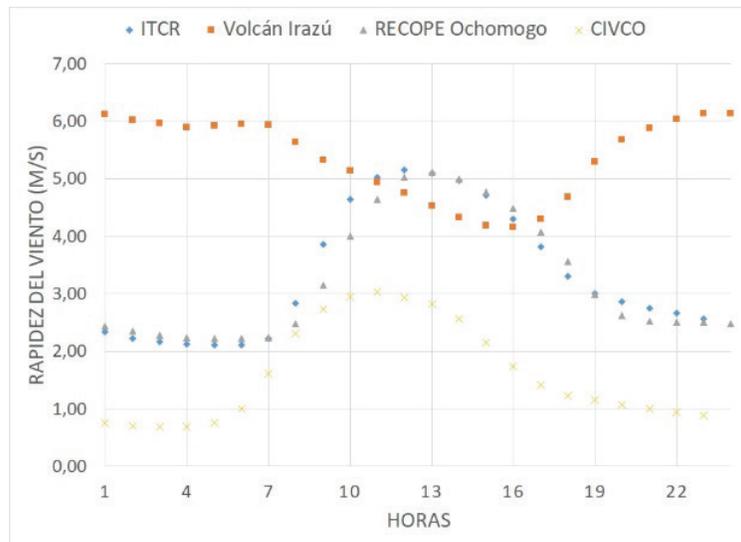


Figura 6. Distribución horaria de la magnitud del viento en las estaciones meteorológicas administradas por el IMN y el CIVCO.

Dirección del Viento

La provincia de Cartago se encuentra en la parte oriental del valle central y es influenciada por la Vertiente del Caribe, de modo que los vientos alisios son los que predominan en la provincia. En las figuras 7a-7d se puede observar la rosa de los vientos para las estaciones meteorológicas administradas por el IMN y el ICE. En cada imagen se indica la escala de velocidad del viento en m/s.

Se puede determinar, según los datos de las estaciones, que las componentes predominantes son las Este o Norte, teniendo clara influencia los vientos alisios que entran por la Vertiente del Caribe y que afectan la provincia de Cartago.

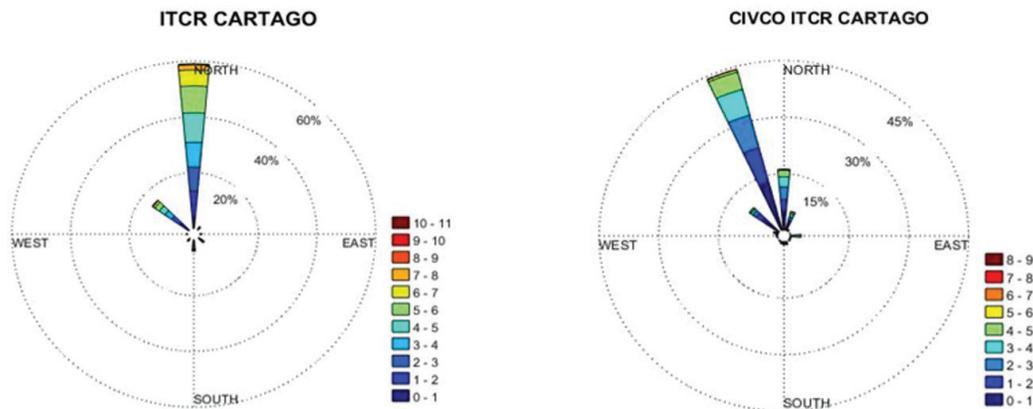


Figura 7a. Rosa de los vientos para las estaciones meteorológicas ITCR y CIVCO.

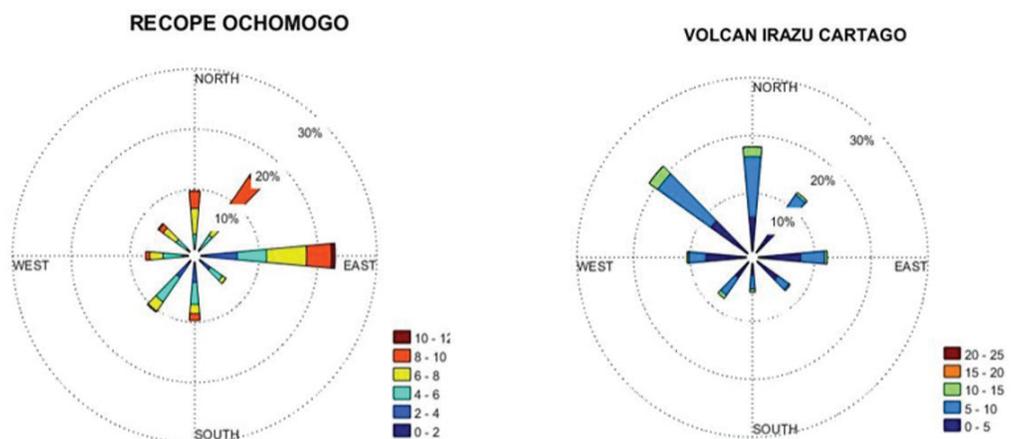


Figura 7b. Rosa de los vientos para las estaciones meteorológicas RECOPE Ochomogo y Volcán Irazú.

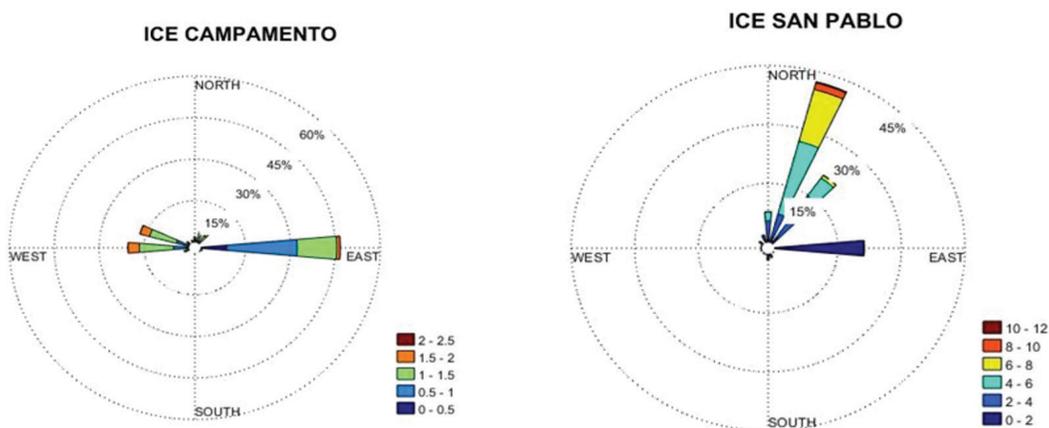


Figura 7c. Rosa de los vientos para las estaciones meteorológicas Campamento y San Pablo, administradas por el ICE.

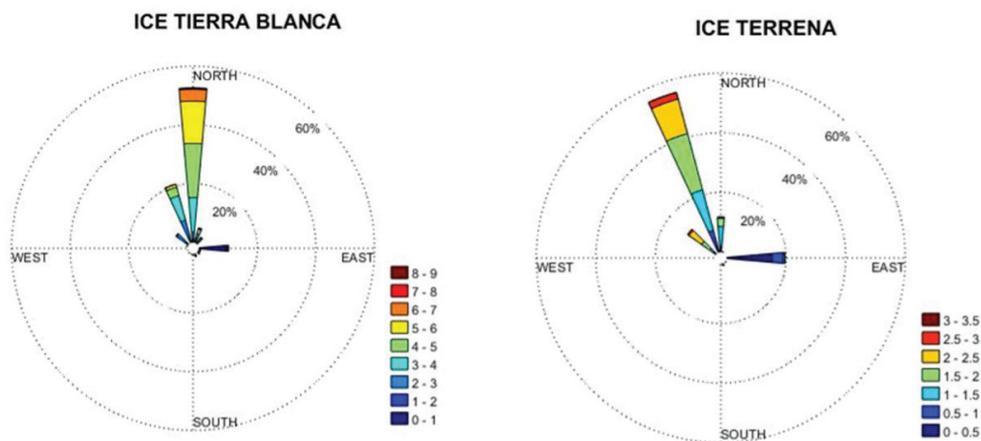


Figura 7d. Rosa de los vientos para las estaciones meteorológicas Tierra Blanca y Terrena, administradas por el ICE.

Frecuencia de distribución de la velocidad del viento según su intensidad

Como se muestra en las figuras 8a y 8b, para la provincia de Cartago se cuenta con un predominio de las intensidades de velocidad de viento entre 1 m/s y 2 m/s aunque en dos de las estaciones la magnitud que predomina se encuentra entre 4 m/s y 5 m/s, estas estaciones son las ubicadas en Tierra Blanca y en el volcán Irazú. Ambas estaciones se encuentran a mayor altitud y es esperable encontrar intensidades del viento mayores.

Es de mencionar que se consideró el viento calmo (intensidades de 0 m/s), representado por una barra gris en las figuras 8a y 8b, en tres de las ocho estaciones analizadas. El viento calmo representa el porcentaje mayor en la distribución de frecuencia en algunos casos, la estación donde esto es más evidente por la diferencia porcentual que se genera es en la estación administrada por el CIVCO, pero esta estación se encuentra a una altura sobre la superficie de 1,5 m esto hace que sea esperable que las intensidades del viento se encuentren dentro de las más bajas o que predomine el viento calmo.

La estación Volcán Irazú es la única que exhibe de forma clara la distribución típica de Weibull, que es característica de los histogramas de velocidad del viento.

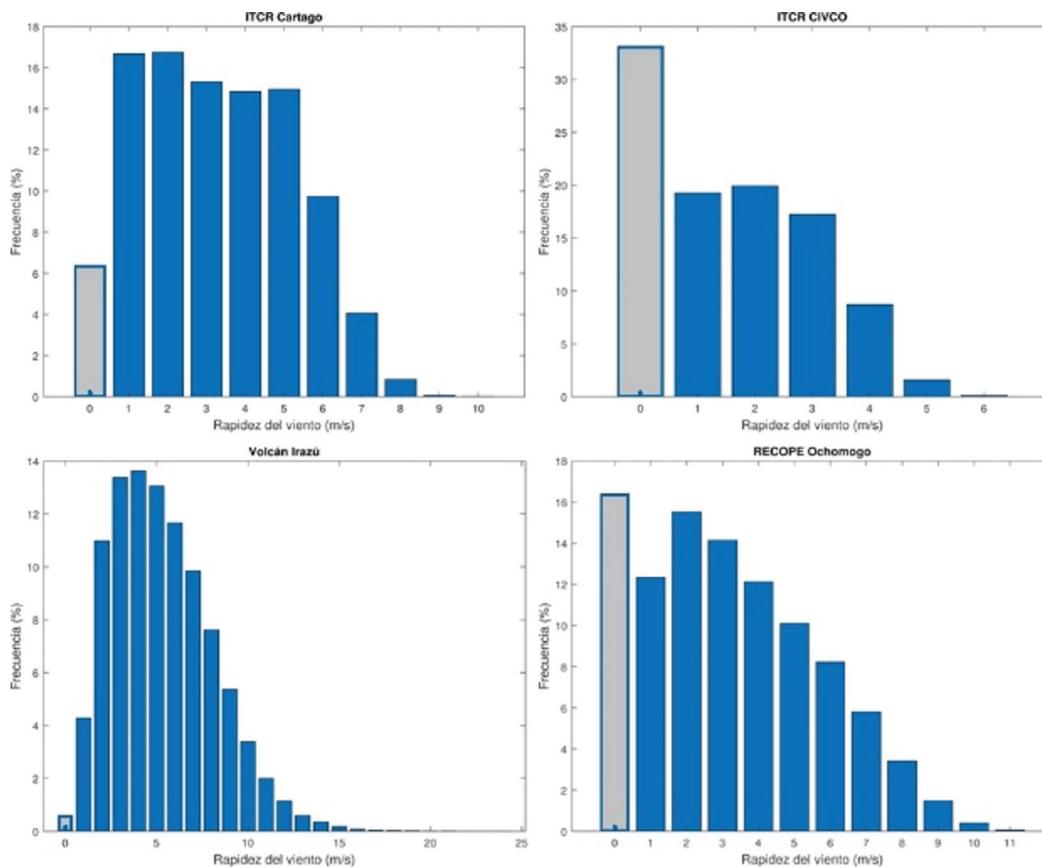


Figura 8a. Distribución de frecuencia de la magnitud de la velocidad del viento en las estaciones ITCR, CIVCO, Volcán Irazú y Ochomogo.

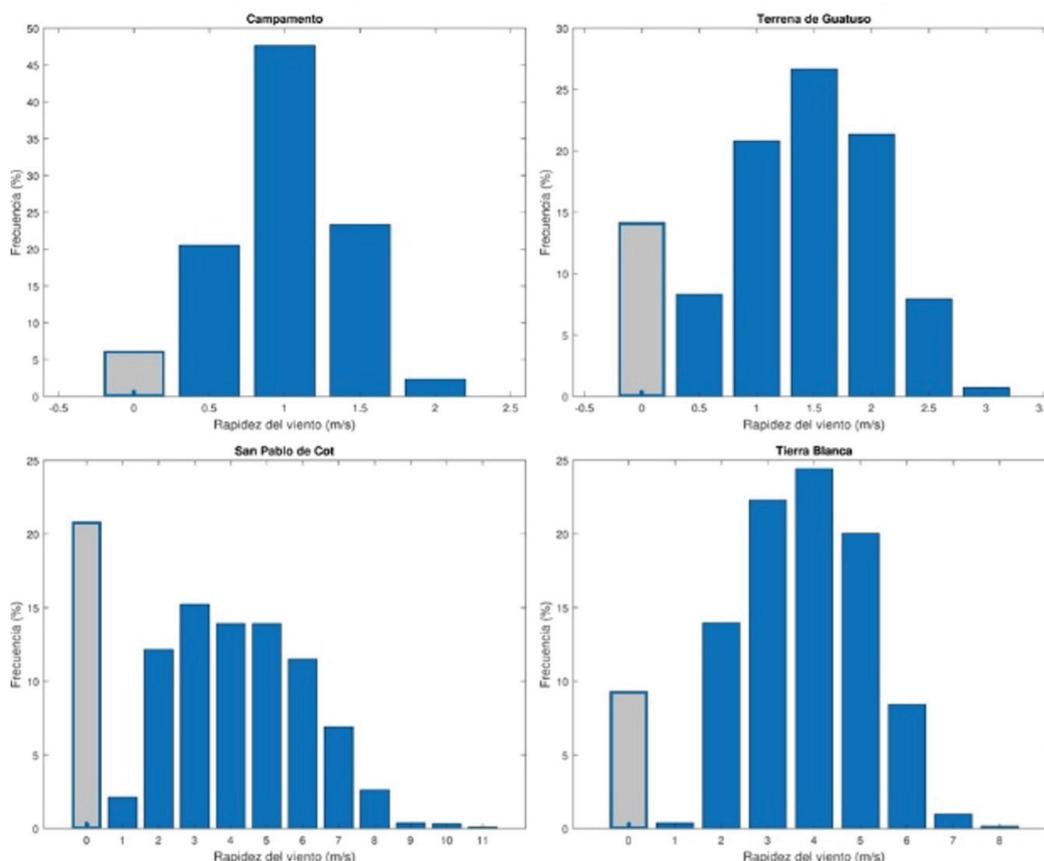


Figura 8b. Distribución de frecuencia de la magnitud del viento en las estaciones Campamento, Terrena, San Pablo y Tierra Blanca.

Intensidad de turbulencia en la estación CIVCO

Al analizar los datos disponibles en la estación CIVCO, de un total de 151 018 promedios tomados cada 10 minutos, se descartan 26 796 promedios por ser iguales a cero.

Con los datos restantes se hace una primera vista de los datos y se obtienen valores de intensidad de turbulencia (IT) de hasta 300%. Estos valores tan altos de IT se deben a que algunos promedios son muy cercanos a cero. Considerando la incertidumbre del equipo y la posible aplicación de la intensidad de turbulencia para diseño de turbinas eólicas, las cuales no operan a velocidades menores a 1 m/s de velocidad de viento, se descartan todos los promedios menores a 1 m/s.

En este caso se descartan 38 431 promedios, los cuales efectivamente corresponden a valores de IT entre 100% y 300% en su mayoría.

Siendo así, se descartaron en total 65 227, entre ceros y valores promedio menores a 1 m/s. Esto corresponde a un 43% de los datos disponibles, lo cual es previsible al ser una estación ubicada a 1,5 metros de altura sobre el nivel del suelo, como se mencionó anteriormente.

Con los datos restantes, un total de 85 791 promedios calculados cada 10 minutos, se obtiene el histograma de la Figura 9, la única estación dentro de las que se incluyen en este estudio, que permite generar este tipo de gráficos debido a su frecuencia de muestreo.

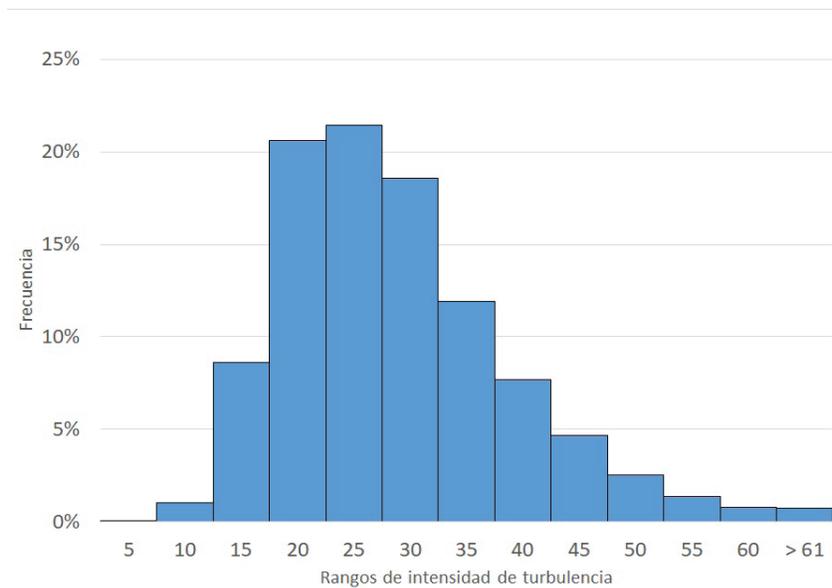


Figura 9. Histograma de la intensidad de turbulencia en la estación CIVCO.

En el histograma de la Figura 9, la cifra de intensidad de turbulencia en el eje horizontal, se interpreta como “menor o igual” para cada rango, siendo por ejemplo el número 10, el rango de IT mayor que 5% y menor o igual que 10%. De este modo las barras de mayor tamaño, indicadas como 20, 25 y 30, representan los valores de IT mayores que 15% y hasta 30%.

Estos rangos tan elevados de intensidad de turbulencia implican mucha variabilidad en la velocidad del viento. Se debe tener presente que los datos de esta estación se toman a 1,5 m sobre el nivel del suelo, por lo que es razonable registrar velocidades bajas y también capturar el efecto que tienen los obstáculos superficiales sobre el viento.

Conclusiones

Este estudio, el primero en su tipo en Costa Rica, orientado a analizar el recurso eólico en la provincia de Cartago, dentro de la capa límite superficial, con datos medidos a 10 m de altura sobre el nivel del suelo, permite indicar las siguientes características del recurso eólico en la provincia en estudio:

- En promedio los valores del viento en la región se encuentran entre los 3 y 5 m/s, esto a una altura de 10 m sobre la superficie.
- Al comparar dos estaciones ubicadas en el mismo punto, la estación a menor altura llega al máximo de velocidad de viento al menos 2 horas antes que la estación ubicada a 10 m de altura.
- La estación a mayor altura sobre el nivel del mar, pero siempre a 10 m sobre el nivel de la superficie, ubicada en el Volcán Irazú, registra las mayores velocidades en promedio, alrededor de 6 m/s.
- Con base en los datos tomados a 1,5 m de altura en las instalaciones del ITCR, la intensidad de turbulencia registra valores principalmente entre 15 y 30%.

En forma general, en la provincia de Cartago la magnitud del viento se puede diferenciar en dos periodos bien marcados, uno en los meses de fin e inicio de año (de noviembre a febrero) en los cuales las intensidades del viento son fuertes y otro periodo en los cuales la intensidad del viento disminuye hasta alcanzar los valores más bajos (septiembre y octubre).

Esta provincia presenta una fuerte influencia de los vientos alisios, provenientes de la Vertiente del Caribe, de modo que las direcciones que predominan son las componentes Norte o Este, siendo las dos componentes más recurrentes en los datos analizados.

Referencias

- [1] International Renewable Energy Agency, «Transformación Energética Mundial, hoja de ruta hasta el 2050,» IRENA, Abu Dhabi, 2018.
- [2] Global Wind Energy Council, «Global Wind Statistics,» Brussels, 2018.
- [3] L. Merino, «Estado de la Nación 2017,» Servicios Gráficos AC, Pavas, 2017.
- [4] L. M. Mora, «Programa País Carbono Neutralidad 2.0,» Dirección de Cambio Climático, 2017.
- [5] R. D. Bolaños, «Desarrollo de los proyectos de energía eólica en Costa Rica (1979-2005),» Centro de Investigaciones Geofísicas, San Pedro, 2006.
- [6] Ministerio de Ambiente y Energía, «Plan Nacional de Energía 2015-2030,» MINAE, San José, 2015.
- [7] Instituto Costarricense de Electricidad, «Plan de expansión de la generación eléctrica 2016-2035,» Proceso de expansión del sistema de dirección de planificación desarrollo eléctrico, San José, 2017.
- [8] Instituto Costarricense de Electricidad, «Plan de expansión de la generación eléctrica 2018-2034,» Proceso de expansión del sistema de la dirección de planificación y desarrollo eléctrico, San José, 2019.
- [9] J. B. Morales, «Energías Renovables no Convencionales,» San José, 2015.
- [10] T. Ackerman, F. Fernández, P. Schierhorn y F. Montoya, «Estudio de Red Costa Rica,» Energynautics, Darmstadt, 2017.
- [11] J. De la cruz, G. Valencia y M. Vanegas, «Estudio estadístico de la velocidad y la dirección del viento en los departamentos de Atlántico y Bolívar en Colombia,» *Ingeniare*, vol. 26, n° 2, pp. 319-328, 2017.
- [12] J. T. Millward-Hopkins, A. Tomlin, M. Pourkashanian, D. Ingham and L. Ma, «Mapping the Urban Wind Resource over UK Cities using an Analytical Downscaling Method,» Copenhagen, 2012.
- [13] P. Enevoldsen and F. Hendrik «Mapping the Wind Energy Potential of Sweden: A Sociotechnical Wind Atlas,» Hindawi, p. 11, 2018.
- [14] D. A. Fadare, «The application of artificial neural networks to mapping of wind speed profile for energy application in Nigeria,» *Applied Energy*, vol. 3, n° 87, pp. 934-942, 2010.
- [15] K. Ono and T. Uchida, «High-performance parallel simulation of airflow for complex terrain surface,» Hindawi, pp. 1-10, 2019.
- [16] D. Elliott, «Wind Resource Assessment and mapping for Afghanistan and Pakistan,» National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 2011.
- [17] M. Landry, Y. Ouedraogo, Y. Gagnon and A. Ouedraogo, «On the wind resource mapping of Burkina Faso,» *International Journal of Green Energy*, vol. 2, n° 14, pp. 150-156, 2017.
- [18] A. Prasad, R. A. Taylor and M. Kay, «Assessment of solar and wind resource synergy in Australia,» *Applied Energy*, pp. 354-367, 2017.
- [19] L. Li, X. Wang, L. Luo, Y. Zhao, X. Zong and N. Bachagha, «Mapping of wind energy potential over the Gobi Desert in Northwest China based on multiple sources of data,» *Frontiers of Earth Science*, vol. 2, n° 12, pp. 264-279, 2018.
- [20] B. R Furevik, A. M. Sempreviva, L. Cavaleri, J. M Lefèvre and C. Transerici, «Eight years of wind measurements from scatterometer for wind resource mapping in the Mediterranean Sea,» *Wind Energy*, vol. 3, n° 14, pp. 355-372, 2011.
- [21] C. Jung and D. Schindler, «3D statistical mapping of Germany's wind resource using WSWs,» *Energy Conversion and Management*, n° 159, pp. 96-108, 2018.
- [22] L. Muñoz, «Decimoquinto informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible» Pavas, 2008.

