



TECNOLOGÍA
en marcha

Revista trimestral
Julio-Setiembre 2021
Volumen 34 N° 3
ISSN 0379-3982 / ISSN-E 2215-3241



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Publicación y directorio en catálogos



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. 34-3, Julio-Setiembre
(2021) –Cartago: la Editorial, 2021 –
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

Modelamiento kriging del comportamiento vertical de ruido ambiental mediante mapas temáticos durante festividades culturales en Puno y Juliaca, Perú Kriging modeling of vertical behavior of environmental noise through thematic maps during cultural festivities in Puno and Juliaca, Perú <i>Grover Marín-Mamani, Esteban Marín-Paucara, Néstor Bolívar-Espinoza, Vitaliano Enriquez-Mamani, Francisco Curro-Pérez</i>	3
Primera parte: Almacenamiento insaturado de agua en un perfil de suelo First part: Storage unsaturated water in a soil profile <i>Adrián Enrique Chavarría-Vidal</i>	15
Melón (<i>Cucumis melo</i> L.) Honey Dew cultivado bajo invernadero: correlación entre densidad de siembra y variables de rendimiento Honey Dew melon (<i>Cucumis melo</i> L.) grown under greenhouse conditions: correlation among plant density and yield variables <i>Jorge Manuel Díaz-Alvarado, José Eladio Monge-Pérez, Michelle Loría-Coto</i>	34
Caracterización morfológica de un lecho de recubrimiento de tabletas farmacéuticas mediante un algoritmo de visión artificial Morphological characterization of a pharmaceutical tablet coating bed using an artificial vision algorithm <i>Joel Jesús Alpizar-Castillo, Mac Arturo Murillo-Fernández</i>	51
Microgeneración de energía eólica en un entorno boscoso en Costa Rica: estudio de caso Micro wind power generation in a Costa Rica's forested area: a case study <i>Karina Torres-Castro, Cindy Torres-Quirós, Gustavo Richmond-Navarro</i>	61
Oportunidades y desafíos para la integración de almacenamiento electroquímico en las redes eléctricas centroamericanas Opportunities and challenges to integrate electrochemical storage in central american power grids <i>Gustavo Adolfo Gómez-Ramírez, Carlos Meza, Sergio Morales-Hernández</i>	70
Evaluación del impacto ambiental de una planta de lácteos en Costa Rica Environmental impact assessment of a dairy plant in Costa Rica <i>Kelvin Arce-Villalobos, Alejandro Arias-Castro, Yuliana González-Jiménez, Karina Hernández-Ugalde, José Carlos Mora-Barrantes</i>	83

Pesca de <i>Octopus</i> sp. en las costas de Cuajiniquil, Guanacaste, Costa Rica	
<i>Octopus</i> sp. fishing on the coast of Cuajiniquil, Guanacaste, Costa Rica	
<i>Adrián Mora-Gamboá, Milagro Carvajal-Oses, Rooel Campos-Rodríguez</i>	96
Análisis de ciclo de vida de lechuga (<i>Lactuca sativa</i>) cultivada bajo un sistema orgánico y convencional, como insumo para toma de decisiones en dos fincas agrícolas costarricenses	
Life cycle analysis of lettuce (<i>Lactuca sativa</i>) cultivated under an organic and conventional management system, as input for decision-making in two Costa Rican agricultural farms	
<i>Jonathan Rodrigo Castro-Granados, Laura Brenes-Peralta, María Fernanda Jiménez-Morales, Rooel Campos-Rodríguez</i>	108
Characterization of sandy beaches of the Southern Caribbean of Costa Rica	
Caracterización de las playas arenosas del Caribe Sur de Costa Rica	
<i>Lilliana Piedra-Castro, Maikol Castillo-Chinchilla, Vanessa Morales-Cerdas</i>	120
Priorización de intervenciones en puentes utilizando indicadores	
Indicators for Bridge Actions Prioritization	
<i>Giannina Ortiz-Quesada, César Garita-Rodríguez, Angel Navarro-Mora, Gerardo Paez</i>	134
Food loss assessment in micro, small and medium-sized agro-industrial enterprises	
Evaluación de pérdida de alimentos en una micro, pequeña y mediana empresa agroindustrial	
<i>Rooel Campos-Rodríguez, Laura Brenes-Peralta, Arlyn García-Salas, María Fernanda Jiménez-Morales</i>	143
Construcción del Índice de Riesgo para determinar la Sostenibilidad del Servicio de Agua y Saneamiento (IRSSAS) en distritos rurales de Costa Rica atendidos por ASADAs	
Construction of Risk-Index for assessment of water and sanitation sector (IRSSAS) in Costa Rica	
<i>Macario Pino-Gómez, Silvia M. Soto-Córdoba, Lilliana Gaviria-Montoya</i>	156
Metodologías para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero: descripción del proyecto de control en una industria productora de cemento	
Methodologies for the calculation of greenhouse gas emissions: description of the control project in a cement-producing Industry	
<i>María Concepción Martínez-Rodríguez, Lorena Elizabeth Campos-Villegas, Jesús Castillo-Monroy</i>	177

Modelamiento kriging del comportamiento vertical de ruido ambiental mediante mapas temáticos durante festividades culturales en Puno y Juliaca, Perú

Kriging modeling of vertical behavior of environmental noise through thematic maps during cultural festivities in Puno and Juliaca, Perú

Grover Marín-Mamani¹, Esteban Marín-Paucara²,
Néstor Bolívar-Espinoza³, Vitaliano Enriquez-Mamani⁴,
Francisco Curro-Pérez⁵

Fecha de recepción: 12 de marzo de 2020
Fecha de aprobación: 19 de julio de 2020

Marín-Mamani, G; Marín-Paucara, E;
Bolívar-Espinoza, N; Enriquez-Mamani, V;
Curro-Pérez, F. Modelamiento kriging del comportamiento vertical de ruido ambiental mediante mapas temáticos durante festividades culturales en Puno y Juliaca, Perú. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-3 Julio-Setiembre 2021. Pág 3-14.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.4989>

- 1 Doctoris Scientiae en Ciencia Tecnología y Ambiente. Universidad Nacional del Altiplano, Perú. Correo electrónico: Grovermarinma20@gmail.com.
 <https://orcid.org/0000-0003-4222-6297>
- 2 Magister Scientiae en Gestión de Recursos Naturales y Medio Ambiente. Universidad Nacional del Altiplano, Perú. Correo electrónico: esmarinpa@gmail.com.
 <https://orcid.org/0000-0001-8868-6868>
- 3 Magister Scientiae en Educación, Especialidad: con Mención en: Didáctica de la Matemática. Universidad Nacional de Juliaca, Perú.
 <https://orcid.org/0000-0003-1286-7480>
- 4 Magister en Contabilidad y Finanzas. Universidad Nacional de Juliaca, Perú. Correo electrónico: Ey_enriquez@hotmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-9858-2488>
- 5 Magister Scientiae en Informática, Especialidad: con Mención en: Informática Educativa. Universidad Nacional Intercultural de Quillabamba, Perú. Correo electrónico: currof@gmail.com.
 <https://orcid.org/0000-0003-2886-4516>



Palabras clave

Contaminación acústica; geoestadística; kriging; mapa temático.

Resumen

La contaminación acústica afecta la calidad de vida de las personas en todo el mundo. El origen puede deberse a diversas causas entre ellas actividades culturales. El objetivo fue modelar la distribución vertical en mapas temáticos utilizando la técnica Kriging en la parada veneración de la Virgen de la Candelaria en Puno y la parada del carnaval de Juliaca en Perú. Las mediciones se realizaron con los métodos vial y la rejilla, con cuatro indicadores (L_{min} , L_{max} , L_{Apk} y L_{Aeq}). Se usaron 28 muestras con un total de 112 puntos de monitoreo, que se modelaron por cota a una razón de cada 5 metros. Se calcularon matemáticamente los valores en las cotas 5, 20, 50 y 100 metros para ver el comportamiento altimétrico del $dB(A)$, como control de usar los datos con el sonómetro a dichas altitudes, que se encuentran georreferenciadas en 19 L UTM WGS 84, para lo que utilizó un Sonómetro CASELLA CEL 6X0. En ambas ciudades se obtuvo que el ruido se atenúa al aumentar la altura, estando los valores para las cotas +5 m y +20 m, en ambos casos por encima de los valores permisibles de L_{Aeq} , según el Decreto Supremo N° 085-2003-PCM (mínimo 50 dB y máximo 60 dB). No se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas en los niveles de ruido para ambas ciudades con 95% de confianza en cada uno de los indicadores medidos.

Keywords

Acoustic pollution; geostatistics; kriging; thematic map.