- [23] M. Brower, J. W. Zack, B. Bailey, M. N Schwartz and D. L. Elliott «Mesoscale modeling as a tool for wind resource assessment and mapping,» National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 2004.
- [24] Instituto de Desarrollo Rural, «Región Central Caracterización del Territorio Cartago-Oreamuno-El Guarco-La Unión,» 2016.
- [25] Instituto Meteorológico Nacional, «El clima, su variabilidad y cambio climático en Costa Rica,» San José, 2008.
- [26] R. Villalobos y J. Solano, «Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica,» 2012.

Monitoreo de la concentración de SO₂ en el aire y características físicoquímicas del agua de lluvia en el Volcán Irazú

Monitoring of SO₂ concentration in the air and physicochemical characteristics of rainwater in the Irazú Volcano

Kevin David Chaves-Solano¹, José Pablo Sibaja-Brenes²,
Esteban Pérez-López³

Fecha de recepción: 18 de agosto de 2020
Fecha de aprobación: 27 de octubre de 2020

Chaves-Solano, K.D; Sibaja-Brenes, J.P; Pérez-López, E.
Monitoreo de la concentración de so2 en el aire y caracte-
rísticas físicoquímicas del agua de lluvia en el Volcán Irazú.
Tecnología en Marcha. Vol. 34-4 Octubre-Diciembre 2021.
Pág 146-162.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i4.5113>

- 1 Bachiller en Laboratorista Químico. Universidad de Costa Rica, recinto Grecia, Costa Rica. Correo electrónico: kevinchavessolan@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-8540-6023>
- 2 Magister Scientiae en Gestión y Estudios Ambientales, Licenciado en Química Industrial, Académico Escuela de Química, Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: jose.sibaja.brenes@una.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-7056-2717>
- 3 Máster en Sistemas Modernos de Manufactura y Bach. en Laboratorista Químico. Académico Universidad de Costa Rica, recinto Grecia, Costa Rica. Correo electrónico: esteban.perezlopez@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-6379-7139>



Palabras clave

Dióxido de azufre; cromatografía de iones; agua de lluvia; parámetros fisicoquímicos; lluvia ácida.

Resumen

El dióxido de azufre y otros contaminantes químicos pueden llegar a la naturaleza y el ambiente por medio de la actividad volcánica. Debido a esto, en Costa Rica, las zonas cercanas a los volcanes se encuentran afectadas con estos contaminantes. Por ello, se realizó un monitoreo de la concentración del dióxido de azufre en aire, y la determinación del pH y la concentración de fluoruro, cloruro, bromuro, fosfato y sulfato en agua de lluvia en el Volcán Irazú, en el 2019. Inicialmente se evaluaron los parámetros de desempeño analítico: linealidad, repetibilidad, precisión intermedia, límite de detección y cuantificación en el método empleado. Se utilizaron muestreadores o recolectores húmedos especiales en puntos específicos de la zona, luego las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT), donde se determinó por medio de cromatografía de iones la concentración de los aniones en agua. El pH fue determinado con un pH-metro calibrado. Los resultados obtenidos indican que el dióxido de azufre no sobrepasa los límites permitidos. Además, los resultados de pH de las muestras de agua de lluvia (3,55 a 5,33) indican presencia de lluvia ácida en las zonas cercanas al cráter del Volcán, por lo que, para utilizarla se debe efectuar un tratamiento que disminuya la acidez. Así mismo, los resultados de los aniones en el agua de lluvia presentaron valores bajos (menores a 6,58 mg/l), además, no fue posible detectar bromuro y fosfato en las muestras. La concentración de dióxido de azufre presente no se considera perjudicial para la salud de los visitantes y para los trabajadores de la zona.

Keywords

Sulfur dioxide; ion chromatography; rainwater; physicochemical parameters; acid rain.

Abstract

Sulfur dioxide and other chemical pollutants can reach nature and the environment through volcanic activity. Due to this, in Costa Rica, the areas near the volcanoes are affected with these pollutants. Therefore, a monitoring of the concentration of sulfur dioxide in air was carried out, and the determination of the pH and concentration of fluoride, chloride, bromide, phosphate and sulfate in rainwater at the Irazú Volcano, in 2019. Initially, Analytical performance parameters were evaluated: linearity, repeatability, intermediate precision, limit of detection and quantification in the method used. Special wet samplers or collectors were used at specific points in the area, then the samples were analyzed in the Laboratory of Atmospheric Chemistry (LAQAT), where the concentration of the anions in water was determined by means of ion chromatography. The pH was determined with a calibrated pH-meter. The results obtained indicate that the sulfur dioxide does not exceed the permitted limits. In addition, the pH results of the rainwater samples (3.55 to 5.33) indicate the presence of acid rain in the areas near the crater of the volcano, therefore, to use it, a treatment that reduces the acidity. Likewise, the results of the anions in the rainwater presented low values (less than 6.58 mg / l), in addition, it was not possible to detect bromide and phosphate in the samples. The concentration of sulfur dioxide present is not considered detrimental to the health of visitors and workers in the area.

Introducción

El dióxido de azufre se origina en la naturaleza por medio de la actividad volcánica. Cuando el dióxido de azufre se encuentra en altas concentraciones en el ambiente, genera problemas respiratorios y cardiovasculares, además, puede reaccionar, ocasionando lluvia ácida por la formación de ácido sulfúrico [1]. También, el agua de lluvia puede encontrarse contaminada por aniones que afectan la calidad y pueden ser perjudiciales para la salud. Aniones como el fluoruro, el cloruro y el sulfato se encuentran presente de forma natural por erosión o actividad volcánica. El fluoruro es un anión que no debe exceder 1,5 mg/l en agua de consumo, cantidades mayores pueden causar problemas de salud como la fluorosis dental [2].

Por otro lado, los sulfatos presentes en el agua en cantidades mayores a los 500 mg/l afecta considerablemente la potabilidad de esta, generando problemas gastrointestinales, por lo que, la OMS recomienda que no se exceda este límite para el agua de consumo y notificar a las autoridades cuando se supere este límite. Así mismo, a partir de 250 mg/l de sulfatos en agua, se percibe el sabor, por lo que, disminuye la calidad del agua [3].

En Colombia, Garzón et al [4], efectuaron un estudio de las estrategias de medición de gases volcánicos utilizando sensores ópticos. El estudio consistió en realizar mediciones en el volcán Nevado de Huilas. Los resultados indican que el volcán arroja 35,4 kg/s de dióxido de azufre el 1 de junio del 2007; y se registró un flujo de entre 5,6 kg/s a 7,9 kg/s del 23 al 24 de mayo del 2008. Asimismo, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [5] realizó un monitoreo de las emisiones del volcán Popocatépetl en México. El monitoreo consistió en recolectar muestras de aire por medio de muestreadores de depósito atmosférico para luego determinar las partículas presentes en el aire por medio de análisis gravimétrico. Los resultados obtenidos demuestran que la cantidad de partículas suspendidas en el aire que corresponden a óxidos de azufre, no generan problemas de salud.

Castruccio y Rondanelli [6] efectuaron un estudio de SO₂ en penachos volcánicos de los volcanes Láscar, Ollagüe e Irruputuncu. El estudio consistió en determinar la cantidad de dióxido de azufre emanados en penachos volcánicos utilizando una cámara ultravioleta. Los resultados se encuentran entre 400 ppm/m y 1700 ppm/m. Las concentraciones se encontraban en el rango esperado.

De igual modo, Ponce [7] realizó una estimación de dióxido de azufre en el volcán Galeras en Colombia. La cuantificación se realizó para comparar el crecimiento de un domo de lava en el Volcán Galeras con la emanación de dióxido de azufre. Se obtuvo como resultado que a una velocidad promedio de 5 m/s, el volcán emanó 334 947 toneladas de SO₂.

Por otro lado, existen estudios relacionados con los aniones presentes en agua para verificar la calidad de la misma, ya sea agua de consumo, superficial, de lluvia o volcánica. En este sentido, Pérez et al [8] realizaron un estudio de caracterización química de aguas en pozos y un distribuidor de agua de Zimapán. El estudio consistió en realizar muestreos en 11 puntos estratégicos, para luego analizar 28 parámetros fisicoquímicos. Los resultados obtenidos indican que posee bajos niveles de sodio, potasio, sulfatos y cloruros, además, los niveles de metales pesados son más bajos de lo que indica la normativa, excepto por el arsénico, el cual se encuentra a niveles sumamente altos. El pH se encuentra en los límites establecidos por la normativa.

Asimismo, Galicia et al [9] realizaron una indagación acerca de la concentración de fluoruro en el agua potable de la delegación de Tláhuac en México. El estudio consistió en realizar una determinación de la concentración de fluoruro mediante el método potenciométrico en 144 muestras recolectadas en pozos y zonas vecinas de la delegación. Los resultados obtenidos

varían desde 0,44 ppm a 1,28 ppm de fluoruro, con una media de 0,86 ppm, en los cuales, la mayoría de los resultados se encuentran por encima de la normativa en relación con el consumo de sal fluorada.

Erazo et al [10] realizaron una investigación en Colombia acerca del impacto de los fluidos volcánicos en el recurso hídrico de la cuenca del río Chinchiná. Para ello, realizaron un monitoreo en los puntos claves donde pueda existir influencia volcánica. Los resultados obtenidos evidenciaron influencia por parte del volcán Nevado de Ruíz debido a los valores altos de los iones de sulfato, nitrato, cloruros, sodio y potasio. El pH se encontró entre 6,98 y 7,90.

Por su parte en Costa Rica, Alvarado [11] realizó un análisis sobre el impacto en la salud de las emisiones de dióxido de azufre del Volcán Arenal en la población de la fortuna en San Carlos. El estudio consistió en observar si las concentraciones de las emisiones de dióxido de azufre del Volcán Arenal pueden representar una amenaza a la salud de los habitantes de los alrededores. Los resultados indican que cuando el volcán emite 120 ton/día de dióxido de azufre no existe riesgo en la salud, cuando emite 800 ton/día y 12 000 ton/día existe un riesgo considerable en la salud, sobre todo en problemas respiratorios y cardíacos.

En relación con los iones en agua, Beita [12] efectuó un estudio de caracterización fisicoquímica de las aguas superficiales de la cuenca del Río Rincón, en la Península de Osa. El estudio consistió en realizar muestreos en 11 puntos definidos en el río Rincón, luego se determinó las características fisicoquímicas como temperatura, pH, alcalinidad parcial y total, dureza, conductividad, oxígeno disuelto, sólidos suspendidos totales, concentración de calcio, cloruro, fósforo, magnesio, nitratos, nitritos, potasio, sodio y sulfatos. Los resultados indican que el agua de la cuenca se clasifica como bicarbonatada, además que, las actividades humanas no han tenido impacto negativo sobre la cuenca, si no, a las características geogénicas de la misma.

Por su parte, Herrera y Rodríguez [13] realizaron una determinación de iones en el agua pluvial recolectada en San José. Se recolectó agua de seis sitios de la ciudad de San José entre julio y septiembre del 2006, luego se determinó el pH, concentración de SO_4^{-2} , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , Br^- , PO_4^{-3} y F^- y conductividad. La concentración de los iones se cuantificó mediante cromatografía de intercambio iónico. Los resultados obtenidos indican que el 45 % de las muestras presentan valores de pH entre 4,0 y 5,6, mientras que el 26 % de las muestras fueron básicas. También se aprecia una contribución de origen antrópico en la concentración de iones nitrato y nitrito, mientras que para los sulfatos y cloruros hay una contribución de fuentes antrópicas y marinas.

También, Bolaños et al [14] efectuó un estudio preliminar sobre la composición del agua de lluvia en y los alrededores del Parque Nacional Volcán Poás. El estudio consistió en evaluar la composición atmosférica del agua de lluvia, se evaluaron parámetros como el pH, conductividad y concentración de aniones (F^- , Cl^- , NO_3^- y SO_4^{-2}). Los resultados más significativos se encontraron cerca del foco o en el mirador, con valores de pH de 2,50, concentraciones de iones de 66,3 mg/l de fluoruro, 308,1 mg/l para cloruros y 249,1 mg/l para los sulfatos.

En relación con las emanaciones volcánicas, Sibaja et al [15] efectuó una medición y un modelaje del dióxido de azufre en los alrededores del Volcán Poás durante el 2019. El estudio consistió en determinar la concentración de dióxido de azufre presente en y los alrededores del Volcán Poás, para ello se recolectaron muestras mediante sistemas de burbujeo, luego se almacenó en filtros a 4 °C y se cuantificó la concentración de sulfato. Los resultados indicaron que en la casa de los guardaparques hay 49 360 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 4 h y en el centro de visitantes 10 171 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 4 h.

Importante indicar que, Costa Rica define parámetros para el control de la calidad del agua de consumo, para el fluoruro el valor máximo admisible es de 0,7 mg/l a 1,5 mg/l; para el nitrato es de 50 mg/l, el cloruro 250 mg/l y para los sulfatos el valor máximo es de 250 mg/l. Estos parámetros deben cumplirse, de lo contrario el Ministerio de Salud de Costa Rica aplica sanciones y hasta el cierre de instalaciones de potabilización [16].

La actividad volcánica es una de las principales fuentes naturales de contaminantes atmosféricos. Los gases emitidos por un volcán dependen de la naturaleza del mismo, sin embargo, regularmente emiten vapor de agua, dióxido de carbono, dióxido de azufre, sulfuro de hidrógeno y cloruro de hidrógeno. Otros gases que se pueden encontrar, pero en menor medida son el disulfuro de carbono, sulfuro de carbonilo y fluoruro de hidrógeno. Además, la emisión de gases de dióxido de carbono y azufre ayuda a predecir si existe una posible erupción inminente [17].

Así mismo, los gases volcánicos pueden producir lluvia ácida mediante la reacción del trióxido de azufre con el agua. Esto sucede cuando emiten cantidades elevadas de SO_2 , este se oxida con el aire formando SO_3 mediante dos procesos, uno por el cual se combina el dióxido de azufre con el ozono atmosférico y otro cuando el dióxido de azufre se combina con el oxígeno. Luego el trióxido de azufre reacciona con el agua de las nubes, generando ácido sulfúrico que precipita en forma de lluvia [18]. El agua de lluvia regularmente posee un pH de 5,6, lo que se puede considerar ligeramente ácido, cuando posee un valor de pH menor a 5, se considera lluvia ácida. La acidez del agua depende de la interacción de las sustancias alcalinas y ácidas [19].

El agua de lluvia no solo puede estar contaminada con ácido sulfúrico, también se pueden encontrar contaminantes como metales pesados, iones, partículas en suspensión y microorganismos. Los contaminantes pueden ser aportados antropológicamente o de forma natural por medio de la actividad volcánica. Dentro de los contaminantes presentes en el agua de lluvia podemos encontrar óxidos de nitrato y azufre, metales pesados como cadmio, cobre, hierro, arsénico, cromo, vanadio, plomo, zinc, manganeso, hierro, mercurio, aluminio, rodio, paladio, rubidio y níquel. Por esta razón es indispensable realizar análisis en caso que el agua sea destinada para consumo [20].

En las montañas, el agua puede estar contaminada con iones provenientes de la actividad volcánica y antropogénica. Sin embargo, al encontrarse lejos de la ciudad, el agua pluvial no posee cantidades significativas de metales pesados, pero contiene NO_x , SO_2 , NH_3 , Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ [21]. Para analizar los iones presentes en agua o aire, una de las técnicas más comunes es la cromatografía iónica, ya que, permite la determinación simultánea de iones como F^- , ClO_2^- , BrO_3^- , Cl^- , NO_2^- , ClO_3^- , Br^- , NO_3^- , PO_4^{3-} y SO_4^{2-} . La cromatografía de intercambio iónico con supresión utiliza un sistema supresor para detectar iones a partir de la conductividad eléctrica de los mismos. [22].

La presente investigación contempló el monitoreo de la concentración de dióxido de azufre en el aire, así como de algunos aniones y características fisicoquímicas en el agua de lluvia en el Volcán Irazú, con miras a determinar una eventual influencia del Volcán Turrialba, debido al traslado de material volcánico por vía aérea, dado por el marcado efecto de los vientos entre los dos macizos que ha llevado a estudios previos a intuir tal afectación. A su vez, se buscó determinar la posibilidad de emplear el agua de lluvia, con o sin un tratamiento previo, para fines domésticos en los quehaceres de los guardaparques del Volcán Irazú, según los resultados de la caracterización efectuada a las muestras del agua de lluvia. Esto es de suma importancia debido a que, el Volcán Irazú es un sector turístico del país que recibe una gran cantidad de personas, por lo que, es necesario efectuar análisis de agua y aire periódicamente para asegurar el bienestar de los visitantes y de los trabajadores del sitio. Además, el agua de

lluvia es utilizada para las baterías de los baños y para uso doméstico de los guardaparques, por lo que, es necesario efectuar un análisis de los iones presentes en el agua de lluvia para garantizar la seguridad de su consumo.

Metodología

Con respecto al muestreo previo a la obtención de datos, todos los puntos de muestreo se establecieron fuera del alcance de elementos que pudieran alterar los datos, como árboles, cables, vegetación y animales. Los cuatro puntos de muestreo para la obtención de agua pluvial se encuentran estratégicamente ubicados en zonas cercanas donde se obtiene agua para uso doméstico, así como en la zona cercana al volcán para observar la afectación del mismo. De igual forma, los puntos para el muestreo de gases se encuentran de forma estratégica, sin embargo, estos se establecieron de acuerdo a la posible afectación a los visitantes del volcán.

De esta forma, los puntos de muestreo 1, 3 y 4 para la recolección de agua pluvial se encuentran cercanos a las tomas de agua para uso doméstico, mientras que el punto de muestreo 2 se encuentra dispuesto para observar la influencia del volcán en la zona más cercana posible.

Asimismo, los puntos 1 y 2 para la recolección de SO_2 se encuentran en dos zonas donde hay un tránsito de personas bastante importante. Tanto en la cafetería y el mirador es donde se encuentra el cúmulo más importante de personas, por lo que, se escogieron específicamente estos dos puntos para determinar si existe una afectación significativa sobre los visitantes y trabajadores del lugar.

Por consiguiente, previo a los muestreos y con miras a garantizar la idoneidad y la confiabilidad del método analítico empleado por cromatografía de iones, en vista de la intervención por primera vez del analista de laboratorio que realizó las pruebas de laboratorio; se verificaron los parámetros de desempeño analítico del método aportado por Thermo Scientific, modificado y validado previamente por el OVSICORI, lugar donde se realizaron las pruebas pertinentes de esta investigación. La verificación contempló los siguientes parámetros de desempeño: precisión intermedia, linealidad, repetibilidad, límite de detección y de cuantificación.

- *Repetibilidad*: se evaluó a través de siete mediciones consecutivas de la misma muestra. Se cuantificó el desvío relativo estándar (DSR), el cual debe ser menor a 1,5 % y el coeficiente de variación (CV) debe ser menor a 2 % para asegurar repetibilidad.
- *Precisión intermedia*: se cuantificó una muestra definida en el mismo equipo, en días diferentes, con el mismo método y el mismo analista. La condición que varía en este caso es el día de análisis, por cuestiones de logística no se pudo cambiar otra condición del análisis. El coeficiente de variación debe ser menor a 2,5 % y el desvío relativo promedio menor a 2,5 %.
- *Linealidad*: se confeccionaron tres curvas de calibración con al menos cinco puntos de concentraciones diferentes, luego se graficó tomando en el eje x las concentraciones de los patrones y en el eje y los resultados obtenidos. El valor obtenido de r^2 debe ser mayor a 0,995 para que posea validez estadística. Se verificó que se cumpla la ecuación de la recta mediante la fórmula $y = mx + b$. Por último, se presentan los resultados de regresión lineal que contenga coeficientes de variación, de determinación, intersección con el eje, pendiente de la recta y cálculo de residuales.
- *Límite de detección y cuantificación*: se cuantificaron mediante el uso de un modelo matemático de ajuste aplicando mínimos cuadrados a las curvas de calibración empleadas para la determinación de linealidad. El límite de detección se define mediante

la fórmula $3 \cdot S_B / m$, donde S_B es la desviación estándar de las áreas de los blancos y m es la pendiente de la recta. El límite de cuantificación se calcula de la misma forma, pero con la fórmula $10 \cdot S_B / m$.

La toma de muestras de aire se realizó por medio de recolectores que absorben una cantidad de aire específico y lo transportan a través de una disolución diluida de peróxido de hidrógeno en medio ácido. Se cuantificó la cantidad de dióxido de azufre mediante un cromatógrafo de iones marca Dionex. Las condiciones experimentales del muestreo fueron: velocidad del flujo 750 l/h, tiempo de recolección 3 h a 4 h, temperatura ambiental, alícuota del burbujeador 25 ml.

Para que el muestreo de lluvia se efectúe de forma adecuada, se requiere que las muestras representen la precipitación natural integrada en la ventana de tiempo de interés. También, el equipo de muestreo debe estar adecuado a la zona, colocarse en un campo abierto lejos de la influencia de edificios. Además, en zonas abiertas el dispositivo se debe colocar a 30 cm sobre el suelo para reducir el efecto del viento, en zonas con estructuras o con mucha vegetación, el dispositivo se debe colocar de 100 cm a 120 cm sobre el suelo para reducir el efecto de la vegetación o las estructuras. El instrumento utilizado es un pluviómetro que capta el agua de lluvia a través de un cono y se deposita en un recipiente adecuado [23].

En los cuadros 1, 2 y 3 se muestran los datos obtenidos en el sitio de muestreo por medio de los equipos recolectores y del GPS. Además, los sitios de muestreo específicos donde se recolectaron las muestras.

Cuadro 1. Datos *in situ* de los dos puntos del primer muestreo de SO_2

	Punto de muestreo 1: Cafetería	Punto de muestreo 2: Mirador
Fecha del muestreo	17/09/2019	17/09/2019
Altitud	3337 m	3334 m
Coordenadas	N: 09°58'40,8" O: 83°50'42,0"	N: 09°58'47,3" O: 83°50'51,5"
Presión atmosférica promedio	513 mmHg	518 mmHg
Temperatura promedio	15,0 °C	26,0 °C
Humedad relativa	80 %	60 %
Viento	(12 a 28) km/h al noroeste	> 12 km/h al norte
Flujo	750 ml/min	750 ml/min
Tiempo del muestreo	4 h	4 h
Volumen de aire aspirado	115,599 l	119,498 l

Cuadro 2. Datos *in situ* de los dos puntos del segundo muestreo de SO₂

	Punto de muestreo 1: Cafetería	Punto de muestreo 2: Mirador
Fecha del muestreo	26/10/2019	26/10/2019
Altitud	3337 m	3334 m
Coordenadas	N: 09°58'40,8" O: 83°50'42,0"	N: 09°58'47,3" O: 83°50'51,5"
Presión atmosférica promedio	517 mmHg	515 mmHg
Temperatura promedio	15,5 °C	16,0 °C
Humedad relativa	70 %	60 %
Viento	> 12 km/h al este	> 12 km/h al este
Flujo	750 ml/min	750 ml/min
Tiempo del muestreo	3 h	3 h
Volumen de aire aspirado	97,060 l	100,663 l

Cuadro 3. Datos *in situ* de los cuatro puntos del primer y segundo muestreo de agua de lluvia.

Primer muestreo				
	Punto 1: Letrero de la entrada	Punto 2: Mirador	Punto 3: División entre cráteres	Punto 4: Prusia
Coordenadas	N:09°58'42,6" O:83°50'43,5"	N:09°58'47,6" O:83°50'51,5"	N:09°58'50,2" O:83°50'51,6"	N:09°57'23,1" O:83°52'42"
Altura	3349 m	3334 m	3303 m	2736 m
Segundo muestreo				
	Punto 1: Letrero de la entrada	Punto 2: Mirador	Punto 3: División entre cráteres	Punto 4: Prusia
Coordenadas	N:09°58'42,6" O:83°50'43,5"	N:09°58'47,6" O:83°50'51,5"	N:09°58'50,2" O:83°50'51,6"	N:09°57'23,1" O:83°52'42"
Altura	3349 m	3334 m	3303 m	2736 m

La recolección del agua de lluvia se llevó a cabo mediante un sistema constituido por una botella de polietileno ámbar de 1 litro y un embudo de 7,7 cm de diámetro de polietileno de espiga corta. El embudo se sujetó a la botella con un tapón de hule perforado. En el extremo inferior del embudo se colocó un cedazo de polietileno para evitar la entrada de partículas grandes. Las botellas recolectoras del agua de lluvia se colocaron en un soporte de madera, a un metro de altura con respecto al suelo, para prevenir la contaminación de las muestras por

salpicaduras. Luego se midió el pH por medio de un pH-metro marca Oakton, calibrado con anterioridad, y los iones fluoruro, cloruro, bromuro, fosfato y sulfato, se cuantificaron mediante un cromatógrafo de iones marca DIONEX. Para introducir las muestras en el equipo se filtraron a través de una jeringa con un filtro de 0,5 µm.

Se realizaron curvas de calibración para cada ión analizado y se interpoló el resultado. Las condiciones cromatográficas fueron: columna Dionex IonPac AS9-HC, detector de conductividad eléctrica, flujo 0,250 ml/min, fase móvil NaHCO₃/ Na₂CO₃, volumen de inyección 40 µl.

Por último, cabe destacar que las muestras de agua de lluvia tomadas en los diferentes puntos fueron analizadas para determinar si es posible una eventual potabilización del agua para usos domésticos y coadyuvar al uso racional del recurso hídrico en la zona.

Con respecto al análisis de los datos se emplearon pruebas estadísticas descriptivas e inferenciales con el fin de determinar el cumplimiento de la evaluación de parámetros analíticos del método empleado, así como en el análisis de los resultados para las pruebas específicas aplicadas a las muestras recolectadas.

Resultados

Con respecto a la verificación del método analítico empleado, para las pruebas de linealidad de cada analito se obtuvieron coeficientes de determinación (r^2) por arriba de lo esperado (0,995). Además, para verificar la homogeneidad de varianzas en la linealidad se realizó un análisis estadístico de homocedasticidad o prueba C de Cochran que permitió medir si se cumple la homogeneidad de las varianzas en las curvas de calibración para cada anión, siendo estas positivas con C calculada menor a la C teórica, por lo que no se rechaza la hipótesis nula, excepto para el caso del sulfato.

En la prueba de homocedasticidad para el sulfato se presenta rechazo de la hipótesis nula, por lo cual se acude a aplicar la prueba de Levene (figura 1) para demostrar la homogeneidad de varianzas en la linealidad de las curvas de calibración del sulfato, y la prueba cumple con lo esperado.

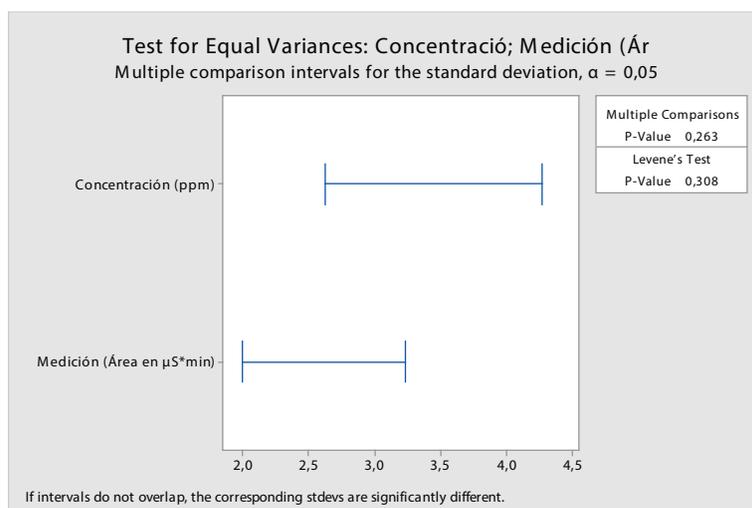


Figura 1. Prueba de Levene para la linealidad de las curvas de calibración del sulfato.

En el cuadro 4, se presentan los datos correspondientes a límite de cuantificación y límite de detección para cada anión determinado.

Cuadro 4. Resultados de los límites de cuantificación y detección por método empleado en cada anión determinado mediante la aplicación de mínimos cuadrados.

Anión	Parámetro	Valor
Fluoruro	Límite de detección	0,18
	Límite de cuantificación	0,61
	Desviación estándar del intercepto (S_b)	0,09
	Pendiente (m)	1,4626
Cloruro	Límite de detección	0,22
	Límite de cuantificación	0,72
	Desviación estándar del intercepto (S_b)	0,09
	Pendiente (m)	1,2643
Bromuro	Límite de detección	0,20
	Límite de cuantificación	0,65
	Desviación estándar del intercepto (S_b)	0,03
	Pendiente (m)	0,4649
Fosfato	Límite de detección	0,21
	Límite de cuantificación	0,72
	Desviación estándar del intercepto (S_b)	0,02
	Pendiente (m)	0,2703
Sulfato	Límite de detección	0,20
	Límite de cuantificación	0,68
	Desviación estándar del intercepto (S_b)	0,05
	Pendiente (m)	0,7567

Asimismo, se determinó la repetibilidad y precisión intermedia del método, los cuales poseen un límite de aceptación de 10 % y 5 % respectivamente, según los parámetros establecidos por el laboratorio. Los resultados de la repetibilidad se muestran en el cuadro 5 y la precisión intermedia en el cuadro 6.

Cuadro 5. Resultados del parámetro de repetibilidad para el método de cuantificación de fluoruro, cloruro y sulfato.

Anión	Concentración (mg/l)	Promedio	Desviación	DSR%	Aceptación
Fluoruro (±0,02)	0,56	0,56	0,0085	1,5	10 %
	0,55				
	0,56				
	0,55				
	0,55				
	0,57				
	0,57				
Cloruro (±0,02)	3,71	3,73	0,0182	0,5	10 %
	3,73				
	3,73				
	3,75				
	3,75				
	3,71				
	3,72				
Sulfato (±0,1)	6,56	6,59	0,0566	0,9	10 %
	6,58				
	6,63				
	6,62				
	6,48				
	6,64				
	6,62				

Cuadro 6. Resultados del parámetro de precisión intermedia para el método de cuantificación de fluoruro, cloruro y sulfato.

Anión	Concentración mg/l (día 1)	Concentración mg/l (día 2)	Promedio	Desviación	DSR%	Aceptación
Fluoruro (±0,02)	0,41	0,41	0,41	0,0045	1,1	5 %
	0,41	0,40				
	0,41	0,41				
Cloruro (±0,02)	1,28	1,36	1,32	0,0408	3,1	5 %
	1,30	1,36				
	1,28	1,35				
Sulfato (±0,1)	2,37	2,53	2,44	0,0546	2,2	5 %
	2,43	2,41				
	2,42	2,46				

Los resultados de dióxido de azufre en los dos muestreos realizados se presentan en el cuadro 7. Para la obtener la concentración de dióxido de azufre se cuantifica primeramente el sulfato, luego se convierte a dióxido de azufre por un factor de conversión.

Cuadro 7. Concentración de dióxido de azufre obtenida en los dos muestreos.

Primer muestreo	Segundo muestreo
Concentración promedio de SO ₂ ($\pm 1 \cdot 10^{-6} \mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentración promedio de SO ₂ ($\pm 1 \cdot 10^{-6} \mu\text{g}/\text{m}^3$)
Punto de muestreo 1. Cafetería	
0,001041	0,001424
Punto de muestreo 2. Mirador	
0,001149	0,0007134

El pH de las muestras de agua de lluvia en ambos muestreos se presenta en el cuadro 8. Las muestras fueron medidas en el laboratorio luego de ser recolectadas.

Cuadro 8. Resultados del pH de las muestras de agua de lluvia.

Punto de Muestreo	Primer muestreo	Segundo muestreo
	Lectura de pH ($\pm 0,01$)	
1. Entrada	4,20	4,20
2. Mirador	4,30	3,55
3. División de cráteres	3,74	-
4. Prusia	4,81	5,33

También, los resultados de las concentraciones de aniones obtenidos de las muestras de agua de lluvia; se presentan en el cuadro 9.

Cuadro 9. Resultados obtenidos de la concentración de aniones en las muestras de agua de lluvia recolectas.

Analito	Primer Muestreo	Segundo Muestreo
	Concentración (mg/l)	
Punto de muestreo 1. Entrada		
Fluoruro ($\pm 0,02$)	0,42	0,56
Cloruro ($\pm 0,02$)	1,08	3,72
Bromuro ($\pm 0,02$)	No cuantificable	No cuantificable
Fosfato ($\pm 0,02$)	No cuantificable	No cuantificable
Sulfato ($\pm 0,1$)	2,2	6,6
Punto de muestreo 2. Mirador		
Fluoruro ($\pm 0,02$)	0,44	0,66
Cloruro ($\pm 0,02$)	0,96	2,73
Bromuro ($\pm 0,02$)	No detectable	No detectable
Fosfato ($\pm 0,02$)	No detectable	No detectable
Sulfato ($\pm 0,1$)	2,5	9,3

Analito	Primer Muestreo	Segundo Muestreo
	Concentración (mg/l)	
Punto de muestreo 3. División de cráteres		
Fluoruro ($\pm 0,02$)	0,45	No aplica
Cloruro ($\pm 0,02$)	1,29	No aplica
Bromuro ($\pm 0,02$)	No detectable	No aplica
Fosfato ($\pm 0,02$)	No detectable	No aplica
Sulfato ($\pm 0,1$)	2,4	No aplica
Punto de muestreo 4. Prusia		
Fluoruro ($\pm 0,02$)	0,41	0,45
Cloruro ($\pm 0,02$)	0,59	1,66
Bromuro ($\pm 0,02$)	No detectable	No detectable
Fosfato ($\pm 0,02$)	No detectable	No detectable
Sulfato ($\pm 0,1$)	2,0	3,9

Discusión

En primera instancia, para efectuar la cuantificación de las muestras de manera confiable, se verificaron los parámetros de desempeño analítico del método. La linealidad es un parámetro que se debe tomar en cuenta debido a que, verifica si el método posee validez estadística para cuantificar los analitos en un rango de concentraciones. Por lo que, el coeficiente de correlación lineal no debe ser menor a 0,995 para que sea válido estadísticamente. Así mismo, existen herramientas que permiten evaluar la linealidad global de varias curvas de calibración, como lo es la prueba de homocedasticidad o prueba C de Cochran [24].

Todas las curvas de calibración de los aniones analizados poseen un coeficiente de correlación (r^2) mayor a 0,995, por lo que, el método es lineal para el rango de concentración de 0,6 mg/l a 10,25 mg/l. Además, se evaluó la linealidad mediante la prueba de homocedasticidad o prueba C de Cochran, en la cual, se evalúa si se cumple la homogeneidad de las varianzas en las curvas de calibración, para el fluoruro, cloruro, bromuro y fosfato. En cuanto al sulfato, se efectúa una prueba de Levene, la cual indica que no existe diferencia significativa entre las desviaciones estándar. Asimismo, se determinó la repetibilidad y la precisión intermedia para el fluoruro, el cloruro y el sulfato, esto debido a que las muestras poseen una muy baja concentración de bromuro y de fosfato.

En el cuadro 5 se aprecia que, los resultados de las muestras poseen un desvío estándar relativo menor al de la especificación para el fluoruro, el cloruro y el sulfato, por lo que, se cumple con los criterios de aceptación del laboratorio. De igual forma, en el cuadro 6, se observan los resultados obtenidos para la evaluación de la precisión intermedia, los cuales indican un DSR% menor al establecido por los criterios de aceptación del laboratorio para el fluoruro, cloruro y sulfato, por lo que, se puede decir que el método es preciso para la cuantificación de los aniones.

Ya propiamente en cuanto a los muestreos realizados, en el cuadro 7 se observan los resultados obtenidos de la concentración de dióxido de azufre. Según García *et al* [25] el dióxido de azufre posee implicaciones sobre la salud cuando se encuentra en concentraciones desde los 0,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ o más. Los resultados de la concentración del dióxido de azufre son inferiores a 0,01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, por lo que, el aire del Volcán Irazú, para los días de muestreo, se encuentra a niveles aptos de dióxido de azufre para los trabajadores y los visitantes. Los gases volcánicos se clasifican en irritantes y no irritantes según los efectos a la salud. Los gases irritantes

son los que pueden provocar sus efectos a muy baja concentración y a mayor distancia del volcán. Ejercen su efecto en el sistema respiratorio y mucosas, causando irritación en los ojos, lagrimeo, estornudos, entre otros. Entre los gases irritantes se encuentran el dióxido de azufre, el sulfuro de hidrógeno, el cloruro de hidrógeno y el fluoruro de hidrógeno. Mientras que los gases no irritantes o asfixiantes no provocan lesiones a nivel local, son absorbidos en sangre, desplazando al oxígeno del aire inspirado. Los gases asfixiantes más representativos son el dióxido de carbono y el nitrógeno [16].

Los resultados del primer muestreo indican una mayor concentración de dióxido de azufre en el mirador del parque, Esto debido a que, cuando se comenzó la recolección del segundo muestreo hubo precipitación, afectando mayoritariamente al recolector del mirador. El dióxido de azufre es altamente soluble en agua, por lo que, al existir precipitación, este gas se disuelve y el recolector no puede aspirarlo [26].

Otro aspecto importante para recalcar es la concentración de SO_2 en el segundo muestreo, el cual en el primer punto se aprecia un aumento, en el primer muestreo, el viento se dirige hacia al este como se observa en el cuadro 2, lo que infiere que hubo poca influencia del Volcán Turrialba, el cual se encuentra al este del Volcán Irazú y tiene una actividad mayor. En el mirador no se observa el incremento debido a la precipitación cuando se efectuaba el muestreo.

Con respecto a los análisis de agua de lluvia, en el cuadro 8 se observan los resultados de pH para ambos muestreos realizados. Se puede apreciar que los valores, en los puntos del volcán, se encuentran por debajo de 5, por lo que, se considera ácida. Esto se puede deber mayoritariamente a la influencia del Volcán Turrialba, el cual, produce erupciones frecuentes de ceniza que llegan al Volcán Irazú a través del viento, y cuando precipita, los componentes de la ceniza, incluyendo al dióxido de azufre y los aerosoles ácidos, se disuelven y disminuyen el pH. También, se aprecian dos valores de pH menores a 4, esto indica la presencia de lluvia ácida en las cercanías del volcán. En cuanto al sector de Prusia, el pH es ligeramente ácido, sin embargo, se mantiene dentro de los valores aceptables. Se aprecia que existe una relación del pH con la cercanía al cráter del volcán en el segundo muestreo, esto porque el mirador presenta un valor mucho más bajo que el de la entrada y Prusia, así mismo, en el primer muestreo la división de cráteres presenta el valor más bajo. Según Solano [27] el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica ha informado de actividad del Volcán Turrialba, que arroja ceniza y material en el Valle Central, y debido a las condiciones meteorológicas, la mayor parte del material ha caído entre la región del Turrialba y del Irazú.

En cuanto al análisis de los aniones, en el cuadro 9 se observan los resultados obtenidos donde las concentraciones de fluoruro, cloruro y sulfato en el primer y segundo muestreo, tienden a ser mayores conforme se acerca al cráter del volcán, esto es un comportamiento normal, sin embargo, las concentraciones son menores a 0,7 mg/l para el fluoruro y 250 mg/l para el cloruro y sulfato, por lo que, no representan una cantidad perjudicial para la salud [16].

La concentración de iones en agua genera efectos nocivos en los ecosistemas, debido a que penetran los suelos y provocan la pérdida de nutrientes producto de un intercambio de cationes básicos con el suelo y la liberación de cationes tóxicos para las plantas, inhibiendo la captación de los nutrientes. Así mismo, la acidificación del agua de lluvia a través de iones propicia la disolución de metales pesados, además, la lluvia ácida posee una gran cantidad de nitratos y amonio que alteran el ciclo de los nutrientes en la vegetación. Aparte de afectar a los ecosistemas, la lluvia ácida corroe estructuras metálicas y daña la infraestructura de casas y edificios [14].

Por otro lado, la ley de aguas de consumo en Costa Rica indica los valores máximos admisibles de las sustancias que pueden estar presentes en el agua. El valor máximo de pH es de 8,5, los cloruros 250 mg/l, sulfatos 250 mg/l, nitratos 50 mg/l y fluoruro 0,7 mg/l a una temperatura

entre 25 °C y 30 °C, y 0,15 mg/l a una temperatura entre 8 °C y 12 °C. El cumplimiento de estos parámetros es de suma importancia debido a que se puede incurrir en una falta a la ley, además puede representar un riesgo a la salud humana y los sistemas de abastecimiento de agua [16].

También, se puede apreciar que, el primer muestreo de agua posee una menor concentración en todos los aniones determinados, esto se debe a la dirección del viento, como se aprecia en los cuadros 3 y 4, en el primer muestreo el viento se dirigía hacia el norte, por lo que, la influencia del Volcán Turrialba es mínima, durante el transcurso del mes el viento cambia de dirección, y en el segundo muestreo se dirigía hacia el este y se mantuvo durante la semana, incrementando la concentración de aniones en el agua de lluvia por la influencia del Turrialba.

Con base en los resultados obtenidos en el cuadro 8 y 9, el agua de lluvia de los puntos 1, 2 y 3, se encuentra con una acidez alta, y baja concentración de aniones, por lo que, se puede efectuar un tratamiento que disminuya la acidez, y realizar la potabilización para utilizarla como agua de consumo. De igual forma, el punto 4 de muestreo presenta valores bajos de aniones, sin embargo, la acidez no es alta en comparación con los otros puntos, por lo que, solo se requiere potabilización del agua para su eventual consumo.

Conclusiones

- No se puede inferir que el Volcán Irazú se encuentra inactivo, sin embargo, debido a los resultados obtenidos, la actividad volcánica se encuentra a un nivel bajo al momento de efectuados los muestreos.
- Es conveniente efectuar monitoreos sostenidos en el tiempo, para determinar con mayor certeza si el Volcán Irazú posee alguna actividad volcánica, o si principalmente se ve afectado por la influencia del Volcán Turrialba; con esto además, se puede brindar mayor seguridad a los visitantes y trabajadores del lugar.
- Con base en lo obtenido, se deduce que es posible utilizar el agua de lluvia del sector de Prusia para consumo siempre y cuando se le realice un tratamiento para potabilizarla, de acuerdo a la legislación costarricense, además, es apta para el uso en baterías de baño y lavado de las instalaciones por baja presencia de sulfatos.
- El agua de lluvia en las cercanías del cráter fue la más ácida de los muestreos, por lo que, para utilizarla para uso humano, se debe efectuar un tratamiento que neutralice la acidez y disminuya la cantidad de los aniones presentes, y de esta forma, se cumpla con los valores máximos admisibles para las aguas de consumo en Costa Rica
- Se recomienda realizar más muestreos de SO₂ y de agua de lluvia en la zona alrededor del Volcán Irazú. Además, de incluir más parámetros de medición para el agua de lluvia, tales como los metales calcio, sodio, potasio, hierro, entre otros.