Abstract

Noise pollution affects the quality of life of people all over the world. The origin can be due to various causes including cultural activities. The objective was to model the vertical distribution on thematic maps using the Kriging technique in the parade of the Virgin of Candelaria in Puno and the parade of the Juliaca carnival in Peru. The measurements were made using the road and grid methods, with four indicators (L_{min} , L_{max} , L_{Apk} and L_{Aeq}). Twenty-eight samples were used with a total of 112 monitoring points, which were modeled by height at a ratio of every 5 meters. The values at the 5, 20, 50 and 100 meter elevations were mathematically calculated to see the altimetric behavior of the $dB(A)$, as a control to use the data with the sound level meter at these altitudes, which are georeferenced in 19 L UTM WGS 84, for which he used a CASELLA CEL 6X0 Sound Level Meter. In both cities it was obtained that the noise is attenuated when the altitude increases, being the values for the altitudes +5 m and +20 m, in both cases above the permissible values of L_{Aeq} , according to the Supreme Decree N° 085-2003-PCM (minimum 50 dB and maximum 60 dB). No statistically significant differences in the noise levels were evident for both cities with 95% confidence in each of the measured indicators.

Introducción

El diccionario de la real academia española define al sonido como: “sensación producida en el órgano del oído por el movimiento vibratorio de los cuerpos, transmitido por un medio elástico, como el aire”. El estudio del sonido está relacionado con la acústica, la cual se define como “el área de la Física que se ocupa del estudio de las ondas de presión, responsables de los sonidos y adquiere importancia en la medida en que la percepción de estos constituye, junto

con las imágenes, la principal forma de relación del ser humano con el entorno” [1]. El sonido se mide en decibelios (dB), que son definidos como “la unidad utilizada para expresar la magnitud de una modificación en una señal o nivel sonoro” [2].

Cuando el sonido se difunde de forma inarticulada, se produce lo que se conoce como ruido, el cual puede generar la denominada contaminación por ruido, lo que se ha convertido en un problema de continua prioridad en las principales ciudades del mundo, por lo que se dedican esfuerzos importantes para controlarlo [3]. El ruido ambiental es un problema mundial, sin embargo, la forma en que el problema es tomado en consideración varía dependiendo del país y de su cultura, economía y política [4]. Este problema persiste, incluso en áreas donde se han realizado esfuerzos importantes y se han utilizado numerosos recursos para regular, evaluar y amortiguar fuentes de ruido o para la construcción de barreras de ruido.

El ruido como fuente de contaminación tiene efectos sobre la salud, las cuales comprenden desde molestar asociado a intranquilidad, inquietud, desasosiego, depresión, desamparo, ansiedad o rabia, llegándose a tener que niveles de sonido muy elevados pueden causar pérdida de la capacidad auditiva [5]. Por lo anterior, se han realizado diversas investigaciones donde se han medido los niveles de ruido en diferentes partes del mundo, como la realizada en el Campus de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Perú [6]; así mismo se midieron los niveles de ruido ambiental en la ciudad de Santiago de Chile [7]. También estudiaron el efecto de ruido en una biblioteca universitaria en México [8]. En la ciudad de Madrid, España también se reporta la evaluación del ruido ambiental urbano [9].

Las técnicas de predicción geoestadísticas se han venido utilizando para la estimación de los valores de un parámetro en puntos específicos conociendo su valor en puntos cercanos. La fortaleza de la geoestadística es la interpolación kriging, la cual es una técnica considerada muy robusta por estar basada en una función continua que explica el comportamiento de la variable en las distintas direcciones del espacio, que permite asociar la variabilidad del estimado o grado de incertidumbre [10]. En estudios acústicos, la técnica de estimación kriging también ha sido utilizada por otros investigadores como, los mapas de ruido realizados en la ciudad de Cuenca, Ecuador [11]; así como también se analizó el uso de la interpolación kriging en la generación de mapas de ruido en un distrito de París, Francia [12].

Con base en lo anterior y en función de la importancia de la problemática, se evaluó el uso de la técnica kriging para estimar los niveles de ruido ambiental en el plano vertical en las ciudades de Puno y Juliaca en Perú, durante las festividades culturales propias de la región, con la finalidad de establecer sus posibles efectos en la población y saber cómo se comporta el ruido en diferentes niveles de altura, lo que puede servir como base para investigaciones de prevención en las fechas de dichas actividades culturales.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en inmediaciones céntricas de la ciudad de Puno y Juliaca, ubicadas en la coordenada cartográfica UTM WGS 84 zona 19 S. La ciudad de Puno está ubicada entre las coordenadas geográficas 15°50'15" Latitud Sur y 70°01'18" Longitud Oeste a una altura de 3819 m s. n. m. y la ciudad de Juliaca se encuentra ubicada entre las coordenadas geográficas es de 15°29'24" de Latitud Sur y 70°08'00" de Longitud Oeste del Meridiano de Greenwich a una altura de 3824 m s. n. m.

La población de estudio, está representada por las tramas urbanas donde se desarrollan festividades culturales más importantes de la región Puno, la festividad Virgen de la Candelaria y el carnaval de Juliaca, donde interaccionan las variables espaciales coordenadas (X, Y, Z), y los decibelios (dB). El área de influencia de los efectos ambientales sonoros producto

de actividades culturales en la parada de la festividad Virgen de la Candelaria determina el espacio físico del trabajo de investigación, que tiene un área de 13 811 854,67 m². El área de influencia de la parada del carnaval de Juliaca, tiene un área de 23 811 954,6668 m². Para la muestra se usó la metodología de la rejilla [13], para establecer la muestra en una grilla de 100 x 100 metros, las zonas públicas donde se desarrollaron actividades por la festividad Virgen de la Candelaria de Puno y el carnaval de Juliaca, para establecer los puntos de muestreo se usó el método de viales [14], metodología que consiste en identificar las vías que van a ser ocupadas por actividades ya sean de tráfico o alguna distinta asumiendo que las jerarquías de ruidos serán las mismas. Las muestra se obtuvieron de las vías que conformaban el recorrido de los conjuntos y comparsas musicales en la festividad de la virgen de candelaria Puno y el carnaval de Juliaca, con un tamaño muestral 112 puntos por ciudad con un nivel de confianza de 90% y un error de estimación de 10% máximo.

Para el modelamiento se realizó a través de la geoestadística, midiendo los niveles de ruido por cada 5 metros, en los que se calcularon matemáticamente los valores en las cotas 5, 20, 50 y 100 metros para ver el comportamiento altimétrico del ruido en dB. Los puntos de monitoreo se georreferenciaron en un sistema de información geográfica para mapear los resultados de la investigación en el seccionamiento de los recorridos de las paradas. A partir de los resultados se establecieron los siguientes pasos, análisis exploratorio de datos mediante histograma de frecuencia, para calcular el coeficiente de variación, la ubicación espacial de muestra a través del análisis de tendencia para la obtención del orden de las ecuaciones y se generó un mapa de Voronoi. El análisis estructural de datos, se comparó con los modelos de kriging.

Las mediciones fueron realizadas con un sonómetro CASELLA CEL 6X0 y las estaciones de medición se muestran en los cuadros 1 y 2.

Cuadro 1. Estaciones de monitoreo parada Virgen de la Candelaria.

Estación	Coordenadas UTM 19S Datum		Estación	Coordenadas UTM 19S Datum	
	WGS 84			WGS 84	
1	391034.9	8248199.7	15	390600.2	8249317.1
2	391030.4	8248300.1	16	390499.5	8249290.7
3	391024.6	8248399.4	17	390400.2	8249267.7
4	391022.3	8248499.3	18	390300.4	8249243.2
5	391043.9	8248600.0	19	390200.6	8249221.1
6	391018.0	8248699.3	20	390100.4	8249199.6
7	391013.7	8248799.0	21	390000.2	8249180.4
8	391009.3	8248899.3	22	390002.6	8249099.3
9	391000.7	8248999.5	23	390043.8	8248999.5
10	390968.6	8249098.8	24	390085.5	8248898.8
11	390932.1	8249199.1	25	390100.4	8248799.0
12	390895.2	8249298.8	26	390000.2	8248783.7
13	390800.2	8249362.6	27	389900.4	8248763.5
14	390700.0	8249339.1	28	389899.4	8248699.3

Cuadro 2. Estaciones de monitoreo parada carnaval de Juliaca.

Estación	Coordenadas UTM 19S Datum		Estación	Coordenadas UTM 19S Datum	
	WGS 84			WGS 84	
1	379322.27	8284793.15	15	390600.20	8249317.06
2	379293.90	8284863.36	16	390499.47	8249290.68
3	379262.50	8284939.20	17	390400.18	8249267.66
4	379233.35	8285016.71	18	390300.41	8249243.19
5	379204.11	8285089.68	19	390200.64	8249221.13
6	379176.28	8285160.12	20	390100.40	8249199.55
7	379145.94	8285238.62	21	390000.15	8249180.36
8	379116.90	8285313.69	22	390002.55	8249099.30
9	379085.71	8285390.64	23	390043.80	8248999.53
10	379058.62	8285463.18	24	390085.53	8248898.80
11	379026.04	8285537.24	25	390100.40	8248799.04
12	378989.57	8285618.81	26	390000.15	8248783.69
13	378960.53	8285695.43	27	389900.38	8248763.54
14	378936.19	8285774.51	28	389899.42	8248699.27

Para el comportamiento vertical del sonido en dB se consideró que las fuentes de emisión son adireccionales y puntuales en cada muestra, y se utilizó para el cálculo la siguiente ecuación [15]:

$$L = Lw - 20 \log d - 11 \quad (1)$$

Dónde: L representa la intensidad sonora a la altura del cálculo, Lw representa el nivel de potencia de la fuente sonora puntual inicial (LAeq monitoreo en dB), d es la distancia constante (cota +5, +20, +50 y +100).