Referencias

- [1] A. Fernández. "Cómo contaminan los gases de azufre". Consumer. 2009. Disponible en <https://www.consumer.es/medio-ambiente/como-contaminan-los-gases-de-azufre.html>
- [2] Organización Mundial de la Salud, "Guías para la calidad del agua potable". Primer apéndice a la tercera edición. OMS. Vol 1. 2006. Disponible en https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_low-res.pdf
- [3] Organización Mundial de la Salud, "Sulfate in drinking-water". Documento de referencia para la elaboración de las Guías de la OMS para la calidad del agua potable. Ginebra (Suiza), OMS. 2003. Disponible en http://www.bvsde.paho.org/CD-GDWQ/docs_quimicos/Sulfato.pdf

- [4] G. Garzón, C. Santacoloma, B. Galle y E. Solarte, "Estrategias De Medición De Gases Volcánicos En Colombia Utilizando Sensores Ópticos Remotos". BISTUA: Colombia. 2008. Disponible en <http://www.redalyc.org/pdf/903/90312177005.pdf>
- [5] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, "Monitoreo de las Emisiones del Volcán Popocatepetl". SEMARNAT: México. 2013. Disponible en https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/191433/2013_Extensi_n_de_la_cobertura.pdf
- [6] A. Castruccio y R. Rondanelli, "Estimación de la emisión de dióxido de azufre en penachos volcánicos mediante una cámara ultravioleta". Universidad de Chile. 2014. Disponible en http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/117055/cf-geoffroy_cg.pdf?sequence=1
- [7] P. Ponce, "Estimación de las emisiones de dióxido de azufre - SO₂, asociadas con el crecimiento de un domo de lava en el volcán Galeras en 2008". Boletín de Geología, 39(1): 69-81. 2017.
- [8] F. Pérez, *et al.*, "Caracterización química de aguas subterráneas en pozos y un distribuidor de agua de Zimapán, Estado de Hidalgo, México". Hidrobiología. 2003. Disponible en <https://pdfs.semanticscholar.org/02a5/fecea28eda1339731751069b3b6141057219.pdf>
- [9] L. Galicia, N. Molina, A. Oropeza, E. Gaona y L. Juárez, "Análisis de la concentración de fluoruro en agua potable de la delegación Tláhuac, Ciudad de México". Rev. Int. Contam. Ambie. México. 2011. Disponible en <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v27n4/v27n4a1.pdf>
- [10] D. Erazo, A. Londoño y B. Aristizábal, "Estudio del impacto de los fluidos volcánicos en el recurso hídrico de la cuenca del río Chinchiná". Gestión y Ambiente: Colombia. 2015. Disponible en <http://bdigital.unal.edu.co/65496/1/50269-278702-1-PB.pdf>
- [11] X. Alvarado, "Impacto en la salud ambiental por efecto de emisiones de dióxido de azufre del Volcán Arenal, en la población de la fortuna de San Carlos". Revista Costarricense de Salud Pública. 2006. N°29. 25-34. Disponible en <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rcsp/v15n29/3318.pdf>
- [12] W. Beita, "Caracterización fisicoquímica de las aguas superficiales de la cuenca del río Rincón en la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica". Universidad de Costa Rica. 2008. Disponible en <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/334/TFG%20%E2%80%9CCaracterizaci%C3%B3n%20fisicoqu%C3%ADmica%20de%20las%20aguas%20superficiales%20de%20la%20cuenca%20del%20r%C3%ADo%20Rinc%C3%B3n%20en%20la%20Pen%C3%ADnsula%20de%20Osa%2C%20Puntarenas%2C%20Costa%20Rica%E2%80%9D.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [13] J. Herrera y S. Rodríguez, "Determinación de la concentración de aniones en muestras de precipitación total colectadas en San José, Costa Rica". Primera parte. Universidad Nacional: Costa Rica. 2008. Disponible en <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v25n2/v25n2a1.pdf>
- [14] K. Bolaños, J. Sibaja, J. Mora, D. Umaña, M. Cambroner, L. Sandoval y M. Martínez, "Estudio preliminar sobre la composición atmosférica del agua de lluvia en y los alrededores del Parque Nacional del Volcán Poás". 2019. Disponible en <http://www.eventos.academicos.una.ac.cr/index.php/cicen/ICICEN/paper/viewFile/142/57>
- [15] J. Sibaja, K. Bolaños, J. Mora, D. Umaña, M. Cambroner, L. Sandoval, E. Ortiz, y M. Martínez, "Medición y modelaje de la concentración del dióxido de azufre en los alrededores del volcán Poás durante el 2017, para la apertura del Parque Nacional". Costa Rica. 2019. Disponible en <http://www.eventos.academicos.una.ac.cr/index.php/cicen/ICICEN/paper/viewFile/70/31>
- [16] Ministerio de Salud. "Reglamento para la calidad del agua potable". Costa Rica. 2005. Disponible en https://www.ministeriodesalud.go.cr/gestores_en_salud/comision_agua_segura/legislacion/CAS_reglamento_calidad_agua_potable.pdf
- [17] A. Brunning, "Infografías Periódicas: Lava y Gases Volcánicos". Chemical & Engineering News. 2018. Disponible en <https://cen.acs.org/physical-chemistry/geochemistry/es-Infografias-Periodicas-Lava-Y-gases-volcanicos/96/i28>
- [18] F. Montalvo y D. Escobar, "Lluvia Ácida de Origen Volcánico". Servicio Nacional de Estudios Territoriales. sf. Disponible en http://cidbimena.desastres.hn/filemgmt/files/lluvia_acida.pdf
- [19] J. Seinfeld y S. Pandis, "Atmospheric chemistry and physics from air pollution to climate change". Segunda Edición; John Wiley & Sons, Inc., EEUU. 2006.
- [20] L. Frías, "El agua de lluvia no sirve para beber". Gaceta UNAM: México. 2018. Disponible en <http://www.gaceta.unam.mx/el-agua-de-lluvia-no-sirve-para-beber/>
- [21] K. Ali, G. Momin, S. Tiwari, P. Safai, D. Chate y P. Rao, "Fog and precipitation chemistry at Delhi, North India". Atmospheric Environmental. 2003.

- [22] L. Margarit, "Determinación de halógenos y azufre en residuos orgánicos". Desarrollo de métodos y aplicación a muestras de residuos incinerables. Universitat Ramon Llull: España. 2015. Disponible en https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/360594/Tesi_Lourdes_Margarit.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [23] OIEA/GNIP, "Guía para el muestreo de la precipitación OIEA/GNIP". OIEA. 2014. Disponible en http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/other/gnip_manual_v2.02_es_hq.pdf
- [24] EURACHEM, "Métodos Analíticos Adecuados a su propósito". Guía de laboratorio para la Validación de Métodos y Temas Relacionados. México: Centro Nacional de Metrología. 2005.
- [25] M. García, H. Ramírez, H. Ulloa, O. García, A. Meulenert y J. Alcalá, "Concentración de contaminantes SO₂, NO₂ y correlación con H⁺, SO₄ -2 y NO₃ - durante la temporada de lluvias en la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México". Universidad de Guadalajara: México. 2013. Disponible en <https://scielo.conicyt.cl/pdf/rcher/v29n2/art04.pdf>
- [26] EPA, "¿Qué causa la lluvia ácida?" United States Environmental Protection Agency. 2019. Disponible en https://www3.epa.gov/acidrain/education/site_students_spanish/whatcauses.html
- [27] H. Solano, "Volcán Turrialba lanzó ceniza al Valle Central en dos erupciones". La Nación: Costa Rica. 2017. Disponible en <https://www.nacion.com/sucesos/desastres/volcan-turrialba-lanzo-ceniza-fina-al-valle-central-en-dos-erupciones/XENZVBTLPFCTZEQ3EAYU3RFBUA/story/>

On the review of electronic technologies applied to implantable medical devices

Hacia la revisión de tecnologías electrónicas aplicadas a dispositivos médicos implantables

Ronny García-Ramírez¹, Gabriel Madrigal-Boza²,
Edgar Solera-Bolaños³, Muhammad Ali Siddiqi⁴, Christos Strydis⁵,
Alfonso Chacón-Rodríguez⁶, Renato Rimolo-Donadio⁷

Fecha de recepción: 13 de julio de 2020
Fecha de aprobación: 25 de noviembre de 2020

García-Ramírez, R; Madrigal-Boza, G; Solera-Bolaños, E;
Ali Siddiqi, M; Strydis, C; Chacón-Rodríguez, A; Rimolo-
Donadio, R. On the review of electronic technologies applied
to implantable medical devices. *Tecnología en Marcha*. Vol.
34-4 Octubre-Diciembre 2021. Pág 163-174.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i4>



- 1 Escuela de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Email: rgarcia@tec.ac.cr
- 2 Escuela de Ingeniería Electrónica, Maestría en Electrónica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
- 3 Escuela de Ingeniería Electrónica, Maestría en Electrónica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
- 4 Erasmus Medica Center, Rotterdam, The Netherlands.
- 5 Erasmus Medica Center, Rotterdam, The Netherlands.
- 6 Escuela de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Email: alchacon@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-9094-8983>
- 7 Escuela de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Email: rrimolo@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-3087-9162>

Keywords

Biomedical devices; implantable medical devices (IMDs); medical electronics; microelectronics; health technology.

Abstract

The development of electronic implantable medical devices (IMD) has been increasing over the years, targeting very diverse applications and implementing different technologies. The impact of IMDs in the treatment of different ailments like Parkinson's disease, hearing impairment, heart arrhythmia, and chronic pain, among many others, has been notorious and inspired their exploration to treat other health problems. Even when there is great interest in the scientific community for the exploration and development of IMDs, no standards are ruling its development. This lack of standardization is the reason why the analysis of the tendencies of this area from the technical point of view becomes complex. The analysis of the tendencies in the development of IMD devices required the exploration of diverse sources, which describe heterogeneous systems using very different approaches and methodologies for similar problems. In this paper an open SQL database intended for collecting information from IMD publications is presented; at this point, more than 200 published works are feed in the database covering a period from 1974 to 2018. This database is extensible and enables researchers to find trends and explore the development of IMDs from a broader perspective. We also used this database as a proof of concept to explore some general trends in the design of IMDs based on the included works.

Palabras clave

Dispositivos biomédicos; dispositivos médicos implantables (IMD); electrónica médica; microelectrónica; tecnología sanitaria.

Resumen

El desarrollo de dispositivos médicos implantables electrónicos (IMD) ha ido en aumento a lo largo de los años, apuntando a aplicaciones muy diversas e implementando diferentes tecnologías. El impacto de los IMD en el tratamiento de diferentes dolencias como la enfermedad de Parkinson, discapacidad auditiva, arritmia cardíaca y dolor crónico, entre muchos otros, ha sido notorio e inspiró su exploración para tratar otros problemas de salud. Incluso cuando hay un gran interés en la comunidad científica por la exploración y el progreso de los IMD no hay normas que gobiernen su desarrollo y hay una gran divergencia entre los dispositivos destinados a diferentes aplicaciones, por lo que el proceso de análisis del avance y las tendencias del desarrollo del área desde el punto de vista técnico se hace complejo debido a que implica la exploración de fuentes diversas, las cuales describen sistemas heterogéneos. En este artículo creamos una base de datos abierta que recopila información de más de 200 obras publicadas en un período de 1974 a 2018 en el campo de los dispositivos médicos implantables electrónicos con el fin de permitir a los investigadores encontrar tendencias y explorar el desarrollo de los IMD desde una perspectiva más amplia, también utilizamos esta base de datos para explorar algunas tendencias generales en el diseño de los IMD.

Introduction

Technological advancements regarding feature size reduction in CMOS technologies and MEMS newfound integration capabilities, have allowed the use of Implantable Medical Devices (IMD) in a wide range of applications. Commercial implantable devices have been successfully applied

in fields such as deep-brain stimulation, hearing aid, and the well-known pacemaker. However, research efforts in the IMD realm reach beyond these applications. Different research groups have presented systems that provide functions such as drug delivery, closed-loop stimulation, and optical stimulation to correct visual ailments. Furthermore, it has been observed that trends in IMD design have been gradually shifting from rigid application-specific designs to flexible general-purpose systems [1], [2]. With the aim to understand the evolution of IMDs in the context of electronics systems, a survey of academic journal publications was made. Based on the work presented in [3], this survey of the relevant scientific articles covers a period from 1974 to 2018. Traditionally, state of the art reviews and investigations of biomedical implants have covered limited sets of systems and cases of study, restricted to specific applications or sub-system modules common to a group of devices, for example; Point of Care (POC) monitoring systems are surveyed and reviewed in [4], where the maturity of some selected works and their suitability to become a commercial alternative in the healthcare market are evaluated. Other applications, as glucose monitoring and neuro-stimulation, have been the subject of the surveys presented in [5]-[7]. Three different glucose monitoring implantable systems are discussed in [5], putting emphasis on technical features, advantages and disadvantages of the proposals, identifying several unresolved challenges. Neuromodulation systems are surveyed with different approaches in [6], [7]. Acknowledging the various strategies to increase channel count in neuro-stimulation systems, [6] presents a survey of scalable multi-chip systems, where a network of devices works in concert to achieve multi-site neural interaction and stimulation and gives an example of such a system. On the other hand, [7] presents a survey of commercial neuro-stimulators, classified in two different groups: open-loop and closed-loop neuro-stimulators. As the importance of communication features grows on modern IMDs, telemetry sub-systems become the subject of several studies. Alternatives include wired, optical, infrared, or RF communication schemes. A review of capacitive datalinks is presented in [8], including different methods, applications, tools, and materials involved in the manufacturing process. Since wireless communication has become the norm in most modern implantable systems, a significant effort has been devoted on the enhancement of security measures against malicious attacks. Several surveys have collected these efforts with different approaches [9]- [12]. In [9], a review of security issues arising from the use of body area networks in healthcare is performed, covering threats such as eavesdropping, impersonation, and jamming, in addition to a survey of different techniques used against these attacks and their evaluation. Both [10] and [13] extend the scope of this effort. The survey presented in [10] adds different kinds of attacks to the review and different scenarios and modes of operation under which the IMD normal operation can be compromised, whereas [13] finds a gap in the attention placed in software and sensor interface layer exploitation when compared to the security of the telemetry interface. Finally, [12] presents a survey of several security techniques from the perspective of access control schemes, with a classification based on architecture, logic, keys used, and other characteristics.

This work moves away from the previous approaches and presents a tool for an integral survey of the electronics in IMD systems. A database with over 200 articles reporting complete IMD solutions in the academic domain up to 2018 has been consolidated and is currently being analyzed. IMD features are considered for different categories that represent the levels of abstraction of the design space. High-level considerations such as biomedical application and functionality are included, as well as low-level features regarding implementation, electromechanical aspects, and performance of the system.

Survey scope and methodology

To obtain a structured dataset on which statistical operations can be performed with relevant results, the scope and organization of the survey must be defined. To consider an implantable system in the survey included in the data base, it must comply with two distinct requirements. First, only stand-alone systems, defined as units that provide complete functionality, are studied. Second, only microelectronic- and MEMS-based IMDs are considered. The first restriction leaves out of the study a series of published works that report sub-system modules, such as analog front-ends, sensors, or read-out circuitry. The second consideration excludes the analysis of mechanical implants such as artificial limbs and biomedical systems that are not intended for in vivo operation. The structure, features and approach of the data used in this section corresponds to a taxonomy defined in [1] and [2]. This taxonomy encompasses a series of attributes of microelectronic-based IMDs, organized under 8 different categories. This series of attributes cover the main characteristics of such systems, putting a special emphasis on the Processing or Controlling Core (PCC). The 8 categories are defined as follows.

1. *Functionality*: refers to the nature of the functions performed by the implant. These range from generic functions such as stimulation and measurement to more specialized ones, for example drug delivery.
2. *Application*: points to the medical condition that the system is intended to manage.
3. *Electromechanical features*: gathers several attributes that describe the system design strategy and implementation from a mechanical and packaging perspectives, such as the number of ICs, total area of the chipset and total volume of the package.
4. *Power features*: consider aspects of the system such as power source, operating voltage, and low-power operation techniques included in the design.
5. *General features*: presents some high-level characteristics of the design that consider the kind of processing performed by the PCC, the capability to store data, and the stimulation methods, if present.
6. *PCC features*: details the design of the PCC with the consideration of several aspects specific to this unit. This category considers characteristics such as the number of instructions and frequency of operation of the core, the PCC architecture, and the size of the instructions and data-words.
7. *Miscellaneous features*: present some design aspects in a binary fashion, detailing if such attributes are implemented or not. These attributes are programmability, versatility, modularity, adjustability, reliability, and security
8. *Communication features*: considers design aspects related to data and command transfer between the implantable system and external units. Some aspects classified under this category are modulation and encoding schemes, transmission rates, packet size, and multipoint communication support.

Considering the previously described restrictions and taxonomy, a database of standalone systems is constructed. Each entry of the database corresponds to a system described in the literature. A total of 220 systems are considered so far, as previously mentioned, spanning a period from 1974 to 2018. The database used for the analysis in this paper is extensible and open for the scientific community.

From each one of the categories and sub-categories presented in the data base to characterize each one of the publications, a statistical variable can be extracted to perform different kinds of analysis. Although almost every taxonomy parameter can be treated as a statistical variable, some of them are split into more than one variable to extract meaningful results, for example,

power consumption, which is divided into: average consumption, peak active consumption and standby consumption. Depending on the nature of the variables they are defined as categorical or scale variables. Examples of categorical variables are functionality, PCC architecture and low-power provisions. Scale variables range from operating frequency and operating voltage to power consumption and ADC resolution. Here, using the above definitions, several research questions can be answered with the use of different statistical tools applied to the data base. These research questions seek to analyze the relations between variables, and to foreground trends in the data. To present the results in an intelligible fashion, accompanied by a precise analysis, the research questions here are answered using five different types of statistical tests. One crucial aspect to understand is the relation and impact of a categorical variable over another of this same nature. This implies the need to test if two different categorical variables are independent of each other. A proper statistical tool to evaluate this hypothesis is the chi-square (χ^2) test, which is accompanied by correspondence analysis (CA) plots to identify the relations between the two variables qualitatively. It is also of interest to test if categorical variables show changes over time, which represents the second set of research questions. It seems convenient to use the same statistical tools (i.e., chi-square tests and CA plots) to explore the correlation between such variables. However, this poses a problem in the sense that the publication year is a scale variable. To avoid this inconvenience, publication years are grouped into different periods to obtain equivalent categorical variables and perform the tests. The third set of statistical questions is proposed to explore the relations and changes of scale variables over time. For scale variables, the proper tool is simple regression analysis. Linear and polynomial regression lines are fitted through least-squares (LS), least-median-of-squares (LMS), and least-trimmed-square (LTS) estimations. The fourth subset of research questions is introduced to test whether a categorical variable affects the evolution of a scale variable over time. Scatterplots are used to show the distribution of the scale variable separately for different categories. A Log-Likelihood ratio (G) test is also provided, to determine if the different categories merit separate handling. Finally, it is desirable to compare a scale variable over groups, meaning over the different classes of a categorical variable. This constitutes the fifth subset of research questions and statistical tests. Kruskal-Wallis rank sums tests and boxplots are used to evaluate the scale variable across the groups of the categorical variable. The next section shows a selection of some of the outputs that can be obtained using the data-base. This analysis is not intended to be complete and many questions are left open; the intention here is to provide a taste of the information that may be obtained using the tool and the approaches that can be used.

Tool Implementation

In order to enable an easy access to the database we developed a friendly SQL interface accessible through a web page: <http://imdsurvey.ietec.org>. A brief description of the project and instructions on how to access both, the open SQL interface to query the data base and the SQL interface with edition privileges is provided in the welcome page.

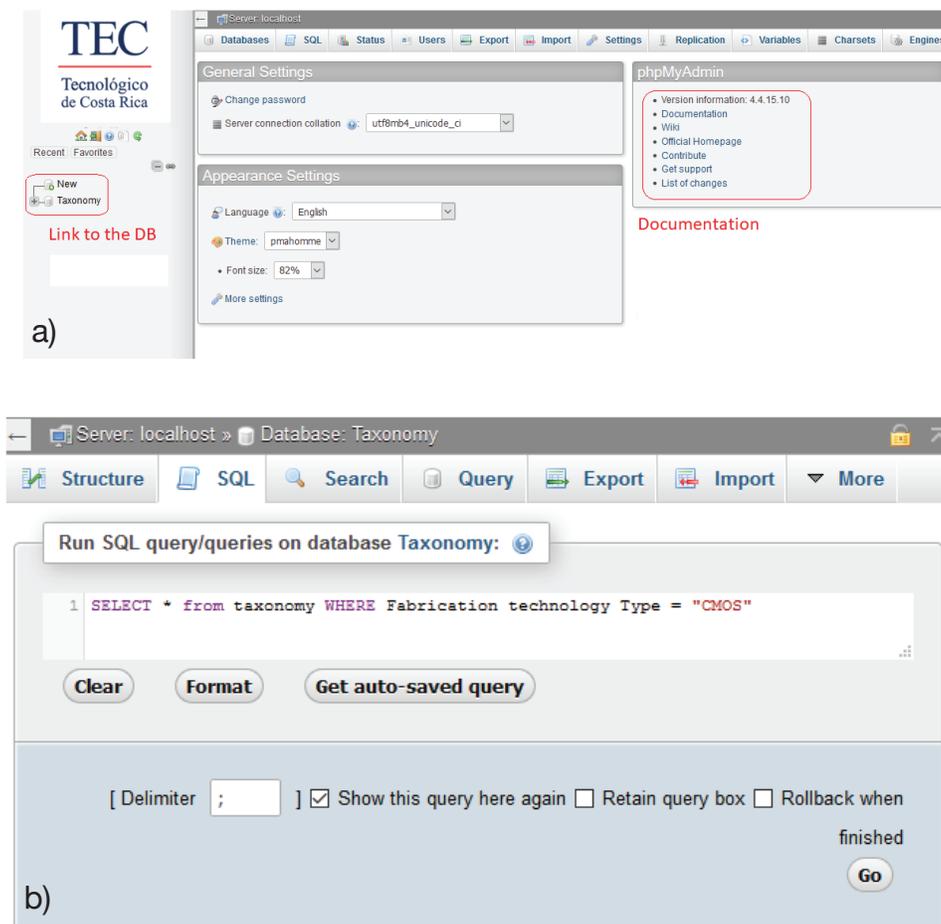


Figure 1. Graphical Interface of the IMD public database: (a) front page of the SQL platform, (b) SQL interface for queries.