Para los cálculos estadísticos se utilizó el *software* IBM SPSS 22 y para la geoestadística método kriging para la predicción de la zonificación de ruidos con el *software* ArcGIS 10.3.

Resultados y discusión

En el cuadro 3 se muestran los resultados obtenidos al aplicar la ecuación 1 para determinar la distribución vertical del sonido en la festividad Virgen de la Candelaria de la ciudad de Puno. Se observa en el cuadro 3, el cálculo del comportamiento vertical del sonido con fuente de emisión puntual en Puno del LAeq, para la cota +5 m, con un comportamiento de la media de 68.68 ± 1.04 dB, en el caso cota +20 m, el valor medio es de 56.64 ± 1.04 dB. Ambos valores anteriores mostrados, sobrepasan los límites mínimos y máximos permisibles, los cuales se ubican en un rango entre 50 y 60 dB [16].

Cuadro 3. Comportamiento LAeq vertical dB puntual parada Virgen de la Candelaria en Puno.

Punto	Cota	dB(A)	+ 5 m	+ 20 m	+ 50 m	+ 100 m
1	3810.0	76.7	51.7	39.7	31.7	25.7
2	3810.1	81.4	56.4	44.4	36.4	30.4
3	3810.2	96.1	71.1	59.1	51.1	45.1
4	3810.3	97.3	72.3	60.3	52.3	46.3
5	3810.4	99.2	74.2	62.2	54.2	48.2
6	3810.5	99.8	74.8	62.8	54.8	48.8
7	3810.6	97.2	72.2	60.2	52.2	46.2
8	3810.7	94.9	69.9	57.9	49.9	43.9
9	3810.8	94.8	69.8	57.8	49.8	43.8
10	3810.9	94.0	69.0	57.0	49.0	43.0
11	3810.9	91.7	66.7	54.7	46.7	40.7
12	3810.9	84.9	59.9	47.9	39.9	33.9
13	3810.9	99.2	74.2	62.2	54.2	48.2
14	3811.0	92.0	67.0	55.0	47.0	41.0
15	3811.1	97.7	72.7	60.7	52.7	46.7
16	3811.2	96.7	71.7	59.7	51.7	45.7
17	3811.3	96.9	71.9	59.9	51.9	45.9
18	3811.4	90.7	65.7	53.7	45.7	39.7
19	3811.5	98.8	73.8	61.8	53.8	47.8
20	3811.6	92.3	67.3	55.3	47.3	41.3
21	3811.7	97.5	72.5	60.5	52.5	46.5
22	3812.0	91.4	66.4	54.4	46.4	40.4
23	3812.1	95.9	70.9	58.9	50.9	44.9
24	3812.2	97.2	72.2	60.2	52.2	46.2
25	3812.3	95.3	70.3	58.3	50.3	44.3
26	3812.4	86.1	61.1	49.1	41.1	35.1
27	3812.5	93.8	68.8	56.8	48.8	42.8
28	3812.6	93.2	68.2	56.2	48.2	42.2

En el caso de las cotas +50 m +100 m, el valor de las medias es de 48.68 ± 1.05 dB y 42.66 ± 1.05 dB respectivamente, los cuales se encuentran por debajo del límite inferior permisible, esto, es debido a que las alturas promedio de las edificaciones es de 20 metros de altura impidiendo que el ruido se disperse a menor altitud manteniendo los niveles de contaminación acústica por encima al límite máximo permisible. Lo anterior coincide con la misma tendencia reportada, al evaluar el ruido vertical en una zona urbana de Cuiabá, Várzea Grande / MT, Brasil [17].

En el cuadro 4, se muestran los resultados obtenidos al aplicar la ecuación 1 a los datos obtenidos en la parada carnaval de Juliaca en cada una de los puntos verticales.

La tendencia de los resultados mostrados en el cuadro 4, sigue el mismo comportamiento que el observado en los resultados mostrados en cuadro 3. El análisis estadístico de los resultados obtenidos mostró que las medias de los valores son estadísticamente iguales entre los dos lugares evaluados en cada uno de los puntos verticales con un nivel de confianza de 95% (p -valor = 0.133).

Cuadro 4. Comportamiento LAeq vertical dB puntual parada carnaval de Juliaca.

Punto	Cota	dB(A)	+ 5 m	+ 20 m	+ 50 m	+ 100 m
1	3821.0	87.2	62.2	50.2	42.2	36.2
2	3821.1	84.3	59.3	47.3	39.3	33.3
3	3821.2	77.7	52.7	40.7	32.7	26.7
4	3821.3	87.3	62.3	50.3	42.3	36.3
5	3821.3	91.8	66.8	54.8	46.8	40.8
6	3821.3	91.6	66.6	54.6	46.6	40.6
7	3821.3	97.4	72.4	60.4	52.4	46.4
8	3821.4	87.1	62.1	50.1	42.1	36.1
9	3821.4	97.9	72.9	60.9	52.9	46.9
10	3821.4	91.8	66.8	54.8	46.8	40.8
11	3821.5	80.6	55.6	43.6	35.6	29.6
12	3821.5	93.8	68.8	56.8	48.8	42.8
13	3821.5	79.3	54.3	42.3	34.3	28.3
14	3821.6	85.8	60.8	48.8	40.8	34.8
15	3821.6	87.2	62.2	50.2	42.2	36.2
16	3821.7	89.3	64.3	52.3	44.3	38.3
17	3821.7	93.1	68.1	56.1	48.1	42.1
18	3821.7	89.9	64.9	52.9	44.9	38.9
19	3821.8	103.1	78.1	66.1	58.1	52.1
20	3821.8	89.7	64.7	52.7	44.7	38.7
21	3821.8	94.2	69.2	57.2	49.2	43.2
22	3821.8	98.0	73.0	61.0	53.0	47.0
23	3821.9	95.0	70.0	58.0	50.0	44.0
24	3821.9	98.1	73.1	61.1	53.1	47.1
25	3821.9	90.8	65.8	53.8	45.8	39.8
26	3822.0	88.3	63.3	51.3	43.3	37.3
27	3822.0	100.6	75.6	63.6	55.6	49.6
28	3822.0	81.5	56.5	44.5	36.5	30.5

De acuerdo a las estimaciones realizadas para la ciudad de Juliaca, con valores promedios de sonido de 65.46 ± 1.21 dB para la cota +5 m, 53.42 ± 1.21 dB en el caso de la cota +20 m, 45.46 ± 1.21 dB en la cota +50 m y finalmente 39.44 ± 1.21 dB para la cota +100 m. Igualmente se comprobó la concordancia con lo mostrado al evaluar el ruido vertical en una zona urbana de Cuiabá, Várzea Grande / MT, Brasil [17]. También se destacó la fuerte dependencia del sonido respecto a la distancia medida desde el punto donde se genera, para la ciudad de Madrid, España, observación que coincide con lo observado [9]. La investigación desarrollada en una zona residencial de Santiago de Chile se reportó un valor de ruido vertical promedio de 57.5 dB [7], valor que aunque sobrepasa el límite mínimo establecido [16], es inferior al medido a menor altura en la presente investigación, lo que se debe a que la presencia de gran cantidad de personas en las actividades culturales, genera un aumento en los niveles del sonido, por lo que los resultados se consideran consistentes. El comportamiento gráfico de los resultados se muestra en la figura 1.

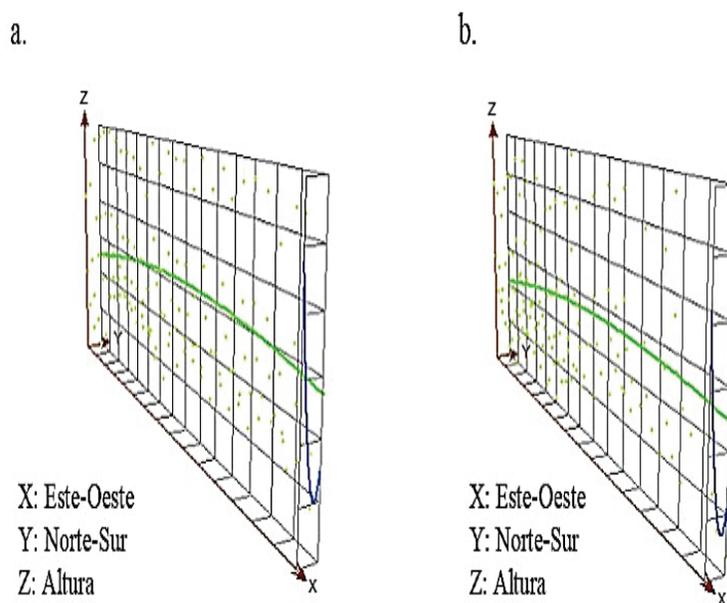


Figura 1. Tendencia LAeq vertical. (a) Caso estudio parada Virgen de la Candelaria Puno. (b) parada carnaval Juliaca.