In figure 1, an illustration of the initial interface of the tool is presented; once you enter in the platform, you can potentially access different versions of the database, however, at this point only the seed database called “Taxonomy” is accessible. In this initial interface you will be also able to access documentation about the capabilities of each one of the tools available in the platform.

After clicking the Taxonomy database, you can select the SQL tab, to start querying the database. An interface like the one shown in Fig. 1(b) will be used to enter any SQL query. To execute the query just click on the “Go” button. The results of the query will be printed in a friendly way and at the bottom of the screen you will be able to find more capabilities like for instance the capacity to create a charts, printing the results, or export them in several formats such as CSV, JSON, XML, PDF between many options.

Preliminary Results and Analysis

In Figure , publications are grouped in 5-year groups, beginning from 1989, since from this year forward, publications are found for every consecutive year. Before 1989, entries are found only for some isolated years. The idea behind this grouping is to determine whether there exists a growing trend in the number of publications over time, considering that research cycles

(comprising the process that culminates in the publication of the results) usually take longer than a year. Effectively, Figure confirms such trend. The fact that Figure shows sustained growth in IMD research over the years confirms its importance for the scientific community. The following results are arranged according to the statistical tests proposed in section III-A. Numerical values for the respective tests are collected in tables, while visual explorations are represented in the respective figures.

Independence of two categorical values

As an example of the analysis of independence of two categorical variables, Figure shows the CA plot for the categorical variables “functionality” and “PCC design”. In addition to these results, a χ^2 analysis is performed to determine if the two categorical variables are independent of each other. The results from the χ^2 tests performed over couples of categorical variables are reported in TABLE 1. The results of a χ^2 test are evaluated in the standard way with regards of the resulting p-value; if $p > 0.05$, it is said that the null hypothesis cannot be rejected, whereas if the opposite condition is satisfied ($p < 0.05$), the null hypothesis is rejected. In TABLE 1 the results of the χ^2 tests applied to couples of categorical variables are presented. For the variables “functionality” and “PCC design”, the χ^2 test produces a p-value of $p = 0.15266$.

This value indicates that it is not possible to reject the null hypothesis of both variables being independent of each other, this behavior may be explained in part because of the heterogeneity of the applications in the IMD domain as well as for the lack of standardization in this field.

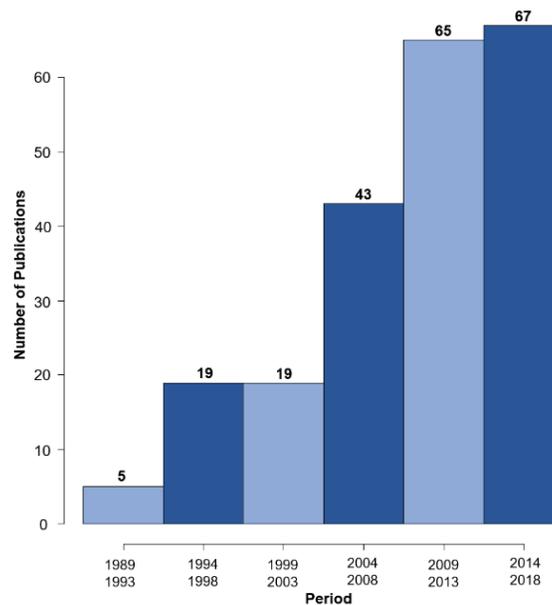


Figure 2. Number of scientific papers about IMDs per period of publication. Published articles are grouped in 5-year periods.

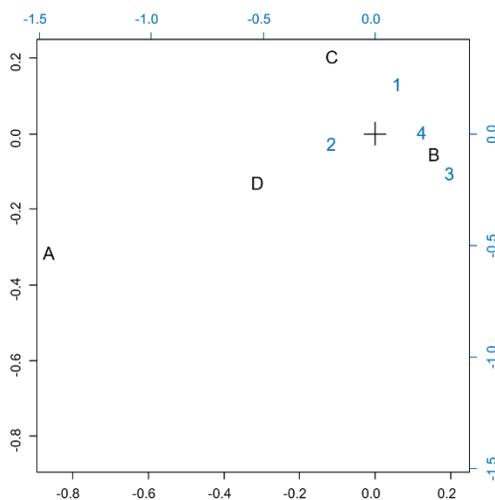


Figure 3. .CA plot for the categorical variables Functionality (letters) and PCC Design (numbers). The labels for Functionality are assigned as follows: (A) generic function, (B) measurement, (C) stimulation and (D) stimulation/measurement. For PCC Design the labels are: (1) commercial, (2) full-custom, (3) no PCC, (4) semi-custom.

Table 1. Results of the χ^2 tests applied to couples of categorical variables.

Test	p-value	Correlation
Functionality vs PCC design	0.526615	No
PCC architecture Vs internal processing	8.475285e ⁻⁷	Yes
Low-power provisions vs PCC design	2.06599e ⁻⁵	Yes
Low-Power provisions vs power source	0.0172187	Yes
PCC type vs PCC design	5.65459e ⁻¹⁹	Yes

Even so, from figure , it is possible to find trends in the data. It is evident that systems designed to perform only monitoring tasks (measurement) are inclined to use semi-custom PCCs or no PCC at all. This tendency is probably because, in most of these devices, the data processing is implemented externally, by directly reading the data in the internal memory of the device or by using wireless communication interfaces. There is also a proximity between commercial PCCs and therapeutic functionalities (stimulation). This tendency implies that the complexity of such functions implies the use necessity of heavier processing than the one that could be accomplished by a small custom PCC, and it is easier to buy a commercial solution than to develop a custom PCC capable of performing the task.

Finally, it is apparent that full custom PCC designs are more suitable for systems that implement both functionalities. This may imply that in these cases, commercial PCCs are not well suited for the task, and the teams can't avoid the development of custom or semi-custom solutions. Given this situation, it appears that a generic micro-controller that facilitate the customization of features, interfaces, memory, and instructions may be a good fit for the development of different functionalities common in the IMD domain.

Evolution of categorical variables over time

The results from the χ^2 analysis performed to categorical variables over periods are shown in TABLE 2. The χ^2 tests how there is a correlation between the “time periods” and the “internal processing”. It is interesting to notice in this figure that before 2004 most of the systems reported no complex processing; in the period from 2004-2008 the trend was towards control, and the trend has been moving towards data processing in recent research. It must be considered that this is a general trend noticed in any particular application. This trend may be related to the development of mobile powerful processing devices capable of communicating and processing the data gathered by the implantable devices outside the body. In the case of the categorical variables “adjustability” and “low-power provisions”, the χ^2 results does not show inherent correlation to the year of publication for the systems.

Table 2. Results of the χ^2 tests applied to couples of categorical variables against time periods.

Test	p-value	Correlation
Internal processing vs time periods	0.00031156	Yes
Adjustability vs time periods	0.3683806	No
Low-power provisions	0.2232576	No

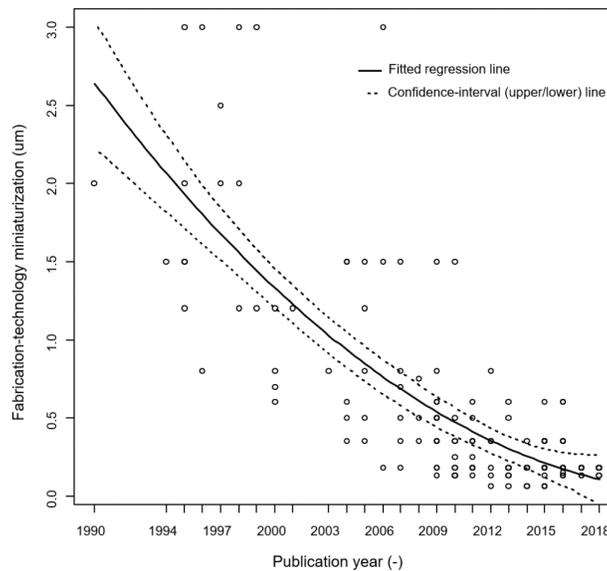


Figure 4. Scatter plot for the scale variable “Fabrication technology” against year of publication A regression line (solid) is added to the plot, accompanied by the confidence intervals (dotted).

Change of “scale variables” over time

In addition to the scattering plots, quadratic regression lines may also be computed and evaluated. In the case of Figure , it is noted that fabrication technology sizes downscale as the year of publication increases. This tendency agrees with the general semiconductor industry trends. It supports the fact that integration levels are higher as more advanced technology is used, increasing system capabilities and allowing for the implementation of more functionalities in a single device.

Something interesting to notice in figure 4 is that even when there is an improvement in the technology node for the fabrication of IMDs, this node is always behind the top fabrication node available. For example, in the latest work published in 2018, the nodes used are in the order of 180-130nm, while the top node in the industry is in the order of 10nm. This trend may be explained because of the reliability required in medical systems. Here, the latest technologies, even when they support lower power voltages and higher integration, are not as mature as older nodes where there is better control over the fabrication process and are less prone to failures.

Table 3. Results of the Kruskal-Wallis tests applied to scale-variables for different groups.

Test	p-value
Peak power consumption over PCC design	0.4579297
Total chip area over PCC architecture	0.4000921
Peak power consumption over PCC architecture	0.4556526

Relation of scale variables over groups

The last subset of tests refers to the analysis of scale variables for different categorical classifications. For this analysis, boxplots can be used. Examples of scale variables which may be evaluated are power consumption and total chipset area. For these tests, numerical results can be found in TABLE 3, showing that for all the evaluated cases, there is a statistically significant difference between the groups so that the independent analysis makes sense. Figure shows the relation between the power consumption of the core and the strategy followed for its implementation. It can be readily noticed that commercial cores present the highest power consumption. The distribution for this class presents the highest mean and the highest maximum for all the classes considered in this figure. Since commercial solutions target general applications, their specifications are not specifically tailored for the system. This fact makes full-custom alternatives a more attractive solution to achieve the requirements imposed for IMDs. Figure supports this claim, as evidenced by the fact that, among all the alternatives, full-custom PCCs show the lowest power consumption. However, it is useful to notice that semi-custom and structured-custom solutions present a power consumption close to the full custom cores. In cases in which design time and efforts must be reduced, semi-custom and structured-custom cores also constitute suitable design alternatives.

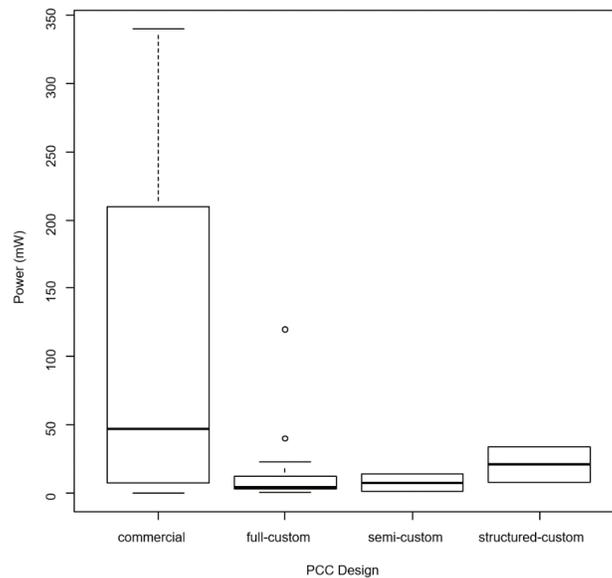


Figure 5. Boxplot of the scale variable Power consumption against the categorical variable PCC design.

Conclusions

In this paper, we presented an extensible approach intended to ease the exploration of the trends for the IMD field, based on a survey of the relevant scientific articles published in this area in a period from 1974 to 2018, including more than 200 publications.

The increasing interest of the scientific community in this subject is evident from the number of published articles in time. Even though there are many systems implemented using commercial IP for its PCC, it is essential to notice here that the custom and semi-custom implementations are the ones with better results in terms of power consumption and area of implementation, which are central features in this field.

Even when the technological node of the systems has been improving in time, it is interesting to notice that the trend is always way behind the top node of the industry so for example in 2018 most systems are implemented using 180nm-130nm technologies while the latest industry node is in the order of the 10nm. This trend may be explained by the reliability requirements of medical systems, which imply the use of mature, well-characterized, and controlled technologies.

The lack of standards in the development of IMDs is evident due to the variety of solutions and characteristics. This lack of standardization is an opportunity for the development of tools and methodologies for the standardization of solutions for this field.

The extensible SQL data-base and structured approach are open to the scientific community; and is intended to grow and enable even more complete high-level analysis. Future work will address the extension and formal statistical analysis of the database.

This is work in progress and it is accessible at: <http://imdsurvey.ietec.org>.

References

- [1] M. Tsakalakis and N. G. Bourbakis, "Health care sensor—based systems for point of care monitoring and diagnostic applications: A brief survey," in 36th annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society, 2014, pp. 6266–6269.
- [2] N. Bayasi, H. Saleh, B. Mohammad, and M. Ismail, "The revolution of glucose monitoring methods and systems: A survey," in IEEE 20th International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS), 2013, pp. 92–93.
- [3] X. Liu, Z. Zong, D. Jiang, B. Bougaila, N. Donaldson, and A. Demosthenous, "Advances in scalable implantable systems for neurostimulation using networked ASICs, IEEE Design & Test, vol. 33, no. 4, pp. 8–23, 2016.
- [4] H. Kassiri, S. Tonekaboni, M. T. Salam, N. Soltani, K. Abdelhalim, J. L. P. Velazquez, and R. Genov, "Closed-loop neurostimulators: A survey and a seizure-predicting design example for intractable epilepsy treatment, IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, vol. 11, no. 5, pp. 1026–1040, 2017.
- [5] A. W. Damaj, H. M. El Misilmani, and S. A. Chahine, "Implantable antennas for biomedical applications: An overview on alternative antenna design methods and challenges," in 2018 International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS), 2018, pp. 31–37.
- [6] Z. E. Ankarali, Q. H. Abbasi, A. F. Demir, E. Serpedin, K. Qaraqe, and H. Arslan, "A comparative review on the wireless implantable medical devices privacy and security," in 4th International Conference on Wireless Mobile Communication and Healthcare-Transforming Healthcare Through Innovations in Mobile and Wireless Technologies (MOBIHEALTH), 2014, pp. 246–249.
- [7] C. Camara, P. Peris-Lopez, and J. E. Tapiador, "Security and privacy issues in implantable medical devices: A comprehensive survey," Journal of Biomedical Informatics, vol. 55, pp. 272–289, 2015.
- [8] A. Harvey, A. Brand, S. T. Holgate, L. V. Kristiansen, H. Lehrach, A. Palotie, and B. Prainsack, "The future of technologies for personalised medicine," New Biotechnology, vol. 29, no. 6, pp. 625–633, 2012.
- [9] L. Wu, X. Du, M. Guizani, and A. Mohamed, "Access control schemes for implantable medical devices: A survey," IEEE Internet of Things Journal, vol. 4, no. 5, pp. 1272–1283, 2017.
- [10] M. Rushanan, A. D. Rubin, D. F. Kune, and C. M. Swanson, Sok, "Security and privacy in implantable medical devices and body area networks," in IEEE Symposium on Security and Privacy. 2014, pp. 524–539.
- [11] C. Strydis, "Implantable microelectronic devices," Master's thesis, Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 2012.
- [12] C. Strydis, "Universal processor architecture for biomedical implants": Thesis project, Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, 2011

Planificación de operaciones de construcción

Construction operations planning

Mauricio Gutiérrez-Loria¹, Ismael Mora-Chavarría²,
Jonathan Quirós-Campos³

Fecha de recepción: 5 de agosto de 2020
Fecha de aprobación: 10 de noviembre de 2020

Gutiérrez-Loria, M; Mora-Chavarría, I; Quirós-Campos, J.
Planificación de operaciones de construcción. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-4 Octubre-Diciembre 2021. Pág 175-191.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i4.5155>



- 1 SERVILOTTER S.A, Universidad Fidélitas, Costa Rica. Correo electrónico: planos.magulo@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-3583-1715>
- 2 Novatecna, Universidad Fidélitas, Costa Rica. Correo electrónico: ismamora9412@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-5677-7690>
- 3 Acueductos y Alcantarillados, Universidad Fidélitas, Costa Rica. Correo electrónico: johnqc13@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-5259-2082>

Palabras clave

Instalaciones provisionales; reglamento de construcciones - INVU; planes de operaciones; diagramas de flujo; cartas de proceso; planificación de corto plazo; implementación del sistema.

Resumen

El presente artículo está basado en el Capítulo 4. Planificación de operaciones de construcción del libro Administración de Operaciones de Construcción del Ing. Alfredo Serpell Bley (Chile), tratando de actualizar y adaptar la información, así como tropicalizar, y ejemplificar a la realidad, que se vive en el sector construcción en Costa Rica. El Ingeniero Serpell indica que la planificación de operaciones: “depende de los administradores de obra y tiene la influencia más directa sobre la productividad. El contexto del estudio de la planificación de operaciones estará dentro del marco de la planificación global del proyecto, por lo que permanentemente se destacarán las interrelaciones entre la una y la otra y, en especial, el hecho de que la planificación de operaciones es un subproducto de la planificación general del contrato o proyecto.” [1]. En el ámbito de la construcción se entiende por operación a: la actividad de trabajo ya sea colocación o instalación de un elemento de construcción. El Ingeniero Serpell menciona que un proceso es: “una colección de tareas relacionadas entre ellas por una estructura tecnológica y una secuencia. Finalmente, una tarea es el elemento de trabajo más básico de los procesos y operaciones.” [1].

Keywords

Provisional facilities; construction regulations – INVU; operations plans; flowgrams; process letters; short time planning; implementation of system.

Abstract

This article is based on Chapter 4. Planning of construction operations of the book Construction Operations Administration of Alfredo Serpell Bley (Chile), updating and adapting the information, as well as tropicalizing, and exemplifying the reality that is lived in the construction sector in Costa Rica. Engineer Serpell focused on operations planning: “depends on the construction managers and has the most direct influence on productivity. The context of the study of operations planning will be within the framework of the overall planning of the project interrelationships between one and the other will be highlighted permanently, and especially the fact that operations planning is a by-product of general contract or project planning. ” [1]. In the context of construction, operation means that work activity that results in the placement or installation of a definable building element, Engineer Serpell mentions that a process is: “a collection of tasks related to each other by a technological structure and a sequence. Finally, a task is the most basic work item in processes and operations.” [1].

Introducción

La planificación es una herramienta fundamental para la toma de decisiones en la construcción, por lo tanto, para la administración de un proyecto. Sin planificación se transforma en una serie de cambios aleatorios de dirección.

En un proyecto de construcción el planeamiento está dividido en:

1. “Planificación preliminar, de carácter estratégico, cuyos objetivos básicos son determinar los costos para propuestas o estudios de factibilidad y servir de base para la planificación del contrato o proyecto.

2. Planificación del contrato o proyecto, de carácter táctico, cuyo objetivo es obtener el plan definitivo para la ejecución del proyecto.
3. Planificación de operaciones: El objetivo de esta planificación detallada es lograr que para cada operación se use la secuencia y el método más económico posible, de acuerdo con la planificación general del proyecto. Esto significa pensar en los detalles de una tarea, planificarla y coordinarla antes de ejecutarla, anticipando interferencias, falta de recursos, etc.” [2].

La planificación puede ser definida como una metodología, que se va a utilizar para el cumplimiento de un objetivo específico. Una buena planificación confirma que cada tarea sea ejecutada correctamente en el lugar apropiado y en el momento oportuno.

Otra función importante de la planificación es la de servir como base de referencia para el control. Control es el proceso de toma de decisiones sobre la base de la información respecto a la situación actual para actuar sobre el desarrollo futuro de una obra y asegurar así el cumplimiento de los objetivos planteados. La planificación permite una utilización eficiente de los recursos y fortalece la posición del administrador. Esto último debido a que pueden minimizar las influencias negativas y transferir responsabilidades directivas a otros.

Materiales y métodos

Planificación de operaciones

Tipos de planes de operaciones

Actualizando lo indicado por el Ingeniero Serpell en Costa Rica, los planes de operaciones representan las instalaciones previas y provisionales y cómo se deben de ejecutar. Algunos de los planes de operaciones son los siguientes:

1. *Los croquis*: Entregan detalles de constructivos y de montaje, esquemas de diversas actividades. Las instrucciones del trabajo se notifican a través de una serie de croquis que exponen todos los elementos notables, conjuntamente con su relación con otras instalaciones previas y provisionales.
2. *Hojas de asignación de trabajos*: Un plan de este tipo responde las incógnitas de un operario antes que él las haga. Una vez concluido el trabajo, estas hojas se aprovechan para llevar un registro de información para el maestro de obras y el jefe de cuadrilla. Al terminar el trabajo, el maestro de obras deberá conocer el día en que éste se ejecutó, su duración y código.
3. *Planos de taller*: Son planos complementarios para la ejecución de etapas de construcción que tienen una gran dimensión o son muy complejas. En estos planos, se reúne toda la información relevante de los planos de taller detallados de las estructuras, instalaciones eléctricas, plomería, etc. Se incluyen las listas de materiales y puntos de control y/o inspección.
4. *Modelos a escala o maquetas*: Ayuda a contar con una base tridimensional para la planificación y diseño de operaciones e instalaciones auxiliares para la construcción. Las principales aplicaciones son:
 - Distribución en planta.
 - Uso y ubicación de guías, equipos e instalaciones.
 - Montajes complejos de estructuras.

5. *Diagramas de flujo*: Son herramientas sobre la base de una simbología modelo, permiten registrar las diferentes tareas que realiza un recurso y los procesos a los que es sometido.
6. *Sistemas computacionales*: Estas herramientas mediante la simulación virtual gráfica en computadora ahora sistemas de metodología BIM, desarrolla el proceso de construcción del proyecto, creando modelos gráficos para la planificación y diseño de operaciones de instalaciones. Dos de los programas son SYNCHRO Pro y Navisworks, estos programas permiten simular el movimiento en una obra a través de un conjunto de instalaciones ingresadas al computador.
7. *Modelos de operaciones*: Los más aplicables a la construcción son los modelos de teoría de colas o fenómenos de espera, los modelos de transporte y asignación, y los modelos gráficos de simulación computacional.
8. *La planificación de corto plazo*: Abarcar en general, todos los tipos de planes de operaciones mencionados previamente.

Estos modelos o sistemas son muy útiles como instrumentos de comunicación, ya que concentran una gran cantidad de información. Además, durante y después de la ejecución de la obra, pueden ser usados como ayudas a la empresa y capacitación del personal.