En la figura 1, se observa que las tendencias verticales del LAeq para ambas localidades, de norte a sur (línea azul) y de este a oeste (línea verde), forma una curva usando una ecuación de segundo orden.

En la figura 2, se observa el resultado del mapeo vertical del sonido en la parada Virgen de la Candelaria en Puno, destacándose 10 zonas verticales en base a los niveles de sonido calculados mediante la técnica kriging.

El 30% muestran contaminación en el mapa de ruidos vertical se encuentran entre un mínimo de 25.7 dB y el máximo 99.8 dB de las muestras de LAeq vertical Candelaria el error mínimo fue de 1.1% y el máximo de 3.36%, el nivel de confiabilidad del mapa fue de 96.64%. El comportamiento vertical del ruido en la Av. Costanera, Jr. Lampa y Av. La torre a una altura de 20 metros presenta valores superiores el límite máximo de 60 dB, sin embargo, a partir de los 30 metros el valor disminuye a 53.15 dB, que se encuentra entre los límites permisibles [16].

En el caso del mapeo kriging para la parada carnaval de Juliaca, se observa en la figura 3, que existen 10 zonas verticales diferenciadas, lo cual coincide con lo observado en la otra localidad.

En el caso de la figura 3, el comportamiento vertical del ruido en la Av. 4 de noviembre, Jr M. Nuñez, Jr Libertad, Jr Cusco y Jr. Junin, presentan contaminación acústica a una altura de 22 metros sin embargo a los 30 metros se estimó un valor de 52.90 dB, que se encuentra entre los límites permisibles [16], teniéndose una confiabilidad del 95.39% en la estimación.

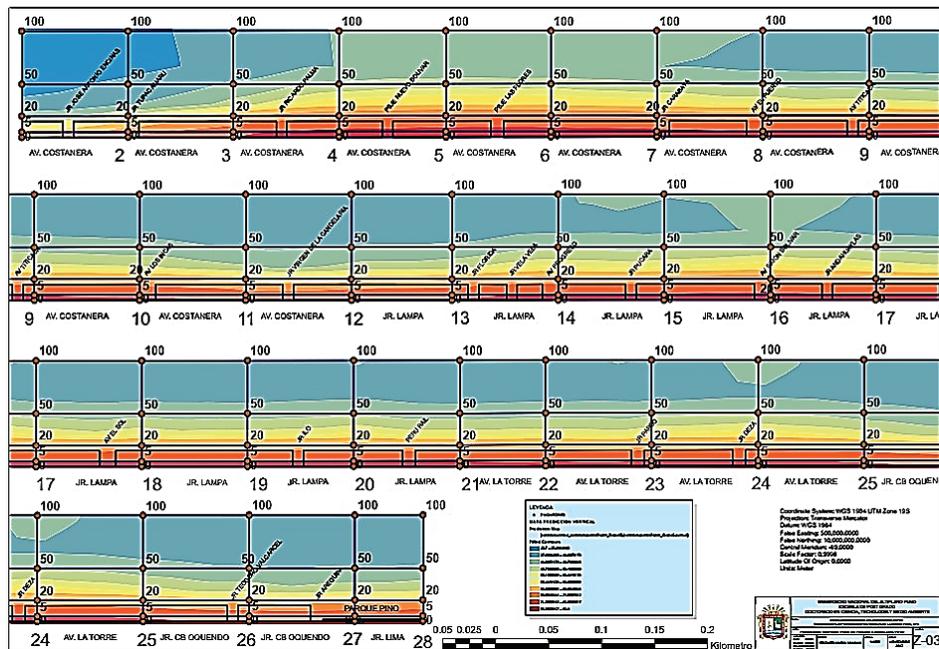


Figura 2. Predicción vertical para dB en parada de Virgen de la Candelaria en Puno.

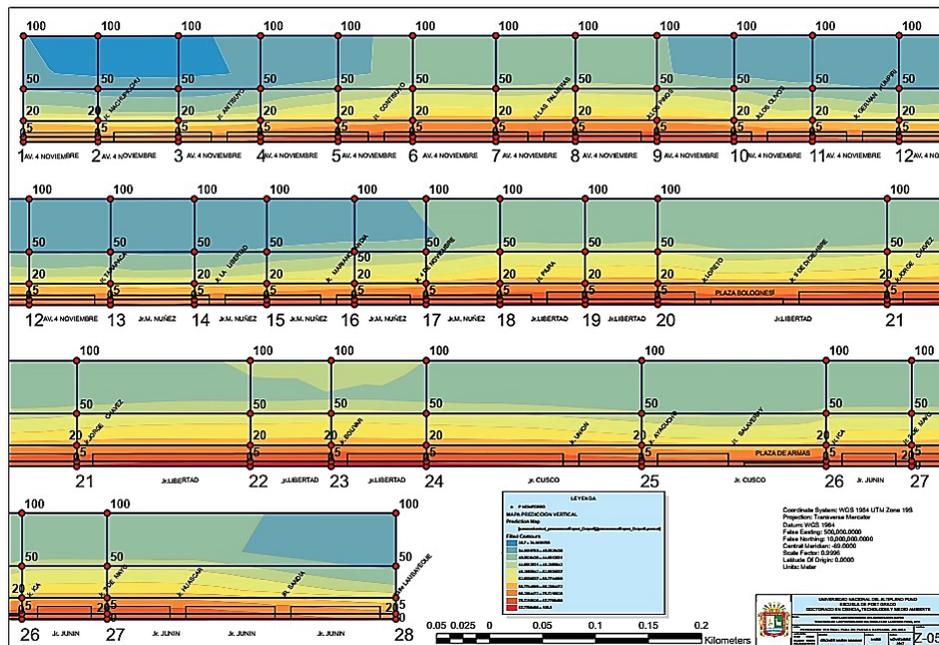


Figura 3. Predicción vertical para dB en parada carnaval en Juliaca.

En ciudades pequeñas como las estudiadas, se han medido niveles de ruido superiores a 85 dB, por lo que hay muchas personas que pueden ser afectados y sufren efectos sobre la salud, como perturbaciones del sueño [18]. Así mismo, se ha observado que, en los espacios públicos, dejando de lado el tráfico, la fuente de ruido principal es la gente gritando en la calle, pero no es la única razón del ruido [19], lo que es consistente con lo observado, ya que la gente que participa en las festividades culturales en las localidades estudiadas fueron la fuente principal del ruido, llegando a los niveles medidos a alturas cercanas al suelo.

Los resultados también son consistentes con otros estudios realizados, en donde los autores indican que la geoestadística es una técnica reforzada que cuenta con factores como número y distribución ordenada de muestras que representan grado de contaminación con resultados satisfactorios, el método de interpolación kriging para mapas con cambio de plano x , y a x , z ó y , z muestra resultados densos de estimaciones para entender la fluctuación e intensidad de puntos proyectados a ciertas alturas [20], [21]. Se considera que, en los modelos verticales para la ionosfera, el kriging y métodos de redes neuronales (modelos matemáticos) son las herramientas más adecuadas para modelado vertical [22], sin embargo, también se ha reportado, que las medidas de incertidumbre (predicción de mapas en z) que muestran de tamaño de un bloque ordenado de una variable no es un buen indicador de la incertidumbre de la información [23]. Otras investigaciones, dan a conocer que los datos de GPS y datos del SIG para generación de mapas de ruido de tráfico vehicular son optimizados mediante algoritmos kriging, demostrando precisión y eficacia en tiempo real [24], [25].

El uso de la técnica de interpolación kriging, presenta como fortaleza, que con ella se puede tener conocimiento del comportamiento de la variable en el espacio [10], [26], por lo que permite la posibilidad de realizar simulaciones probabilísticas, representando el resultado del kriging como la probabilidad de que la variable alcance un determinado valor, lo que les da validez estadística a los resultados obtenidos en el presente estudio. Por otro lado, también se considera que la efectividad del kriging como método de predicción está sujeta a la cantidad de puntos de medición que se obtengan, a mayor densidad de puntos, mayor es la confiabilidad de la predicción [12].