Esquema para la confección de un plan de operaciones

En general, un plan de operaciones debiera contener los siguientes elementos:

- a. Descripción y alcance del plan
 - Hacer una lista del equipo y herramientas especiales que deberán ser usadas.
 - Indicar y describir los materiales a ser usados.
 - Describir la distribución de las áreas de trabajo.
- b. Plan de trabajo
 - Preparar los croquis necesarios.
 - Enumerar el material a ser recibido y los criterios de almacenamiento.
 - Describir, paso a paso, el procedimiento de utilización de la mano de obra, materiales, herramientas y equipos para llevar a cabo la tarea.
- c. Inspección, ensayos y control de calidad
 - Enumerar pasos aplicables de inspección y ensayos.
 - Indicar fuentes de información, tablas, normas y referencias para mayores detalles sobre las técnicas, materiales y métodos.

Una ventaja adicional de los planes de operaciones es que permiten a las empresas que los utilizan contar con una información valiosa para ajustar sus futuras estimaciones de rendimientos, duraciones y costos. También pueden ser usados en la confección de futuros planes de operaciones y como ayuda para la capacitación del personal.

Herramientas de planificación de operaciones

Cartas de proceso

Son diagramas lineales de la secuencia establecida para la ejecución de una operación. Es posible tener una ayuda visual del método en su conjunto, sirviendo de base para futuros análisis en busca de posibles mejoramientos.

Las cartas de proceso pueden ser de distintos tipos:

- a. Carta de proceso de mano de obra.
- b. Carta de proceso de materiales.
- c. Carta de proceso de equipos.

Las cartas de proceso se realizan con 5 símbolos estándar, su interpretación se indica en el cuadro 1.

Cuadro 1. Simbología de cartas de procesos.

Actividad	Símbolo	Interpretación
Operación		Un paso definido en un proceso, método o procedimiento.
Traslado		Cualquier movimiento de operarios, materiales o equipo.
Almacenamiento		Almacenamiento planificado y autorizado.
Demora o atraso		Una demora no prevista o atraso.
Inspección		Control de calidad o verificación de cantidades.

Fuente: [1]

En las cartas de proceso, los símbolos son conectados de forma que representen la secuencia de los eventos individuales de la operación que está en estudio.

Diagramas de flujo

Los diagramas de flujo corresponden a una representación gráfica y es uno de los métodos más comunes de representar procesos, gracias a su facilidad de construcción e interpretación. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que existe una simbología asociada a ellos y que cada una representa una acción específica [3].

El diagrama de flujo de la figura 1 y la carta de proceso que se ilustra en la figura 2 corresponden a las actividades que realiza un operario. Es importante destacar que no se deben mezclar diferentes tipos de cartas de proceso, es decir, si lo que se analiza es el movimiento de un material, no se debe combinar con las actividades de otros recursos, tales como el personal o los equipos.

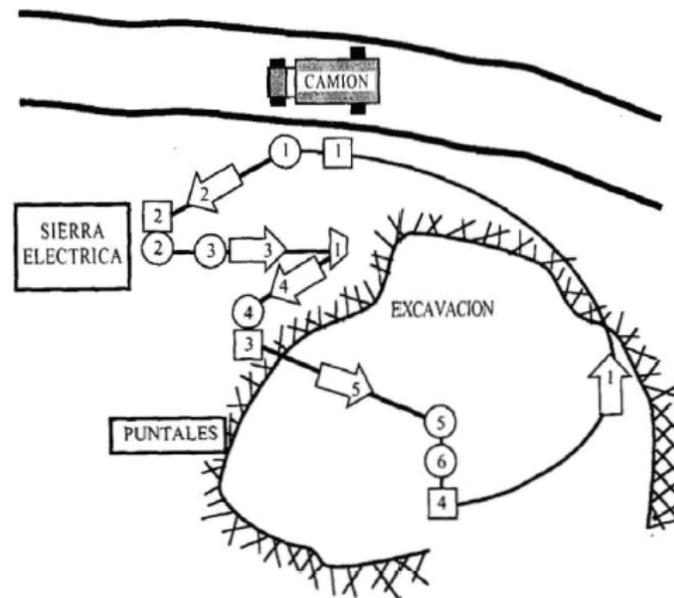


Figura 1. Ejemplo de diagrama de flujo. Fuente: [1].

La utilización de estos diagramas presenta varias ventajas en el proceso necesario para llevar a cabo una operación, entre estas ventajas el Mideplan menciona:

- “Favorecen la comprensión del proceso/procedimiento al mostrarlo como un dibujo. Esto por cuanto el cerebro humano reconoce más fácilmente los dibujos que la escritura en prosa. Un buen diagrama de flujo reemplaza varias páginas de texto.
- Permiten identificar los problemas y las oportunidades de mejora del proceso. Se identifican los pasos redundantes, los flujos de los reprocesos, los conflictos de autoridad, las responsabilidades, los cuellos de botella, y los puntos de decisión.
- Son una excelente herramienta para capacitar a los nuevos empleados y también a los que desarrollan la tarea, cuando se realizan mejoras en el proceso.” [4].

La carta de proceso, en conjunto con el diagrama de flujo, pueden ser de mucha utilidad en el diseño de las instalaciones provisionales y en la distribución de las áreas de trabajo o diseño de un proyecto de construcción.

Análisis de procesos

En la planificación de operaciones, “una tarea importante es la relacionada con el análisis de los diferentes procesos que forman parte de las operaciones de construcción.” [1]. Para lo cual se define el proceso como un sistema, por tanto, lo analizamos de la siguiente manera:

- a. Definir límites y las interrelaciones externas.
- b. Identificar recursos que participan en el proceso
- c. Identificar el producto que resultara del proceso.
- d. Comprender los flujos que existen en el sistema
- e. Comprender el método de conversión del proceso.

CARTA DE PROCESO			
Comienzo carta :		Hombre caminando hacia el camión	
Finaliza carta :		Inspección final de estructura de contención provisional	
Distancia	Símbolo		Proceso
30 m			Camina hacia el camión
			Inspecciona madera en el camión
			Descarga partida de madera
20 m			Se traslada a la sierra
			Mide y marca
			Corta la pieza
20 m			Se dirige a la excavación
			Espera llegada de la madera
15 m			Va en busca de puntales y cuñas
			Selecciona puntales
			Inspecciona
15 m			Regresa a la excavación
			Coloca la madera en posición
			Apuntala y asegura
			Verificación final

Figura 2. Ejemplo de carta de proceso. Fuente: [1]



Figura 3. Elementos del proceso. Fuente: [1].

El problema de la capacidad de los procesos de construcción

La capacidad debe ser planificada de modo que los procesos sean capaces de satisfacer los requerimientos de los objetivos del proyecto de construcción. Por tanto, la capacidad de un proceso se define como el potencial máximo de producción del sistema [1].

La capacidad se puede parametrizar de acuerdo a lo siguiente:

1. Impacto significativo en la capacidad de una organización de construcción para satisfacer las demandas de un proyecto. La subcapacidad puede significar no cumplir con los plazos, gastos excesivos.
2. La relación que existe entre la capacidad y los costos de operación del sistema.
3. El costo inicial involucrado para poder proveer la capacidad requerida (capital de trabajo).
4. El compromiso de recursos que no pueden dedicarse a otros proyectos, limitando la capacidad general de la empresa constructora para tomar trabajos.

Existen diferentes capacidades por considerar en la planificación de los sistemas de producción, mencionadas en [1]:

- *Capacidad de diseño:* es la producción máxima que podría ser lograda o producción ideal.
- *Capacidad efectiva:* es la producción máxima dada una mezcla de productos, dificultades de programación, mantención de maquinarias, factores relacionados con la calidad, etc.
- *Capacidad real:* es la producción lograda, que generalmente es menor a la efectiva debido a interrupciones, defectos, falta de materiales y otros factores similares de pérdida.

En función de estas capacidades, es posible establecer dos parámetros de gestión, de gran utilidad para el control de los procesos de producción y de la capacidad de ellos:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Producción real}}{\text{Producción efectiva}}$$

$$\text{Utilización} = \frac{\text{Producción real}}{\text{Producción de diseño}}$$

Para determinar la capacidad efectiva de un proceso constructivo, es necesario considerar los siguientes factores:

- Instalaciones productivas o bodegas, donde se incluyen la distribución, el diseño y los factores ambientales.
- Los productos que hay que producir, considerándose la calidad, constructibilidad y estandarización de su diseño.
- Los factores de los procesos, tales como la calidad y cantidad de materiales, y otros recursos de construcción disponibles.
- El factor humano y su gestión: capacitación, motivación, etc.
- Los factores asociados a la gestión del proceso de construcción, como la efectividad de la planificación y control, administración de materiales, aseguramiento y control de calidad, mantenimiento y reparación de equipos, control de pérdidas, etc.
- Factores externos, las regulaciones ambientales y de seguridad, normativa técnica, actividad sindical, etc.

Tecnología

La tecnología se define como el conjunto de procesos, herramientas, métodos, procedimientos, equipos y maquinarias que se utilizan para llevar a cabo un proceso de construcción [1]. La tecnología es un antecedente clave para la selección de procesos de construcción, ya que están íntimamente relacionados.

El uso de tecnologías innovadoras, no dominadas totalmente, puede requerir la integración de personal con capacidades especiales en ciertas funciones como la planificación, el control, el control de calidad, etc. [1]. Debe tener una clara comprensión de que las decisiones sobre tecnología involucran aspectos económicos, estratégicos, de calidad y, en general, todos los aspectos de la gestión, necesidad del cliente, estrategia de la empresa y las decisiones.

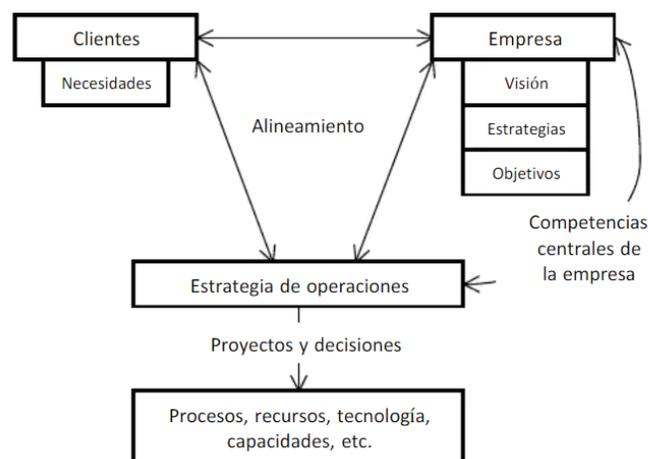


Figura 4. Estrategia de operación. Fuente: [5].

Por lo tanto, debe estudiar en profundidad los procesos de las operaciones (ver figura 4), para comprender la aplicabilidad de las tecnologías disponibles y, junto con ello, evaluar su rendimiento real.

Planificación de la instalación de instalaciones provisionales

Instalaciones previas o provisionales podemos definirlo como un conjunto de instalaciones auxiliares necesarias, por un periodo de tiempo limitado, para la construcción y prueba de una obra. El objetivo de éstas es, la maximización de la eficiencia de las operaciones para promover una alta productividad de los trabajadores y calidad del trabajo.

Condiciones del entorno del proyecto

Es fundamental analizar el entorno en que se llevara a cabo el proyecto. Para ello, es necesario evaluar los siguientes factores [1]:

- Disponibilidad de mano de obra en la zona.
- Disponibilidad de materiales y otros recursos en la zona (volúmenes máximos y disponibilidad).
- Recursos básicos (agua, electricidad, alcantarillado, etc.)
- Condiciones físicas del terreno, topografía y localización.
- Caminos de acceso al lugar de la obra, capacidad de puentes y túneles, distancias a puertos, ferrocarril, etc.
- Otros métodos de comunicación.
- Apoyos logísticos varios.
- Condiciones climáticas.

Las instalaciones provisionales podrían fluctuar entre 8% y un 15% del costo directo de un proyecto y generalmente es cargado como gastos generales de la obra.

Principales características y tipos de instalaciones de previas y provisionales (obras provisionales)

Pero podemos definir las principales características de las instalaciones:

1. Disponibilidad de varias soluciones para una misma función.
2. Posibilidad de removerlas rápidamente al término del proyecto.
3. Posibilidad de reutilización, a un mínimo costo, para una función igual o similar en otro lugar o proyecto.
4. Facilidad para armarlas y desarmarlas, requerimiento mínimo de horas hombre.
5. Cumplimiento con estándares de seguridad y de comodidad.
6. Señalizaciones, primeros auxilios, comedores, vestuarios, servicios básicos y lockers de ser necesarios. [1]

Se pueden agrupar de acuerdo a las siguientes clasificaciones:

- *Instalaciones administrativas y para el personal:* incluyen las oficinas (contratistas, subcontratista, inspección, etc.) y los dormitorios, viviendas individuales, comedores, área recreativa, etc., para el personal de todos los niveles. En el cuadro 2 se muestra la relación personal directivo/subordinados por edificación y en el cuadro 3 las áreas de superficie para instalaciones provisionales.

- *Instalaciones para almacenamiento de materiales:* deben estudiarse los tipos y características de cada uno: bodegas cerradas, con o sin acondicionamientos especiales, patios de aperchamiento, cubiertos y descubiertos, y, posibles bodegajes auxiliares, siempre tomando en cuenta los principales materiales.
- *Instalaciones de servicio de equipos y vehículos:* incluye los techos de reparación de equipos, talleres mantenimiento y reparaciones de equipos, equipos de bombas de combustibles, estacionamientos.
- *Talleres auxiliares y plantas de producción en obra:* triturar y clasificar piedras, concreto, premezclados, talles de moldajes, enfierradura, acero estructural, pintura, etc.
- *Caminos de acceso y de circulación:* problemas de drenaje, superficies de rodamiento, afectaciones por el equipo, acarrees y transporte de equipos.
- *Instalaciones básicas:* Instalaciones eléctricas, agua, alcantarillado, recolecciones de agua lluvia, clasificación de desechos y reúsos.
- *Cerramientos:* principales para evitar el paso o acceso de personas ajenas y daños a terceros, altura mínima recomendada de 2 metros, pueden ser maderas, que se hincan en el terreno, hasta mallas metálicas de diferentes formas, lámina galvanizada lisa y ondulada, bloques y ladrillos de obra, sarán, entre otros.

Cuadro 2. Relación personal Directivo/Subordinados por edificación. Fuente: [1].

Cargo	Relación máxima subordinados recomendados
Encargado actividad	1/25 obreros
Encargado General	1/5 Encargado Actividad
Jefes de Obras o Maestro Obras	1/4 Encargado general
Profesionales a cargo	1/1 Jefe de obras

Cuadro 3. Áreas superficie para instalaciones provisionales. Fuente: [1].

Tipo de instalaciones provisionales	Unidad	Área/unidad (m ²)
Dormitorio	Cama	6.50
Casa o Cabaña	Persona	12.50
Vestidores	Persona	0.70
Ducha	Persona	0.15
Área recreativa	Persona	0.85
Comedor	Persona	1.40
Oficina	Administrativo	6.00

Objetivos y recomendaciones generales para las Instalaciones de previas y provisionales

Los objetivos específicos que la dirección eficiente de una obra debe tratar de lograr en relación a la instalación:

1. Minimizar el costo total de la instalación de provisionales.
2. Reducir al máximo el área necesaria.
3. Incrementar la productividad en obra.

4. Establecer un grato ambiente de trabajo.
5. Obtener una buena calidad en el trabajo.
6. Aumentar la reutilización de las instalaciones.

Es importante considerar las siguientes orientaciones generales para el diseño de la instalación provisionales:

- Minimizar las distancias de viaje del personal y equipos, y de acarreo de los materiales
- Reducir interferencias de tránsito en la obra.
- Aislar las actividades contaminantes.
- Diseñar un buen sistema de drenaje en la obra.
- Estabilizar las áreas de tránsito pesado.
- Evitar la reubicación de instalaciones por falta de planificación.
- Coordinar e integrar las actividades de la instalación de faenas con el plan y el programa del proyecto.
- Estandarizar las instalaciones.
- Planificar un manejo y control eficiente de los materiales y equipos.

Se puede revisar como alcance mínimo el Capítulo XXII. Obras provisionales en el proceso de construcción, del Reglamento de construcciones - INVU. Además se deberá revisar en caso de no contar con regulaciones o plan regulador municipal, o la Ley de planificación Urbana de Costa Rica, para la delimitaciones en proyectos urbanísticos.

Planificación de corto plazo

El objetivo central de dicha planificación es lograr una alta productividad y eficiencia en la ejecución del trabajo de los siguientes objetivos operacionales:

- Planificar la producción para un horizonte de corto plazo que normalmente abarca un período entre 5 y 15 días.
- Asignar los recursos necesarios para materializar la producción deseada para el periodo.
- Fijar metas reales de producción, que aseguren el cumplimiento de los plazos.
- Evaluar y controlar el cumplimiento de las metas comparando lo realizado contra lo planificado.
- Detectar problemas que provoquen variaciones de la producción.
- Tomar acciones correctivas frente a variaciones observadas en forma rápida y eficaz.
- Delegar la autoridad necesaria a los niveles de supervisión de primera línea, dejando claramente establecida la responsabilidad asociada.
- Mejorar el control sobre la ejecución global y particular de las actividades.
- Mejorar la comunicación y retroalimentación de la ejecución del proyecto.
- Registrar la incidencia de las acciones del mandante en los resultados del contratista.
- Generar antecedentes para reclamos justos.

Características del sistema

El sistema, presenta el siguiente esquema general.

- Planificación de la obra para la semana siguiente a la actual.
- Determinar las actividades que se desarrollarán durante el período en concordancia con el plan general de la obra. El resultado de esta etapa es el plan semanal de trabajo.
- Asignación de los trabajos a los responsables de su ejecución.
- Determinación y aseguramiento de los recursos necesario para realizar los trabajos.
- Cálculo de los resultados del trabajo semanal.

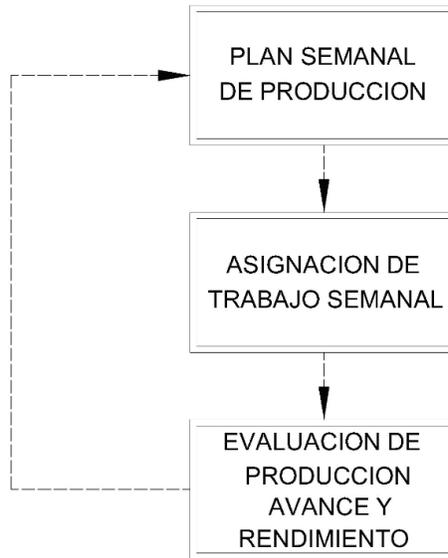


Figura 4. Sistema de Planificación a corto plazo. Fuente: [1].

Tal como se aprecia en la figura 4, el sistema presenta una metodología de planificación estructurada para el periodo semanal. Esta metodología incluye un conjunto de actividades que se deben realizar durante los días de la semana, las que se detallan en la figura 5 que se presenta a continuación.

DIA 4	DIA 5	DIA 1	DIA 2	DIA 3
PLAN SEMANAL DE PRODUCCION	VERIFICACION DE LOS RECURSOS A UTILIZAR	INICIO DE LA SEMANA DE TRABAJO	CALCULO DEL RESULTADO SEMANAL DE PRODUCCION	
	EMISION DE LAS ORDENES DE TRABAJO PARA JEFE DE OBRA Y OPERARIOS EN GENERAL	MEDICION DE LA PRODUCCION SEMANAL		
	TERMINO DE LA SEMANA DE TRABAJO			

Figura 5. Imagen plan semanal de trabajo. Fuente: [1].

Formularios del sistema

Estos formularios y sus objetivos, son los siguiente:

- a. Plan Semanal de Producción y Control
 - Registrar el control de la producción real.
 - Evaluar el cumplimiento del programa.
 - Ajustar la planificación para el cumplimiento de los objetivos.
- b. Plan Semanal de utilización de Recursos
 - Revisar la disponibilidad de recurso para cumplir el plan.
 - Asignar los recursos en forma consistente con lo planificado.
 - Tomar acciones correctivas frente a una subutilización de recursos o la falta de ellos.
- c. Hoja de Trabajo Semanal
 - Entregar la información de qué, dónde, cuánto, cuándo y cómo ejecutar la producción del período a cada supervisor de primera línea.
 - Delegar la autoridad que corresponda a cada supervisor, para dar la libertad necesaria para la administración del plan.
 - Asignar responsabilidades acordes con la autoridad delegada.
 - Controlar el avance real y retroalimentar la planificación frente a variaciones e imprevistos detectados en terreno.
- d. Evaluación de Producción, Avance y Rendimiento
 - Evaluar el avance obtenido en el período considerado.
 - Evaluar la producción realizada en dicho período.
 - Obtener el rendimiento conseguido en el periodo.
 - Retroalimentar la planificación para el siguiente período lo que se consigue con la evaluación global de la obra y del período y de las actividades en particular.
 - Identificar problemas (desviaciones con respecto a lo planificado en el uso de recursos).

Implementación del sistema

Para que el sistema funcione, se requiere que todos los participantes de una obra estén dispuestos a dedicarle tiempo, a continuación, aspectos de la implementación.

- Exista compromiso de la gerencia
- El profesional de la obra, el jefe de obra, los capataces y administrativos del proyecto se comprometan y participen activamente en la planificación
- Toda la administración del proyecto asume la responsabilidad de una adecuada implementación del sistema
- Se considera que la planificación de corto plazo es una herramienta que ayuda a cumplir los objetivos de la obra en forma efectiva
- Se considera al sistema como un procedimiento habitual de la empresa

Por las razones indicadas, es entonces muy importante estudiar cuidadosamente la implementación del sistema en una empresa u obra, de modo de asegurar que se gane la aprobación y compromiso de todos los que van a usarlo o de aquellos que sean partícipes del mismo. La figura 6 propone las etapas a seguir para una implementación exitosa.

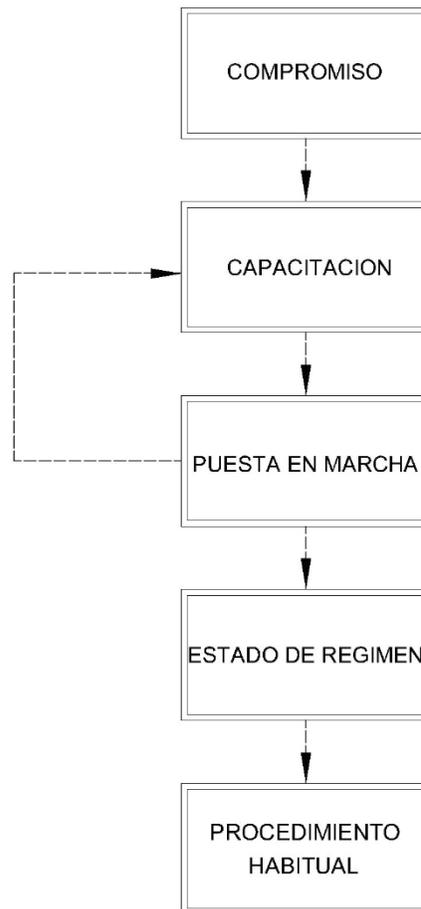


Figura 6. Etapas del plan de implementación. Fuente: [1].