En relación al estudio realizado, se cuenta con escasos antecedentes en relación a mapas verticales de ruido, sin embargo, la metodología aplicada sienta las bases para posibles investigaciones que se orienten a la generación de mapas de ruido que contribuyan a minimizar el impacto del ruido producto de eventos culturales, para que los mismos puedan ser disfrutados por las personas sin riesgo. También puede ser importante para la ubicación y direccionamiento de las rutas de movilización en las festividades por zonas donde las edificaciones no amplifiquen el sonido generado.

Conclusiones

1. El modelamiento kriging para la elaboración de mapas temáticos verticales mostraron flexibilidad, lográndose un nivel de confiabilidad mayor al 95% en todas las estaciones monitoreadas tanto en Puno como Juliaca, obteniéndose niveles de sonido que superan los rangos permisibles (50 - 60 dB), que se extienden hasta una altura de 20 metros aproximadamente que equivale a un edificio de 7 pisos.
2. Los niveles de contaminación sónica puntual reducen su intensidad en tramos mayores a la cota +20 m, +50 m y +100 m de altitud. El efecto que tienen los pavimentos y las viviendas hacen que la intensidad se mantenga a alturas menores de 20 metros, lo que lleva a que en Puno y Juliaca la contaminación alcanza estándares normales para el LAeq a los 30 metros de altura con un aproximado de 53.15 dB y 52.90 dB respectivamente, salvo el caso donde las edificaciones son de 3 pisos, la contaminación se mantiene a 10 metros, en el caso de las plazas esta se disminuye por la amplitud de su espacio público, en las intersecciones de las calles el ruido se bifurca perdiendo fuerza por las colindancias, convirtiendo a las zonas de edificación con altura considerable zonas críticas de contaminación.

Referencias

- [1] J.M. Merino y L. Muñoz-Repiso, "La percepción acústica: Física de la audición." *Revista de Ciencias*, vol. 2, pp. 19-26, 2013.
- [2] E.J. Menso, "El decibel: características y aplicaciones." *Revista Telegráfica electrónica Argentina*, vol. 81, no. 939, pp. 34-39, 1993.
- [3] C.O. Olague-Caballero, G. Wenglas-Lara y J.G. Duarte-Rodríguez. "Contaminación por ruido en carreteras de acceso a la ciudad de Chihuahua." *CienciaUAT*, vol. 11, no. 1, pp. 101-115, 2016.
- [4] Brüel & Kjær (2000). Ruido ambiental. [On line]. Disponible en: <https://www.bksv.com/media/doc/br1630.pdf>
- [5] J.R. Chávez. "Ruido: Efectos Sobre la Salud y Criterio de su Evaluación al Interior de Recintos." *Ciencia y Trabajo*, vol. 8, no. 20, pp. 42-46, 2006.
- [6] R. Salas y E. Barboza. "Evaluación del ruido ambiental en el Campus de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Perú." *Revista Indes*, vol. 2, no. 1, pp. 88-9, 2016.
- [7] L. Platzer, R. Iñiguez, J. Cevo y F. Ayala. "Medición de los niveles de ruido ambiental en la ciudad de Santiago de Chile." *Revista de otorrinolaringología y cirugía de cabeza y cuello*, vol. 67, pp. 122-128, 2007.
- [8] F. Moreno, M.G. Orozco y M.D.R. Zumaya. "Los niveles de ruido en una biblioteca universitaria, bases para su análisis y discusión." *Investigación bibliotecológica*, vol. 29, no. 66, pp. 197-224, 2005.
- [9] A.M. Moreno y P. Martínez. "El ruido ambiental urbano en Madrid. Caracterización y evaluación cuantitativa de la población potencialmente afectable." *Boletín de la Asociación Española de Geografía*, vol. 40, pp. 153-179, 2005.
- [10] A. Gallardo. "Geoestadística." *Ecosistemas*, vol. 15, no. 3, pp. 1-11, 2006.
- [11] D.O. Martínez, D.O. "Elaboración del mapa de ruido del área urbana de la Ciudad de Cuenca – Ecuador, empleando la técnica de interpolación geoestadística Kriging ordinario." *Revista Ciencias Espaciales*, vol. 8, no. 1, pp. 411-440, 2015.
- [12] P. Aumond, A. Can, V. Mallet, B. De Coensel, C. Ribeiro, D. Botteldooren and C. Lavandier. "Kriging-based spatial interpolation from measurements for sound level mapping in urban areas." *Journal of the Acoustical Society of America*, *Acoustical Society of America*, vol. 143, no. 5, pp. 2847-2857, 2018.
- [13] M. Ausejo. "Estudio de la validación, errores e incertidumbre en la elaboración de mapas de ruido." Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2009.
- [14] J. Romeu, S. Jiménez, M. Genescà, T. Pàmies and R. Capdevila. "Spatial sampling for night levels estimation in urban environments." *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 120, no. 2, pp. 791-800, 2006.
- [15] R. Estellés. "Acústica arquitectónica definiciones, formulas y tablas." Montevideo: Universidad de la República.
- [16] Decreto Supremo N° 085-2003-PCM. (30 de octubre 2003). Reglamento de estándares nacionales de calidad ambiental para ruido. [On line]. Disponible en: <http://www.minam.gob.pe/>
- [17] A.E. Bento, L. Cleonice, J. Correia y I.J. Apolônio. "Predicción del ruido urbano debido a la implementación del Sistema de Tren Eléctrico Urbano (VLT) por medio de simulación computacional." *INTERAÇÕES, Campo Grande, MS*, vol. 18, no. 4, pp. 81-97, 2017.
- [18] M.J. Ballesteros, M.D. Fernández and J.A. Ballesteros. "Acoustic evaluation of leisure events in two mediterranean cities." *Applied Acoustics*, vol. 89, pp. 288-296, 2015.
- [19] M.J. Ballesteros, M.D. Fernández, I. Flindell, A.J. Torija and J.A. Ballesteros. "Estimating leisure noise in Spanish cities." *Applied Acoustics*, vol. 86, pp. 17-24, 2014.
- [20] Y. Yang, J. Wu and G. Christakos. "Prediction of soil heavy metal distribution using Spatiotemporal Kriging with trend model." *Ecological Indicators*, vol. 56, pp. 125-133, 2015.
- [21] S.H. Monger, E.R. Morgan, A.R. Dyreson and T.L. Acker. "Applying the kriging method to predicting irradiance variability at a potential PV power plant." *Renewable Energy*, vol. 86, pp. 602-610, 2016.
- [22] C. Jiang, C. Zhou, J. Liu, T. Lan, G. Yang, Z. Zhao, P. Zhu, H. Sun and X. Cui. "Comparison of the Kriging and neural network methods for modeling foF2 maps over North China region." *Advances in Space Research*, vol. 6, pp. 38-46, 2015.
- [23] M. Lark. "Block correlation and the spatial resolution of soil property maps made by kriging." *Geoderma*, vol. 260, pp. 233-242, 2015.

- [24] X. Peng, K. Wang and Q. Li. "A new power mapping method based on ordinary kriging and determination of optimal detector location strategy." *Annals of Nuclear Energy*, vol. 68, pp. 118-123, 2014.
- [25] M. Cai, J. Zou, J. Xie and X. Ma. "Road traffic noise mapping in Guangzhou using GIS and GPS." *Applied Acoustics*, vol. 87, 94-102, 2015.
- [26] P. Afzal, N. Madani, S. Shahbeik and A.B. Yasrebi. "Multi-Gaussian kriging: a practice to enhance delineation of mineralized zones by Concentration–Volume fractal model in Dardevey iron ore deposit, SE Iran." *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 158, pp. 10-21, 2015.

Primera parte: Almacenamiento insaturado de agua en un perfil de suelo

First part: Storage unsaturated water in a soil profile

Adrián Enrique Chavarría-Vidal¹

Fecha de recepción: 20 de abril de 2020
Fecha de aprobación: 18 de agosto de 2020

Chavarría-Vidal, A.E. Primera parte: Almacenamiento insaturado de agua en un perfil de suelo. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-3, Julio-Setiembre 2021. Pág 15-33.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5009>



¹ M.Sc. Profesor Escuela Ingeniería Agrícola, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: adchavarría@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-1647-8212>

Palabras clave

Almacenamiento del agua en el suelo; recurso hídrico; suelo insaturado; humedad del suelo para las plantas.

Resumen

Un fundamento para la correcta y eficiente aplicación y uso del recurso hídrico en los sistemas de producción agrícola es conocer el estado de humedad en que se encuentra el suelo ya que la cantidad a aplicar debe ser la misma que la cantidad consumida en el sistema suelo - planta por medio de la evapotranspiración. Este estado de humedad se debe de estimar lo mayor cercano posible a la realidad y para ello se debe de tomar el perfil del suelo a una profundidad a la cual se adapte lo mejor posible al o a los cultivos presentes. Normalmente la profundidad adecuada se refiere a la profundidad de raíces de las plantas y la forma de estimación se puede dar de varias maneras y una de ellas es por medio de la humedad volumétrica la cual, se puede estimar de manera directa como indirecta (como ejemplo podemos mencionar sensores calibrados). No obstante, con la información obtenida del campo se debe de realizar la estimación total respectiva que va a depender de la metodología utilizada respecto a la profundidad definida, el número de muestreos y la distancia entre los muestreos, los cuales; estos últimos se recomienda que sean de la misma longitud.

Por ello el objetivo fundamental de este artículo es presentar diferentes opciones de manejo de la información obtenida de campo para estimar los contenidos hídricos insaturados en un perfil del suelo, compararlos en sus estimaciones para la toma de mejores decisiones.

Keywords

Water storage in the ground; hidric resource; unsaturated soil; soil moisture for plants.

Abstract

A foundation for the correct and efficient application and use of the water resource in agricultural production systems is to know the state of humidity in which the soil is found since the amount to be applied must be the same as the amount consumed in the soil system - plant through evapotranspiration. This state of humidity must be estimated as close as possible to reality and for this, the soil profile should be taken at a depth to which it adapts best to the crop (s) present. Normally the appropriate depth refers to the depth of the roots of the plants and the form of estimation can be given in several ways and one of them is by means of the volumetric humidity which, can be estimated directly as indirectly (as an example we can mention calibrated sensors). However, with the information obtained from the field, the respective total estimate must be made and will depend on the methodology used with respect to the defined depth, the number of samples and the distance between the samples, which; The latter are recommended to be the same length. Therefore, the main objective of this article is to present different options for managing the information obtained from the field to estimate unsaturated water contents in a soil profile, compare them in their estimates for better decision making.

Introducción

La estimación del almacenamiento del agua en el suelo está revestido de alta importancia para la planeación y gestión del recurso hídrico orientado al riego de los cultivos de ahí la urgencia de masificar la cultura del buen aprovechamiento del agua con el objetivo de asegurar el suministro alimentario y para ello se recomienda la utilización de cultivos de enraizamiento profundo que resisten más a la sequías [1].

El suelo es el depósito de almacenamiento de agua, aire y nutrientes desde donde las plantas los extraen. La capacidad de almacenamiento y la disponibilidad para las plantas depende de las cantidades existentes y de las características de cada suelo. Por lo tanto es necesario conocer cómo están constituidos los suelos y las fuerzas que actúan en la retención y movimiento del agua [2].

El suelo juega un rol importante en el manejo del agua de riego, ya que es el “macetero natural” que tienen las raíces para absorber el agua de riego o lluvia efectiva. La cantidad de agua que puede retener un suelo depende de sus propiedades físicas, dada por la textura, estructura, contenido de materia orgánica (MO), profundidad, entre otras. La textura se encuentra representada por el porcentaje de arena, limo y arcilla. Un suelo presenta una buena textura cuando los porcentajes de estos elementos (arena, limo y arcilla) en su conjunto le entregan a la planta un soporte para un buen desarrollo radicular y un adecuado nivel nutricional [3].

El agua que precipita en forma de lluvia puede quedar depositada en la superficie vegetal, alcanzar la superficie del suelo e infiltrarse o alcanzar la superficie del suelo y escurrir o infiltrar. El volumen de agua almacenado disponible para las plantas es aquel que, a pesar de estar en movimiento permanece en la zona radical del cultivo el tiempo suficiente para ser absorbido por las plantas. En este aspecto, los microporos del suelo cumplen una función importante, al mantener el agua por más tiempo disponible para las plantas [4].

El almacenamiento del agua en el suelo insaturado se encuentra en función de la profundidad a la que se quiere conocer dicho almacenamiento y para su cálculo se conocen dos reglas que son la regla del Trapecio o Trapezoidal y la regla de Simpson [5] [6] [7]. Para calcular la cantidad de agua almacenada en el perfil del suelo se debe de integrar las medidas de los contenidos de agua desde la superficie hasta la profundidad deseada la cual está representada por la profundidad de raíces del cultivo [8], fundamentalmente por aquella profundidad de raíces efectiva en la absorción de agua conjuntamente con los nutrientes diluidos; por lo que se presentan errores en las determinaciones de la humedad del suelo y al método de integración [9] [10].

Aspectos metodológicos

Las ecuaciones de la 1 a la 4 que se verán demostradas más adelante en el documento fueron tomadas del libro Apuntes de clases de Relación Suelo Agua Planta como fundamento y las otras ecuaciones de almacenamiento del agua en el suelo fueron desarrolladas respectivamente. No obstante, se desarrollan ejemplos para realizar las respectivas comparaciones de exactitud y precisión.

Desarrollo

Para medir humedad del suelo existen diferentes maneras tanto directas como indirectas y una de ellas es mediante el concepto expresado en las siguientes ecuaciones 1 y 2 [11]:

ec. 1:

$$h(mm) = \frac{\% \theta v}{100} * P_s$$

o ec. 2:

$$h(mm) = \theta v * P_s$$

donde

$\% \theta v$: porcentaje de humedad volumétrica en el suelo

θv : humedad volumétrica en el suelo en proporción con base a la unidad

P_s : profundidad del suelo o grosor de un segmento del perfil del suelo (mm)

h : cantidad de agua existente en un estrato de suelo a una profundidad del perfil del suelo expresado en lámina de agua (mm). La h puede presentarse en “ mm ” o en “ cm ” pero se recomienda mayormente expresarlo en las unidades de “ mm ”.

Para expresar dicha humedad en metros cúbicos “ m^3 ” por cada hectárea (ha) se puede utilizar la siguiente ecuación 3 y 4:

ec 3:

$$V(m^3/ha) = h(mm) * 10 = \left(\frac{\% \theta v}{100} * P_s \right) * 10$$

ec. 4:

$$V(m^3/ha) = h(mm) * 10 = \theta v * P_s * 10$$

donde

V : cantidad de agua existente en un estrato de suelo con un grosor dado a una profundidad del perfil del suelo expresado en un volumen de agua por área (m^3/ha).

$\% \theta v = \% \theta$: porcentaje de humedad volumétrica en el suelo

$\theta v = \theta$: humedad volumétrica en el suelo en proporción con base a la unidad

P_s : profundidad del suelo o de un segmento del suelo (mm)

Debido a que en el suelo se presentan diferentes cantidades o variaciones en el contenido de humedad con respecto a la variación de la profundidad del mismo, se ha tomado usualmente, como una metodología aceptada para estimar dicha humedad, subdividir la profundidad en segmentos de igual longitud cada uno para mejorar el estimado de la cantidad de humedad presente en el suelo, claro está; teniendo la obligación de medir la humedad de cada segmento. Como ejemplo de ello es tomar una profundidad de suelo de un metro y subdividirla en 10 segmentos de 10 cm cada una o en su defecto, segmentos de 20 cm para un total de 5 en 1,0 m de profundidad. A menor distancia del segmento se aumenta la exactitud de la estimación cuyo objetivo es tener un mayor acercamiento a la cantidad real del almacenamiento de agua que existe en un perfil de suelo a una profundidad específica, pero aumenta también el número de segmentos y como tal, el número de muestras para medir la humedad de cada segmento.

Esta metodología presenta el inconveniente de que no toma en cuenta los diferentes horizontes presentes en el suelo lo cual, frecuentemente manifiestan diferentes texturas, estructuras, distribución, tamaño y continuidad del espacio poroso y otros.

Lo anterior provoca que esta metodología presente cierta impresión ante suelos con anisotropía textural, pero ante suelos uniformes en profundidad o con pocas variaciones esta metodología se fortalece presentando mayor exactitud y precisión por lo cual se obtienen valores más cercanos a los reales con respecto al contenido de humedad del suelo. No obstante, el error tiende a disminuir cuando la distancia de cada segmento tiende a ser menor.

Para las estimaciones con esta metodología se puede utilizar tanto la regla del trapecio como la regla de la función cuadrática. En nuestro caso utilizaremos la regla del trapecio.

Las formas para realizar la medida y la estimación en profundidad de la humedad en un perfil de suelo son las siguientes:

Metodología 1

Estimación de la humedad del suelo con contenido de agua no saturado en su perfil dividido en segmentos iguales en su profundidad (ΔZ) (no se mide la humedad superficial del suelo) y su respectiva humedad volumétrica (θv) para cada segmento, donde se comienza a medir la humedad a partir del primer medio segmento ($\Delta Z/2$) y luego se continúa la medición de la humedad en profundidad a la longitud definida del segmento (ΔZ).