Existen varias barreras que es necesario superar durante la implementación del sistema de planificación de corto plazo. Una de las primeras es aquella excusa tan concurrida en la construcción, de que los profesionales, jefes de obra, capataces y administrativos “no tienen tiempo”.

Un segundo factor es la resistencia que el personal presenta ante la creación de un orden estructurado en la ejecución de la obra, producto de la planificación. Los supervisores temen perder su poder, derivado del manejo de la información de obra.

Un tercer aspecto tiene relación con la sensación de una carga adicional de trabajo que implicarla la aplicación del sistema, sin pensar en los beneficios de éste y perdiendo todo compromiso al respecto.

En la construcción es común escuchar que el personal de campo es “malo para el lápiz”, indicando con esto que es difícil pedirles que entreguen la información necesaria para el funcionamiento de diferentes sistemas de control. Esta justificación es poco válida, ya que

las personas que administran importantes recursos de una obra deben ser calificados. Si el personal no tiene la capacidad requerida, entonces es responsabilidad de la empresa el capacitarlos para que puedan responder adecuadamente a las exigencias de su trabajo.

Beneficios del sistema de planificación de corto plazo

El sistema de planificación de corto plazo aporta varios beneficios a las obras y empresas que lo utilizan. Entre los principales se destacan los siguientes:

- Permite una adecuada planificación en un período corto, mejorando la comprensión de los objetivos del proyecto.
- Ayuda al cumplimiento de los objetivos planeados en forma estructurada.
- Entrega una retroalimentación de terreno oportuna, eficaz y veraz, lo que posibilita que las proyecciones se ajusten mejor a la realidad, mejorando la toma de decisiones.
- Disminuye la ocurrencia de problemas, detectando a tiempo las distorsiones que ocurren en la obra y acelerando el aprendizaje del personal y la organización.
- Disminuye el riesgo e incertidumbre y aporta un manejo más efectivo de éstos.
- Mejora la comunicación e integración vertical y horizontal en la organización, generando una participación total de todos los estamentos directivos.
- Permite establecer prioridades consistentes con el desarrollo del proyecto.
- Aumenta la eficacia del control de terceros, tales como subcontratistas, y ayuda a la integración de los distintos intereses.
- Mejora el control de costos y plazos.
- Mejora la capacidad de respuesta del proyecto a cambios futuros, ayudando a una gestión proactiva.
- Optimiza la utilización del tiempo de la administración de la obra.
- Mejora la supervisión y control de terreno.
- Genera una base de información para el manejo de reclamos debido a acciones del mandante que han tenido consecuencias en el desarrollo de la obra.

Conclusiones y/o recomendaciones

- El proceso de planificación de la construcción debe determinar claramente cuáles son los recursos (materiales, humanos, equipos), sistemas o metodología a implementar, conociendo claramente cuál es el alcance y limitaciones de cada recurso utilizado, para poder así general el mejor producto que según la necesidad y su capacitada puede dar.
- Debe tener una clara comprensión de que las decisiones sobre tecnología involucran aspectos económicos, estratégicos, de calidad y, en general, todos los aspectos de la gestión, necesidad del cliente, estrategia de la empresa y las decisiones
- No es conveniente realizar una receta o sistema fijo de organización de obras provisionales ya que dependen del alcance y el tipo de proyecto.
- En este documento se ha presentado un breve resumen de los principales conceptos sobre temas tales como, instalaciones, reglamentos, planes, diagramas, cartas de procesos, planificación e implementación, con el objetivo de implementar estas importantes filosofías en la administración de las operaciones en construcción.

- Todas las ideas de planificación a corto plazo presentadas pueden ser también aplicadas en forma individual a cualquier nivel de las operaciones, asegurándose siempre la calidad y el control de las mismas.
- El uso de herramientas tecnológicas, como programas de simulación de operaciones de construcción, ayudan como complemento en la toma de decisiones de los procesos constructivos y su eficacia al momento de la ejecución.
- Los diagramas de flujo, pueden ser de mucha utilidad en el diseño de las instalaciones previas y provisionales y en la distribución de las áreas de trabajo de un proyecto de construcción.

Referencias

- [1] Serpell, A. (2002). *ADMINISTRACION DE OPERACIONES DE CONSTRUCCION*. Santiago, Chile: ALFAOMEGA.
- [2] Castillejo, W. R. (2013). *Gerencia de Construcción y del Tiempo y Costo*. Lima, Perú: Empresa Editora Macro E.I..R.L.
- [3] Leandro Hernández, A. G. (2018). *MANUAL DE BUENAS PRACTICAS PARA INCREMENTAR LA PRODUCCIÓN EN PROCESOS DE CONSTRUCCIÓN*. Cartago, Costa Rica: Cámara Costarricense de la Construcción - TEC.
- [4] MIDEPLAN. (2019). *Guía para la Elaboración de Diagramas de Flujo*. San José, Costa Rica: MIDEPLAN.
- [5] Serpell Bley, A. (2015). *Gestión de operación de Construcción*. Obtenido de Academia.edu: https://www.academia.edu/17275294/1_La_construcci%C3%B3n_y_la_gesti%C3%B3n_de_obras_de_construcci%C3%B3n

Identificación de factores que afectan la aplicación de la prueba Short Physical Performance Battery en centros de atención para el adulto mayor

Identification of affecting factors for the SPPB test in senior attention centers

María Cristina Vargas-Del-Valle¹, Olga Sánchez-Brenes²,
Magaly Sánchez-Brenes³, Arturo Huete-Calderón⁴, Ronny Arias-Mora⁵

Fecha de recepción: 9 de julio de 2020

Fecha de aprobación: 18 de octubre de 2020

Vargas-Del-Valle, M.C; Sánchez-Brenes, O; Sánchez-Brenes, M; Huete-Calderón, A; Arias-Mora, R. Identificación de factores que afectan la aplicación de la prueba Short Physical Performance Battery en centros de atención para el adulto mayor. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-4 Octubre-Diciembre 2021. Pág 192-203.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i4.5204>

- 1 Laboratorio de Ergonomía Aplicada, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: crisvargasdelvalle@gmail.com
- 2 Laboratorio de Ergonomía Aplicada, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: olsanchez@tec.ac.cr
- 3 Laboratorio de Ergonomía Aplicada, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: msanchez@tec.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-8107-3361>
- 4 Escuela de Ingeniería en Diseño Industrial, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: arturohuete@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-1351-0117>
- 5 Área académica de Ingeniería Mecatrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: ronarias.m@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8380-5709>



Palabras clave

Adulto mayor; batería funcional; SPPB; desempeño físico.

Resumen

El objetivo de este estudio es la identificación de factores que influyen en la aplicación de la prueba *Short Physical Performance Battery* (SPPB) para la valoración funcional en adultos mayores. Esta evaluación caracteriza las causas que afectan la medición y su relación con la fiabilidad de los datos. Los puntajes son determinantes para establecer algún criterio de fragilidad en la persona mayor y con los cuales se establecerán intervenciones adecuadas. Los datos fueron recolectados utilizando un enfoque mixto de observaciones directas de los involucrados, mapeo de procesos y procedimientos de la prueba, entrevistas a especialistas y adultos mayores, revisión de notas de campo, fotografías y video. Los resultados en la aplicación de la prueba muestran tiempos muy similares al mínimo reportado en la teoría, sin embargo, esos tiempos están basados en ambientes controlados por lo que no se contemplan factores que se presentan en la realidad y que afectan directamente la aplicación de la prueba. Además, los elementos con mayor influencia son el tipo de paciente, el instrumento de medición utilizado, el proceso para realizar la prueba y los sistemas de registro utilizado, entre otros. Este estudio brinda información útil acerca de la labor que se realiza en la valoración funcional dentro de la atención geriátrica de Costa Rica. Comprender esta dinámica ayuda a futuras investigaciones para apoyar la labor diaria de los especialistas en salud del país mediante la vinculación entre la ingeniería y la salud, mejorando así la calidad de vida de personas de la tercera edad.

Keywords

Elderly; functional battery; SPPB; physical performance.

Abstract

The goal of this study is to identify causes that influence the application of the Short Physical Performance Battery (SPPB), a functional performance test for older adults. This evaluation describes the main causes that affect the measurement and the relationship between them and the reliability of the data. These scores are decisive in establishing some frailty criteria in the elderly and with which the appropriate guidelines and programs will be established. Data was collected using a mixed approach of direct observations, mapping of the procedures, interviews with specialists and older adults, review of field notes, photographs and video. Results in the application of the battery test show times similar to the minimum reported in theory, however, these times were established in controlled environments, leaving out factors that occur in a daily application. In addition, the elements with the greatest influence are the type of patient, the measurement instrument used, the process to perform the test and the registration systems used, among others. This study provides useful information about the work carried out in functional assessment within geriatric care in Costa Rica. Understanding this dynamic helps future research to support the daily work of the health specialists by linking engineering and health, thus improving the quality of life of the elderly.

Introducción

Según la Organización Mundial de la Salud en su Informe Mundial sobre el Envejecimiento y la Salud del 2015, entre el año 2000 y el 2050 la población mayor de 60 años aumentará de 605 a 2000 millones de personas. Además, recalca que “habrá más personas octogenarias y

nonagenarias que nunca antes”. El Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) en sus proyecciones demográficas para el 2045 [1], prevé un aumento en la población mayor (65 años o más) de un 8,5% en el 2018 a un 18% en el 2045.

Un factor fundamental en este proceso de envejecimiento es la pérdida de la fuerza muscular y, por ende, la capacidad motora. Este fenómeno inicia a los 30 años y continúa hasta los 80 años con una disminución entre el 30 y el 50% [2] lo que impacta significativamente la independencia y autonomía del adulto mayor y, por lo tanto, es necesario la incorporación de procesos de prevención y rehabilitación.

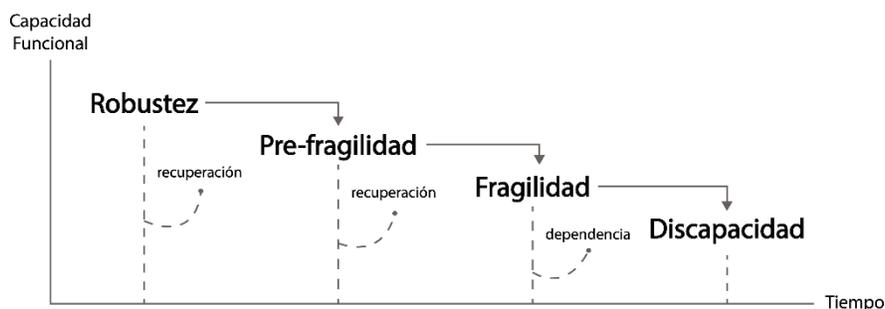


Figura 1. Cascada de disminución funcional en adultos mayores desde la independencia hasta la fragilidad y discapacidad [3].

La fragilidad física en un adulto mayor puede ser considerada como un estado anterior a la discapacidad (o asistencia necesaria en Actividades de la Vida Diaria (AVD)). Sin embargo, no necesariamente una persona mayor tendrá un criterio de fragilidad, ya que existen otras causas que pueden empeorarla como la inactividad física. [3]. Otro aspecto es la sarcopenia o una disminución en la fuerza muscular, la masa muscular (en calidad y en cantidad) y, por lo tanto, el rendimiento físico. Además, la fragilidad está asociada al incremento de caídas, fracturas, discapacidad física y mortalidad [4]. Por ello, es de suma importancia comprender la dinámica del adulto mayor a lo largo del proceso natural de la fragilidad (figura 1). Y, una identificación e intervención adecuada puede revertir, ralentizar o detener el avance de la fragilidad a lo largo de los 4 estados. Esto permite que el adulto mayor tenga un mejor envejecimiento de acuerdo a su condición.

El sistema de salud de Costa Rica ha establecido distintos niveles geriátricos de atención para los adultos mayores. Estos niveles responden a la capacidad de atención de la red de recursos institucionales nacionales desde el ámbito sanitario especializado [5]. El Hospital Dr. Raúl Blanco Cervantes (HBC) está dentro del tercer nivel de atención siendo el centro con mayor especialización geriátrica a nivel nacional; atiende anualmente 9.250 pacientes aplicando hasta 5.061 terapias diferentes, y cuenta con un equipo profesional especializado. Esta institución ofrece una modalidad de atención llamada Hospital de Día (HD), en el cual los adultos mayores son atendidos durante el día para luego regresar a sus casas. El HD brinda un programa de rehabilitación física para pacientes con algún criterio de fragilidad. Los pacientes deben ser evaluados y calificados según su condición física, para luego planificar terapias adecuadas y mejorar su estado. La valoración funcional determina la manera en la que los especialistas enfocarán su plan terapéutico, por lo tanto, medir el desempeño y darles un criterio de fragilidad de la manera correcta es de suma importancia. La prueba que utiliza el HBC para esa valoración funcional es una batería o serie de pruebas cortas que miden variables de equilibrio, fuerza muscular de las piernas y la velocidad de la marcha llamada *Short Physical Performance Battery*

(SPPB). Esta prueba asigna por cada una de las variables descritas un puntaje y la suma de estos determina la calificación final de la valoración funcional en una escala de 0 a 12 puntos, donde un puntaje menor a 10 indica que el adulto mayor tiene algún criterio de fragilidad.

La SPPB fue creada para la identificación rápida del estado físico de un adulto mayor por medio del diagnóstico en la funcionalidad de extremidades inferiores. Además, las mediciones del desempeño en cada prueba están fuertemente asociadas a la identificación de la discapacidad motora, y las mismas son predictores independientes de mortalidad (a corto plazo) e institucionalización [6]. Es por ello que la comunidad médica utiliza esta batería de pruebas, de entre muchas otras, como un primer acercamiento para la detección e identificación de la fragilidad.

El proceso general de la atención geriátrica para un adulto mayor tiene varias etapas en donde se realizan pruebas de evaluación, diagnóstico, pronóstico e intervención (figura 2). Si esa persona es clasificada dentro de algún criterio de fragilidad, el objetivo principal de los programas de salud y de los especialistas es su retorno al nivel más alto posible dentro de la cascada de disminución funcional. La valoración del rendimiento físico se encuentra dentro de la evaluación del adulto mayor en la cual se utilizan instrumentos validados de medición funcional geriátrica como la prueba SPPB (figura 3).

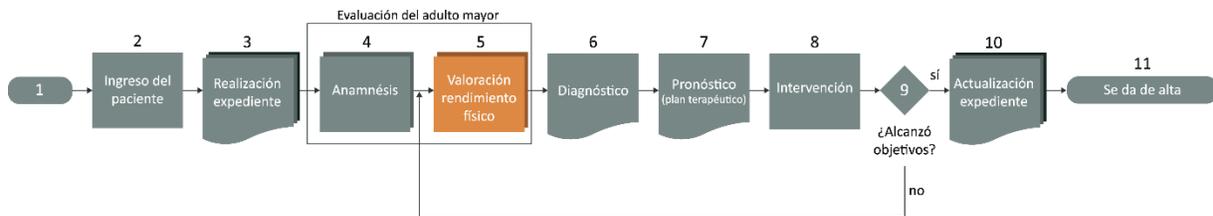


Figura 2. Proceso promedio de la evaluación del adulto mayor en Costa Rica.

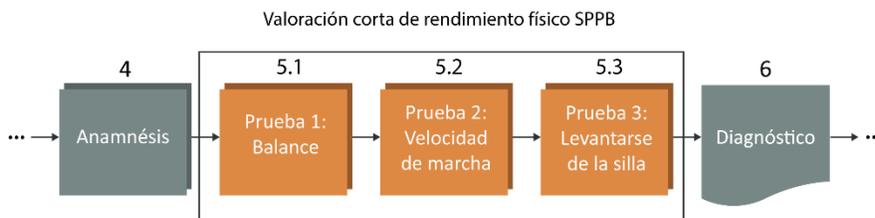


Figura 3. Prueba SPPB dentro del proceso de evaluación del adulto mayor.



Figura 4. Sub prueba de Balance. Posición paralela, semi-tándem y tándem.

La primera prueba consiste en medir el equilibrio del adulto mayor por medio del posicionamiento de los pies, durante 10 segundos, en paralelo, tándem y semi tándem (Figura 4). La segunda prueba mide el tiempo que dura el paciente en completar 5 ciclos de levantarse y sentarse de una silla, con el fin de observar la fuerza en el tren inferior (Figura 5). Y la última prueba consiste en medir el tiempo que toma el paciente en completar una distancia de 4 o 6 metros ida y vuelta para conocer la marcha del adulto mayor (Figura 6) [6], [7].



Figura 5. Sub prueba de velocidad de la marcha. Este recorrido se realiza de 2 a 3 veces para sacar un promedio.

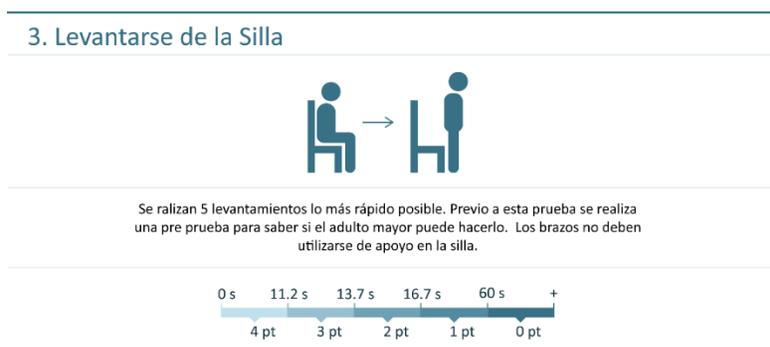


Figura 6. Sub prueba de levantarse de la silla.

A pesar de que la prueba SPPB tiene una fuerte validación a nivel internacional, es una prueba operador dependiente y en la cual el puntaje final que determina el estado funcional del paciente puede estar influenciado por varios factores asociados a la manera en la que cada especialista aplica la prueba (error humano), los instrumentos de medición que se utilizan, el entorno o los recursos disponibles de tiempo y personal para la aplicación.

Este estudio se enfocó en la identificación de los factores principales que afectan la fiabilidad de los datos en la prueba SPPB, que los especialistas aplican a los adultos mayores para conocer el estado funcional y categorizarlos según su nivel de fragilidad. Para el estudio se contó con la colaboración de especialistas del HBC, así como de la Asociación Cartaginesa de Atención a Ciudadanos de la Tercera Edad (ASCATE). A los participantes se les entregó, leyó y explicó el procedimiento a realizar por medio del consentimiento informado con base en la Ley 9234 (ley reguladora de investigación biomédica) de Costa Rica [8].

Para este estudio se consideraron las normas internacionales para identificar y gestionar la fragilidad en la práctica clínica establecida por la Conferencia Internacional sobre Investigación en Fragilidad y Sarcopenia (ICFSR por sus siglas en inglés). Estas pautas son fuertemente recomendadas por los especialistas debido a los beneficios de la intervención, bajo riesgo

asociado y mayor aceptación por parte de los pacientes. De las 15 pautas que contiene la investigación, solamente 4 se refieren al estado físico y, por lo tanto, a la prevención en la disminución funcional del adulto mayor. Estas son la detección y la evaluación de la fragilidad, así como la actividad y el ejercicio físico (cuadro 1).

Cuadro 1. Resumen de las recomendaciones de la ICFSR para la identificación y el manejo de la fragilidad en adultos mayores [3].

Recomendación	Grado de recomendación	Certeza (calidad) en la evidencia
<i>Detección de la fragilidad</i> 1. Utilizar un instrumento rápido y validado para detectar la fragilidad en personas con 65 o más años.	Fuerte	Baja
<i>Evaluación de la fragilidad</i> 2. La evaluación clínica de la fragilidad debe ser para todos los adultos mayores, siendo como positiva la pre fragilidad y la fragilidad.	Fuerte	Baja
<i>Actividad/Ejercicio Físico</i> 6. Se les debe de ofrecer un programa de actividad física multicomponente (y como prevención). 7. Se debe referir a personas mayores con debilidad a programas de entrenamiento en resistencia.	Fuerte	Moderada

Por medio de la primera recomendación, los especialistas tienen ese acercamiento inicial en la identificación y el manejo de la fragilidad en el adulto mayor. Esos instrumentos rápidos y validados son pruebas que buscan la predicción del estado general de la persona mayor a la hora de la valoración, enfatizado el riesgo de discapacidad y, por lo tanto, la necesidad de admisión a un hogar de ancianos, la dependencia en la atención médica, la disminución continua en las AVD y mortalidad del paciente. La SPPB ha sido una prueba exitosa en predecir el desarrollo de la discapacidad (movilidad reducida, incapacidad de las AVD) y, por lo tanto, se utiliza como instrumento validado a nivel internacional [9].

Sin embargo, la forma en la que se realiza la prueba actualmente puede influir directamente en los resultados de la medición y alterar significativamente el puntaje final con consecuencias en la categorización del adulto mayor en su nivel de fragilidad. Por la escala sensible de la prueba, podría ser fácil incurrir en una puntuación incorrecta o tener un desconocimiento de cuánto cambio, en la puntuación de pruebas consecutivas, se considera significativo para declarar un deterioro físico en el adulto mayor [10].

Las medidas de rendimiento físico son parte de la atención geriátrica y con las cuales se toman decisiones importantes acerca del cuidado necesario para el adulto mayor. Por ello los especialistas no solo requieren de instrumentos validados, sino que los datos obtenidos en la aplicación de las pruebas sean confiables y determinen con certeza el comportamiento a lo largo de la terapia o de su evaluación periódica y si existe alguna alteración en el desempeño del paciente para actuar lo más temprano posible.

Metodología

Esta investigación utilizó un enfoque mixto que incluía observaciones directas de los involucrados, mapeo de procesos y procedimientos de pruebas de valoración funcional, entrevistas a especialistas y adultos mayores, y revisión de información específica acerca de la prueba dentro del HBC. Además, se utilizó la metodología de Diseño y desarrollo de producto de Karl T. Ulrich y Steven D. Eppinger. Los capítulos de identificación de oportunidades, identificación de necesidades, así como el de especificaciones de producto se utilizaron como referencia para determinar y analizar los puntos críticos que afectan la aplicación de la prueba SPPB.