Tomando en cuenta la figura 1, la fórmula para estimar el agua que se encuentra almacenada en el suelo en un momento dado se demuestra de la siguiente manera:

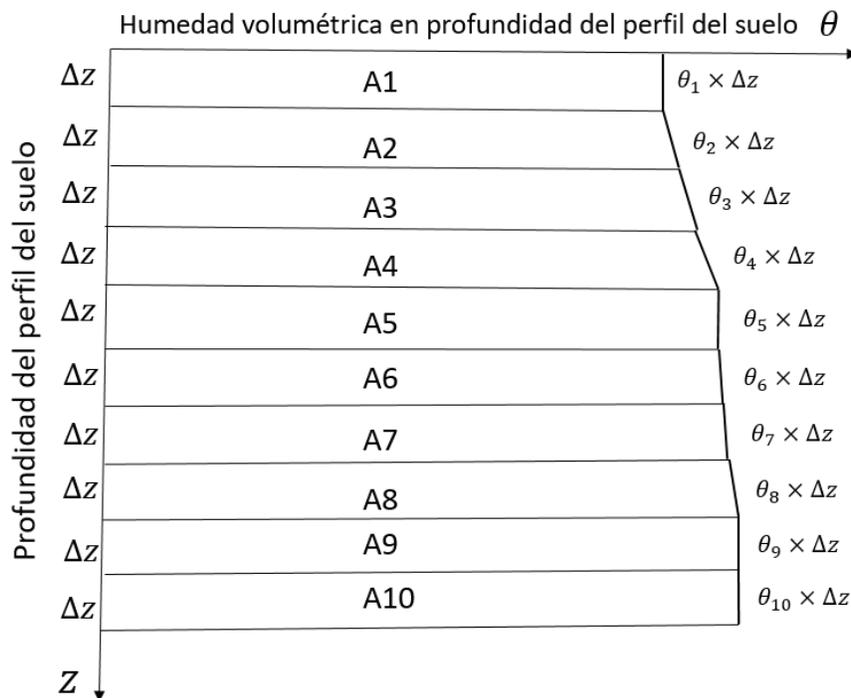


Figura 1. Estimación de humedad del suelo realizando la primera medida a partir del primer $\Delta z/2$ y luego cada Δz en profundidad

$$h(mm) = \Delta Z * \theta_1 + \Delta Z * \theta_2 + \Delta Z * \theta_3 + \Delta Z * \theta_4 + \Delta Z * \theta_5 + \Delta Z * \theta_6 + \Delta Z * \theta_7 + \Delta Z * \theta_8 + \Delta Z * \theta_9 + \Delta Z * \theta_{10}$$

$$h(mm) = \Delta Z * (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6 + \theta_7 + \theta_8 + \theta_9 + \theta_{10})$$

donde sustituyendo por se puede deducir la ecuación 5
ec. 5:

$$h(mm) = \Delta Z * \sum_{i=1}^n \theta_i$$

y para el caso en que la humedad volumétrica se encuentre en términos de porcentaje tenemos la ecuación 6:

ec. 6:

$$h(mm) = \Delta Z * \sum_{i=1}^n \frac{\% \theta_i}{100}$$

donde:

ΔZ = longitud del segmento de profundidad del suelo (*mm*)

n = número total de capas en el perfil del suelo

θ_i = humedad del suelo volumétrica dada en proporción con base a la unidad, que se presenta en cada uno de los segmentos

$\% \theta_i$ = porcentaje de humedad volumétrica del suelo que se presenta en cada uno de los segmentos

Para expresar dicha humedad en metros cúbicos por cada hectárea se puede utilizar la siguiente ecuación 7:

ec. 7:

$$h\left(\frac{m^3}{ha}\right) = \left(\Delta Z * \sum_{i=1}^n \theta_i \right) * 10$$

y para el caso en que la humedad volumétrica se encuentre en términos de porcentaje tenemos la ecuación 8:

ec. 8:

$$h\left(\frac{m^3}{ha}\right) = \left(\Delta Z * \sum_{i=1}^n \frac{\% \theta_i}{100} \right) * 10$$

Ejemplo 1: Se tiene un perfil de suelo de 1,0 m de profundidad al cual se le hicieron muestreos para medir la humedad que hay en él. Para ello se dividió el perfil en capas de 20 cm donde cada una representa cada segmento Δz en profundidad y la humedad volumétrica se midió en el centro de cada capa o segmento Δz . Para dicha medida se empezó a partir de los primeros

10 cm que representa el primer $\Delta z/2$, pero luego se continuó con las medidas de humedad cada 20 cm como se muestra en el cuadro 1. Calcular el total de la humedad retenida en el perfil del suelo según metodología 1.

Cuadro 1. Valores que describen tanto la forma de muestreo como los valores de humedad obtenidos en el suelo empezando la medida de humedad a los 10 cm de profundidad.

Profundidad de cada segmento (cm)	Profundidad de la medida de humedad en el suelo (cm)	Humedad (%HV)
0	-	-
20	10	16
40	30	19
60	50	21
80	70	27
100	90	38

Utilizando la ecuación 6

$$\Delta Z = 20 \text{ cm} = 200 \text{ mm}$$

$$0,5 * \Delta Z = 10 \text{ cm} = 100 \text{ mm}$$

$$h = \Delta Z * \sum_{i=1}^n \frac{\% \theta_i}{100}$$

$$h(mm) = \frac{200 * (16 + 19 + 21 + 27 + 38)}{100}$$

$$h(mm) = \frac{200 * (121)}{100}$$

$$h(mm) = \frac{24200}{100}$$

$$h(mm) = 242$$

Para conocer el total de agua que se encuentra en una hectárea a 1,0 m de profundidad utilizando la ecuación 3 tenemos:

$$h\left(\frac{m^3}{ha}\right) = 242 * 10$$

$$h\left(\frac{m^3}{ha}\right) = 2420$$

Como tal se puede observar que con la información de campo se estimó que a una profundidad de 1,0 m y en 1 ha se tienen 2420 m³.

Metodología 2

Estimación de la humedad del suelo con contenido de agua no saturado en su perfil dividido en segmentos iguales en su longitud (ΔZ) (no se mide la humedad superficial del suelo) y su respectiva humedad volumétrica (θ_v) para cada segmento, donde se comienza a medir la humedad a partir del primer segmento (ΔZ) y luego se continúa con la medición de la humedad en profundidad a la longitud definida del segmento (ΔZ). En esta metodología se supone que la humedad superficial es igual a la humedad que se encuentra a la primera profundidad ΔZ .

Tomando en cuenta la figura 2, la fórmula para estimar el agua que se encuentra almacenada en el suelo en un momento dado se demuestra de la siguiente manera:

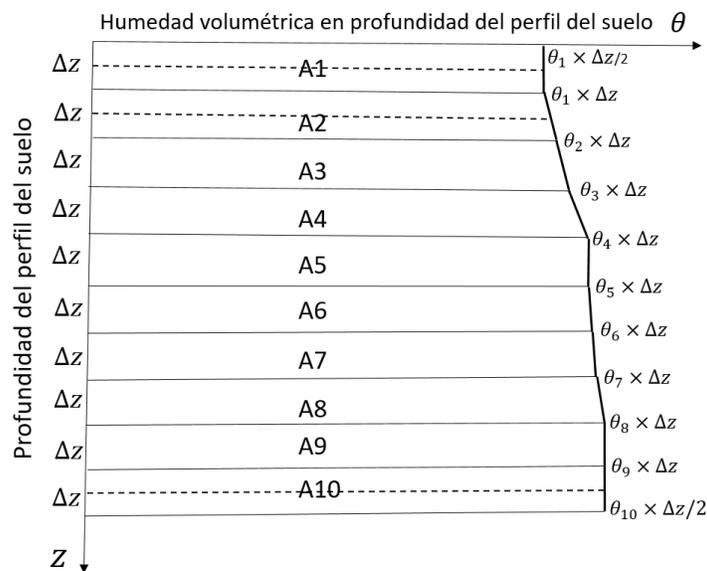


Figura 2. Estimación de humedad del suelo realizando la primera medida a partir del primer Δz y luego cada Δz en profundidad.

$$h(mm) = 0,5 * \theta_1 * \Delta Z + \theta_1 * \Delta Z + \theta_2 * \Delta Z + \theta_3 * \Delta Z + \theta_4 * \Delta Z + \theta_5 * \Delta Z + \theta_6 * \Delta Z + \theta_7 * \Delta Z + \theta_8 * \Delta Z + \theta_9 * \Delta Z + 0,5 * \theta_{10} * \Delta Z$$

$$h(mm) = (1,5 * \theta_1 * \Delta Z) + (\Delta Z * \sum_{i=2}^{n-1} \theta_i) + (0,5 * \theta_{10} * \Delta Z)$$

sustituyendo θ_{10} por θ_n se puede deducir la ecuación 9:

$$h(mm) = (1,5 * \Delta Z * \theta_1) + (0,5 * \theta_n * \Delta Z) + (\Delta Z * \sum_{i=2}^{n-1} \theta_i)$$

ec. 9:

$$h(mm) = \Delta Z * (1,5 * \theta_1 + 0,5 * \theta_n + \sum_{i=2}^{n-1} \theta_i)$$

y para el caso donde la humedad volumétrica esté expresada en porcentaje tenemos la ecuación 10

ec. 10:

$$h(mm) = \Delta Z * (1,5 * \frac{\% \theta 1}{100} + 0,5 * \frac{\% \theta n}{100} + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{\% \theta i}{100})$$

donde:

h = cantidad de agua en el perfil del suelo (mm)