Los datos recolectados en la aplicación de la prueba se realizaron de manera observacional con una muestra seleccionada por conveniencia de 5 adultos mayores con diferentes trastornos cognitivos y físicos. Se tomaron los tiempos con un cronómetro de dispositivo móvil mientras la misma fisioterapeuta de ASCATE aplicaba la prueba y tomaba los tiempos con un reloj de pulsera digital. Por cuestiones administrativas, dentro del HBC solo se observó a un adulto mayor sin conocimiento de la edad y con un síndrome de caída, mientras un médico geriatra aplicaba la prueba y se realizaron 2 entrevistas exhaustivas al respecto del procedimiento.

Además, se realizó un mapeo del proceso de la aplicación de la prueba SPPB dentro de una consulta diaria del especialista. La retroalimentación obtenida con las entrevistas, videos y notas de campo suministraron la información necesaria para construir los flujos de trabajo y proceso. Con este insumo y realizando un trabajo iterativo de análisis y observación, se identificaron los factores principales que afectan la fiabilidad de la prueba.

Resultados

Se procedió a realizar un diagrama de flujo más detallado de cada sub prueba (Figura 7,8,9) para determinar la interacción del especialista con el paciente para la aplicación de la batería de prueba SPPB como parte de la valoración geriátrica. Por medio de este método se identificaron reprocesos y, por lo tanto, puntos críticos que afectan la fiabilidad de los datos y el tiempo de aplicación. Estos reprocesos son dependientes del tipo de paciente al que se le realice la prueba, por lo tanto, se abarcó cada posible escenario en conjunto con los especialistas y apoyados por los videos y observaciones de campo. El proceso se dividió en etapas principales para establecer los inicios y finales de cada tarea. Se midieron los tiempos para cada etapa y se identificó que la mayoría llega a una duración mínima reportada en la teoría de 5 minutos [6], [11]. También se tomó en cuenta el tiempo que tienen los especialistas en cada consulta para realizar la prueba. De acuerdo a las entrevistas, la consulta es de 30 minutos. De aquí la importancia de no sobrepasar los 10 minutos de duración en la aplicación de la prueba de acuerdo al criterio de expertos.

El diagrama de la sub prueba de balance muestra el proceso normal de aplicación en los tonos verdes. A lo largo de las etapas de instrucción en la prueba de equilibrio, un reproceso frecuente es la demostración de las posiciones y el reacomodo del adulto mayor dentro del espacio determinado para mantener el balance. Esto aumenta el tiempo de aplicación pues el especialista debe cerciorarse de la posición correcta del paciente para iniciar el cronómetro. En la etapa de medición, el punto más crítico es mantener la seguridad para el adulto mayor y manejar el cronómetro. Esto genera una medición menos precisa influida por el tiempo de reacción del especialista que, a su vez, utiliza los brazos para asegurar la estabilidad de la persona mayor. Para las etapas de registro y ejecución se identificaron situaciones que no son tan críticas pero que aumenta el tiempo de aplicación (cuadro 2).

Para la sub prueba de velocidad de marcha el mayor momento crítico es el traslado del paciente a un lugar que cumpla con los 4 o 6 metros de distancia para poder realizar el recorrido. Esto causa que la aplicación de la prueba se detenga mientras el paciente vuelve a la oficina del especialista para continuar con la última sub prueba. Además, esta etapa está influida por reprocesos que incluyen la distracción del adulto mayor por terceros mientras se realiza la prueba con lo que se debe reiniciar el cronómetro y la recolocación del material para identificar los 4 o 6 metros pues al ser un espacio común otras personas alteran la marca. Otros factores que aumentan la aplicación de la sub prueba se mencionan en el cuadro 2.

Para la última sub prueba de levantarse de la silla, el punto crítico se ubica en la etapa de medición. Por ser la prueba que demanda mayor esfuerzo para el adulto mayor, es necesario que el especialista realice un paso de verificación para saber si este es capaz de completar la prueba. Este paso implica que el paciente se levante de la silla sin ayuda de los brazos por una vez. Si es capaz de levantarse, se detiene al adulto mayor y se inicia la prueba con la medición. Sin embargo, en algunas ocasiones el adulto mayor continúa levantándose más de una vez en el paso de verificación por lo que el especialista debe detenerlo, explicarle de nuevo e iniciar la medición. Esta confusión provoca que el paciente se agote más rápido con lo que puede perjudicar el tiempo óptimo de su capacidad real. Otros factores que aumentan la aplicación de la sub prueba se mencionan en el cuadro 2. Los factores comunes entre las tres pruebas que no permiten una medición precisa es el tiempo de reacción del especialista y el tipo de instrumento utilizado. El uso del cronómetro de un reloj digital de pulsera o del teléfono celular, aunado a los distintos tiempos de reacción de acuerdo a la manera en la que se usan estos instrumentos desfavorece el puntaje, así como la fiabilidad de los datos.

Los reprocesos generados debido a los puntos críticos de cada etapa aumentan la aplicación de la prueba hasta 15 minutos, dependiendo del tipo de paciente y de las características del espacio en donde se esté realizando. Esta situación obliga a los especialistas a prescindir de la prueba si se encuentran en esta situación, con lo que los pacientes se quedan sin la valoración. En la tabla 2 se muestra el tipo de reproceso en cada etapa y su respectivo el rango de tiempo. Valor que se le sumaría al proceso normal de aplicación. Para el especialista es muy importante valorar el desempeño físico del adulto mayor a través de esta prueba, y la diferencia en sus características físicas y cognitivas influye considerablemente en el tipo de reproceso que se pueda presentar. Por ejemplo, en la prueba de equilibrio los especialistas invierten más tiempo en la etapa de Instrucción cuando después de haber dado la explicación de la posición, los adultos mayores dudan de las indicaciones y el especialista debe demostrar la posición o el recorrido. En este caso, los pacientes con alguna situación cognitiva fueron los que generaron el reproceso. Además, para la etapa de Medición en la misma prueba, un paciente con trastorno cognitivo y otra con patologías a nivel del tronco se perdían en el espacio al realizar la posición semitándem o tándem, lo que ocasionó que el profesional pausara el intento de colocación y los ayudara a tomar la posición. Para la prueba de velocidad, el factor traslado hizo que la prueba se pausara por un tiempo mientras pacientes con andadera o con lesiones en la cadera llegaran.

Subprueba de Balance (A)

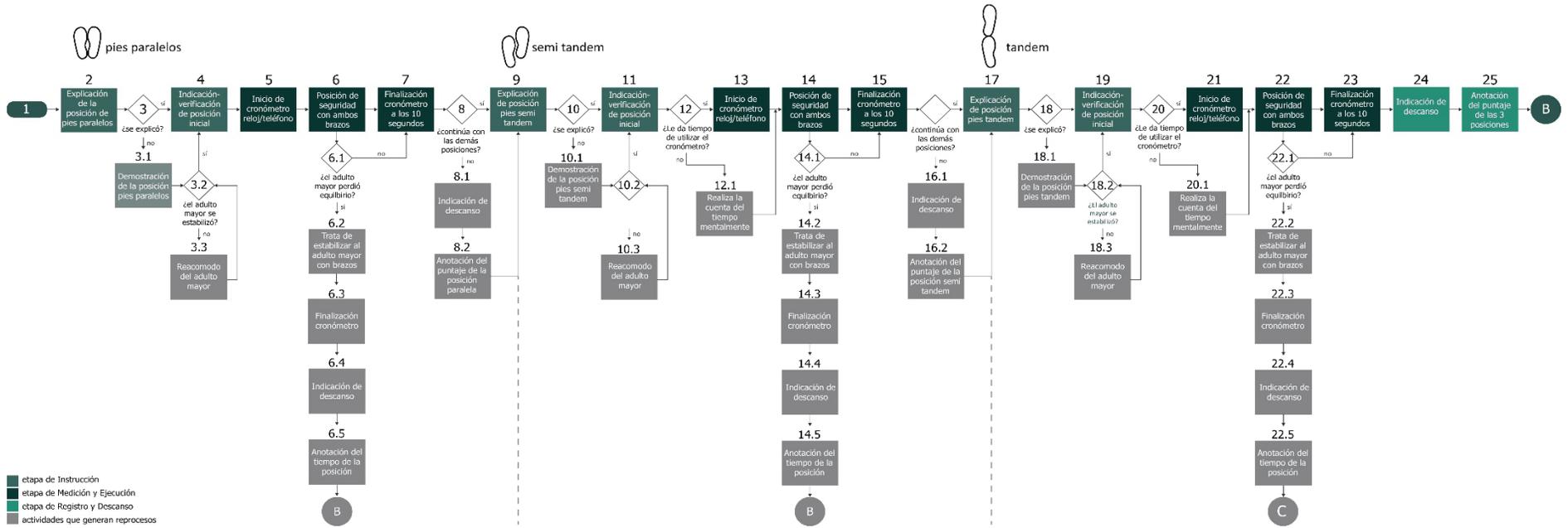


Figura 7. Diagrama de flujo de la prueba de balance (A) dentro de la SPPB.

Subprueba de Velocidad de marcha (B)

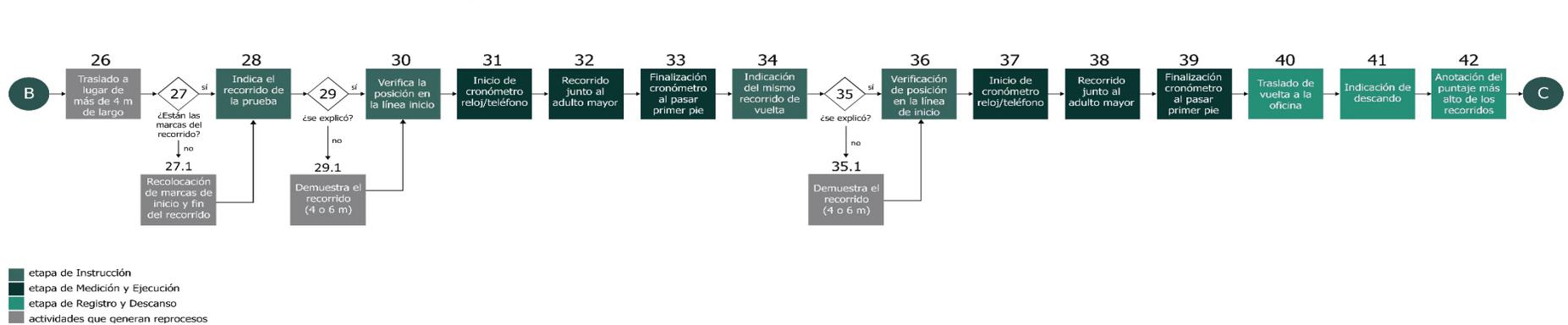


Figura 8. Diagrama de flujo de la prueba de velocidad de marcha (B) dentro de la SPPB.

Subprueba de Levantarse de la Silla (C)

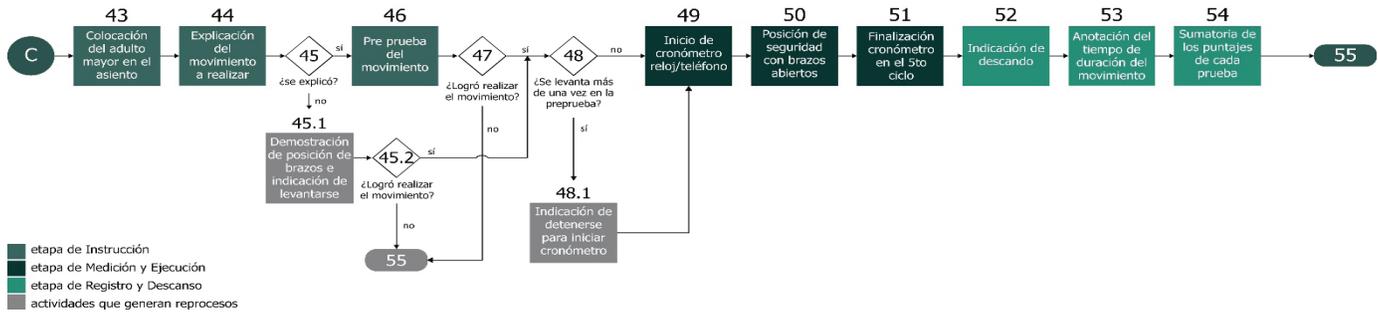


Figura 9. Diagrama de flujo de la prueba de levantarse de la silla (C) dentro de la SPPB.

Cuadro 2. Puntos críticos y rangos de tiempos de reproceso que se le agregan a cada sub prueba en cada etapa.

Etapa	Puntos críticos y tiempos de reproceso para cada sub prueba						
	Balance	Tiempo adicional (s)	Velocidad de marcha	Tiempo adicional (s)	Levantarse y sentarse de la silla	Tiempo adicional (s)	
	Instrucción	<ul style="list-style-type: none"> Comunicación entre especialista y paciente Colocación del adulto mayor en el espacio 	entre 25-87	Comunicación entre involucrados	entre 10-20	Comunicación entre involucrados	entre 5-37
	Medición	<ul style="list-style-type: none"> Reacomodo de posición del adulto mayor por el espacio destinado para prueba Utilización del instrumento de medición Tiempo de reacción del especialista con el instrumento de medición Diferentes técnicas en el procedimiento 	entre 20-123	<ul style="list-style-type: none"> Colocación previa de materiales para la prueba Traslado a otro espacio más largo para prueba Utilización del instrumento de medición Diferentes técnicas en el procedimiento Interrupción en el recorrido de terceros 	entre 60-190	<ul style="list-style-type: none"> Utilización del instrumento de medición Tiempo de reacción del especialista con el instrumento de medición Diferentes técnicas en el procedimiento 	entre 2-8
	Registro	<ul style="list-style-type: none"> Diferentes técnicas en el procedimiento Método de registro 	entre 5-12	<ul style="list-style-type: none"> Diferentes técnicas en el procedimiento Método de registro 	entre 8-12	<ul style="list-style-type: none"> Diferentes técnicas en el procedimiento Método de registro 	entre 5-10
	Ejecución	<ul style="list-style-type: none"> Inseguridad del adulto mayor acerca de las instrucciones Distracción durante prueba 	entre 2-5	<ul style="list-style-type: none"> Tiempo de reacción del adulto mayor al iniciar Inseguridad del adulto mayor de la distancia a recorrer 	entre 2-6	<ul style="list-style-type: none"> Tipo de paciente Tiempo de reacción del adulto mayor al iniciar 	entre 2-15
	Descanso	* No se encontró	—	Traslado de regreso al consultorio	entre 25-100	No se encontró	—

Y para la indicación de esta prueba, nuevamente pacientes que dudaban de las indicaciones provocaban que el especialista demostrara e hiciera todo el recorrido ida y vuelta (de 4 metros de largo). En la prueba de levantarse de la silla, se realiza una pre prueba para que conocer si el adulto mayor es capaz de sentarse y levantarse de la silla. Esta prueba se realiza 1 vez, sin embargo, el paciente con trastorno cognitivo y el que utiliza una andadera siguieron realizando la prueba una vez iniciaron el movimiento, con lo que se tuvo que detener la prueba y tomar un descanso de por lo menos un minuto.

Una vez realizado el proceso de identificación de los puntos críticos, tipos de reproceso e influencia de las características del paciente para cada prueba, se definieron cuáles causas podrían estar afectando la fiabilidad de la medición en la prueba SPPB, así como el tiempo para aplicarla. Dichos factores fueron apoyados también por las necesidades específicas del especialista y el adulto mayor en la prueba. Se ordenaron por grupos de necesidades y se establecieron catorce factores directos e indirectos (cuadro 3). Los factores que los especialistas consideraron más críticos fueron relacionados al instrumento de medición. La fisioterapeuta usaba un cronómetro en el reloj digital de pulsera mientras que el médico geriatra utilizó el celular. Mientras el médico sentía incomodidad por prestar atención a la prueba y manejar el celular, la fisioterapeuta expresó la imposibilidad de reaccionar con rapidez, por finalizar el cronómetro, en situaciones donde el adulto mayor puede desbalancearse. Otra observación importante se dio en el tipo de procedimiento. Mientras que la fisioterapeuta registraba todos los datos al final de cada subprueba, el geriatra lo hacía después de cada posición o movimiento

con lo que existían más pausas. Ambos especialistas coincidieron en la dificultad de aplicar la misma prueba a pacientes con condiciones más severas (cognitivas o físicas), y que sólo debería de prescindir de ella los pacientes con discapacidad física. Finalmente, otro factor de alta importancia fue el seccionamiento de los espacios para aplicar la prueba, pues la prueba de velocidad solo puede hacerse en espacios largos como un pasillo. Además, las colocaciones de marcas son alteradas por otras personas aumentando el tiempo de aplicación (cuadro 3).

Cuadro 3. Necesidades y factores o causas que afectan la fiabilidad de los datos y el tiempo de aplicación en la prueba.

No.	Necesidad	Factor
1	Organización del lugar de trabajo	Desorganización
2	Equipo de trabajo colaborativo	
3	Comunicación eficaz en la prueba	Comunicación inadecuada
4	Similitud en la manera de atención al paciente	Tipo de entrenamiento
5	<i>Know how</i> de la aplicación de la prueba	Experiencia del especialista
6	Agilidad del especialista en la prueba	
7	Prueba realizable para los pacientes con características diferentes	Tipo de paciente
8	Disposición del paciente para realizar la prueba	
9	Similitud en la aplicación de la prueba por parte de diferentes especialistas	Tipo de procedimiento
10	Estandarizar la aplicación de la prueba	Proceso no estandarizado
11	Registrar el puntaje lo más rápido posible	Diseño de la prueba
12	Calcular el puntaje lo más rápido posible	
13	Instrumento de medición preciso y fácil de usar	Tipo de tecnología
14	Materiales de apoyo adecuados	Tipo de material
15	Colocación rápida y que no sea manipulada por terceros	
16	Materiales duraderos	Frecuencia alta de mantenimiento
17	Tiempo de aplicación de la prueba rápido dentro de la consulta	Tiempo limitado
18	Marcar o delimitar el espacio para las posiciones	Señalización inexistente
19	No seccionar la prueba en dos espacios (para evitar traslados)	Espacio pequeño

Conclusiones

La prueba de valoración funcional SPPB tiene gran validez y frecuencia de uso a nivel internacional, con el fin de detectar de una manera rápida el estado de fragilidad del adulto mayor y predecir una discapacidad a largo plazo. Está hecha para visualizar tres capacidades en el adulto mayor: su equilibrio, su fuerza de piernas y su marcha en un tiempo determinado. Sin embargo, se han observado ciertos factores críticos que influyen en dicha medición y, por lo tanto, en el criterio final provocando desconfianza en los datos.

Los puntos más críticos se observaron en el manejo del instrumento de medición (un cronómetro), el manejo del espacio para aplicar la prueba y la manera en la que se dan las instrucciones. Esto afecta la fiabilidad de los datos y que el tiempo de aplicación aumente. Además, los reprocesos identificados se asocian con el tipo de paciente que realiza la prueba, la reacomodación del paciente para que vuelva a tomar la postura adecuada y vuelva a ser medido o la demostración de las instrucciones que ya se habían dado. Y, por último, los factores que más afectan son el tipo de tecnología, tipo de paciente, modo de aplicar la prueba y el espacio de aplicación. De acuerdo a este análisis se ve el potencial que tiene la incorporación de la tecnología en este tipo de pruebas de valoración, en donde se pueda apoyar la labor del especialista geriátrico y brindarle mayor confianza en sus mediciones y en la rehabilitación del paciente.

Referencias

- [1] Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica de Costa Rica, «COSTA RICA: Prospectiva en cambio demográfico al 2045,» San José, 2017.
- [2] N. Eynon, C. Yamin, D. Ben-Sira y M. Sagiv, «Optimal health and function among the elderly: lessening severity of ADL disability,» *European Review of Aging and Physical Activity*, vol. 6, n° 55, 2009.
- [3] E. DENT, J. MORLEY, A. CRUZ-JENTOFT, L. WOODHOUSE, L. RODRÍGUEZ-MAÑAS y L. FRIED, «PHYSICAL FRAILITY: ICFSR INTERNATIONAL CLINICAL PRACTICE GUIDELINES FOR IDENTIFICATION AND MANAGEMENT,» *The journal of nutrition, health & aging*, vol. 23(9), pp. 771-787, 2019.
- [4] A. CRUZ-JENTOFT, G. BAHAT, J. BAUER, Y. BOIRIE, O. BUYÈRE y T. CEDERHOLM, «Sarcopenia: revised European consensus on definition and diagnosis,» *Age and Aging*, vol. 48 (1), pp. 16-31, 2019.
- [5] F. MORALES M, «La Atención Integral De Las Personas Adultas Mayores En Costa Rica,» [En línea]. Available: <http://www.apronage.or.cr/13-articulos-personal-de-salud/27-la-atencion-integral-de-las-personas-adultas-mayores-en-costa-rica>. [Último acceso: 29 04 2019].
- [6] J. Guralnik, E. Simonsick, L. Ferrucci, R. Glynn, L. Berkman, D. Blazer, P. Scherr y R. Wallace, «A short physical performance battery assessing lower extremity function: association with self-reported disability and prediction of mortality and nursing home admission,» *Journal of Gerontology*, vol. 49(2), pp. 85-94, 1994.
- [7] Hospital Nacional de Geriátría y Gerontología Dr. Raúl Blanco Cervantes, *PROTOCOLO DE LA PRUEBA CORTA DE DESEMPEÑO FÍSICO (SPPB) Y HOJA DE CALIFICACIÓN*, San José, 2019.
- [8] Sistema Costarricense de Información Jurídica, «Reglamento a la Ley Reguladora de Investigación Biomédica, N° 39061-S,» 2019. [En línea]. Available: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=79779&nValor3=103451&strTipM=TC.
- [9] J. Guralnik, L. Ferrucci, E. Simonsick, S. M.E y ,. R. Wallace, «Lower-extremity function in persons over the age of 70 years as a predictor of subsequent disability,» *The New England Journal of medicine*, vol. 332, n° 9, pp. 556-61, 1995.
- [10] S. Perara, S. Mody, R. Woodman y S. Studenski, «Meaningful Change and Responsiveness in Common Physical Performance Measures in Older Adults,» *The American Geriatrics Society*, vol. 54, n° 5, pp. 743-749, 2006.
- [11] Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad de España, «Documento de consenso sobre prevención de fragilidad y caídas en la persona mayor. Estrategia de Promoción de la Salud y Prevención en el SNS,» ESTILO ESTUGRAF-IMPRESORES, S.L, Madrid, 2014.