ΔZ = longitud del segmento de profundidad del suelo (mm)

n = número total de capas o de segmentos en el perfil del suelo

$\theta 1$ = humedad del suelo volumétrica medida al primer ΔZ de profundidad dada en proporción con base a la unidad

θi = humedad del suelo volumétrica dada en proporción con base a la unidad, que se presenta en cada uno de los segmentos

θn = humedad del suelo volumétrica dada en proporción con base a la unidad, que se presenta en el último segmento

$\% \theta 1$ = porcentaje de humedad volumétrica del suelo medida a la profundidad del primer ΔZ

$\% \theta i$ = porcentaje de humedad volumétrica del suelo que se presenta en cada uno de los segmentos

$\% \theta n$ = porcentaje de humedad volumétrica del suelo que se presenta en el último segmento

Ejemplo 2: Se tiene un perfil de suelo de 1,0 m de profundidad al cual se le hicieron muestreos para medir la humedad que hay en él. Para ello se dividió el perfil en capas de 20 cm donde cada una representa cada Δz en profundidad y la humedad volumétrica se midió a partir de cada capa Δz por lo que se empezó a partir de los primeros 20 cm, y luego se continuó con las medidas de humedad cada 20 cm. Se toma la información del cuadro 2. Calcular el total de la humedad retenida en el perfil del suelo según metodología 2.

Cuadro 2. Valores que describen tanto la forma de muestreo como los valores de humedad obtenidos en el suelo empezando la medida de humedad a los 20 cm de profundidad

Profundidad de cada segmento (cm)	Profundidad de la medida de humedad en el suelo (cm)	Humedad (%HV)
0	-	-
20	20	16
40	40	19
60	60	21
80	80	27
100	100	38

Utilizando la ecuación 10:

$$h(mm) = \Delta Z * \left(1,5 * \frac{\% \theta_1}{100} + 0,5 * \frac{\% \theta_n}{100} + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{\% \theta_i}{100} \right)$$

$$h(mm) = 200 * \left(1,5 * \frac{16}{100} + 0,5 * \frac{38}{100} + \frac{19 + 21 + 27}{100} \right)$$

$$h(mm) = 200 * 1.1$$

$$h(mm) = 220$$

Para conocer el total de agua que se encuentra en una hectárea a 1,0 m de profundidad utilizando la ecuación 3 tenemos:

$$h \left(\frac{m^3}{ha} \right) = 220 * 10$$

$$h \left(\frac{m^3}{ha} \right) = 2200$$

Metodología 3

Estimación de la humedad del suelo con contenido de agua no saturado en su perfil dividido en segmentos iguales en su longitud (ΔZ) y su respectiva humedad volumétrica (θ_v) para cada segmento, donde se comienza a medir la humedad a partir a partir de la superficie del suelo (θ_0) y luego continuando la medición a la longitud definida del segmento (ΔZ). En esta metodología 3 se supone que la humedad superficial es para el primer $\Delta Z/2$.

Tomando en cuenta la figura 3, la fórmula para estimar el agua que se encuentra almacenada en el suelo en un momento dado se demuestra de la siguiente manera:

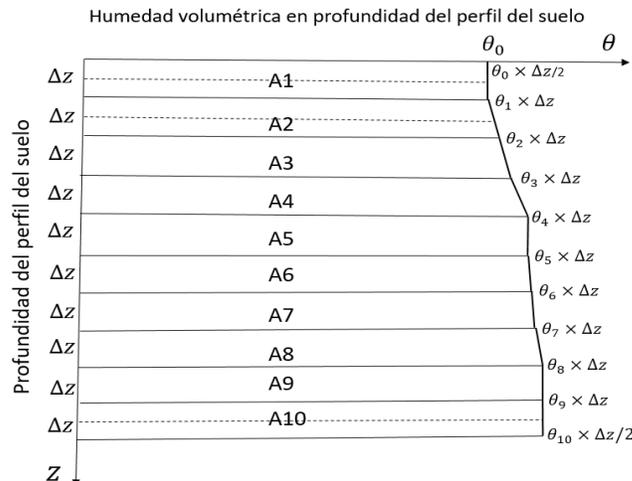


Figura 3. Estimación de la humedad del suelo realizando la primera medida a partir de la superficie del suelo ($\Delta z = 0$) y luego cada Δz en profundidad

$$h(mm) = \theta_0 * 0,5 * \Delta Z + \theta_1 * \Delta Z + \theta_2 * \Delta Z + \theta_3 * \Delta Z + \theta_4 * \Delta Z + \theta_5 * \Delta Z + \theta_6 * \Delta Z + \theta_7 * \Delta Z + \theta_8 * \Delta Z + \theta_9 * \Delta Z + \theta_{10} * 0,5 * \Delta Z$$

$$h(mm) = (0,5 * \theta_0 * \Delta Z) + (\Delta Z * \sum_{i=1}^{n-1} \theta_i) + (0,5 * \theta_{10} * \Delta Z)$$

$$h(mm) = (0,5 * \theta_0 * \Delta Z) + (0,5 * \theta_{10} * \Delta Z) + (\Delta Z * \sum_{i=1}^{n-1} \theta_i)$$

sustituyendo θ_{10} por θ_n y factorizando podemos deducir la ecuación 11:

$$h(mm) = 0,5 * \Delta Z * (\theta_0 + \theta_n) + (\Delta Z * \sum_{i=1}^{n-1} \theta_i)$$

ec. 11:

$$h(mm) = \Delta Z * [0,5 * (\theta_0 + \theta_n) + \sum_{i=1}^{n-1} \theta_i]$$

y para el caso donde la humedad volumétrica esté expresada en porcentaje tenemos la ecuación 12

ec. 12:

$$h(mm) = \Delta Z * [0,5 * (\frac{\% \theta_0 + \% \theta_n}{100}) + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\% \theta_i}{100}]$$

donde:

ΔZ = longitud del segmento de profundidad del suelo (mm)

n = número total de capas o segmentos en el perfil del suelo

θ_0 = humedad del suelo volumétrica superficial dada en proporción con base a la unidad

θ_i = humedad del suelo volumétrica dada en proporción con base a la unidad, que se presenta en cada uno de los segmentos

θ_n = humedad del suelo volumétrica dada en proporción con base a la unidad, que se presenta en el último segmento

$\% \theta_0$ = porcentaje de humedad volumétrica del suelo a nivel superficial

$\% \theta_i$ = porcentaje de humedad volumétrica del suelo que se presenta en cada uno de los segmentos

$\% \theta_n$ = porcentaje de humedad volumétrica del suelo que se presenta en el último segmento

Ejemplo 3: Se tiene un perfil de suelo de 1,0 m de profundidad al cual se le hicieron muestreos para medir la humedad que hay en él. Para ello se dividió el perfil en capas de 20 cm donde cada una representa cada Δz en profundidad y la humedad volumétrica se midió a partir de la superficie del suelo y luego se continuó con las medidas de humedad cada 20 cm o cada segmento Δz . Se toma la información del cuadro 2. Calcular el total de la humedad retenida en el perfil del suelo según metodología 3.

Cuadro 3. Valores que describen tanto la forma de muestreo como los valores de humedad en el suelo empezando el muestreo a los 0,0 cm de profundidad.

Profundidad de cada segmento (cm)	Profundidad de la medida de humedad en el suelo (cm)	Humedad (%HV)
0	0	8
20	10	16
40	30	19
60	50	21
80	70	27
100	90	38

Utilizando la ecuación 12 tenemos:

$$h(mm) = \Delta Z * [0,5 * (\frac{\% \theta_0 + \% \theta_n}{100}) + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\% \theta_i}{100i}]$$

$$h(mm) = 200 * [0,5 * (\frac{8 + 38}{100}) + \frac{16 + 19 + 21 + 27}{100}]$$

$$h(mm) = 200 * 1,06$$

$$h(mm) = 212$$

Utilizando la ecuación 3 tenemos para conocer el total de agua que se encuentra en una hectárea a 1,0 m de profundidad tenemos:

$$h\left(\frac{m^3}{ha}\right) = 212 * 10$$

$$h\left(\frac{m^3}{ha}\right) = 2120$$

Metodología 4

Estimación de la humedad del suelo con contenido de agua no saturado en su perfil dividido en segmentos iguales en su longitud (ΔZ) y su respectiva humedad volumétrica (θ_v) para cada segmento, donde se comienza a medir la humedad del suelo a partir de la superficie del mismo (θ_0) y luego continuando la medición a la longitud definida del segmento (ΔZ); tomando el promedio entre la humedad superficial y la humedad al primer ΔZ para el primer $\Delta Z/2$.

Tomando en cuenta la figura 4, la fórmula para estimar el agua que se encuentra almacenada en el suelo en un momento dado se demuestra de la siguiente manera:

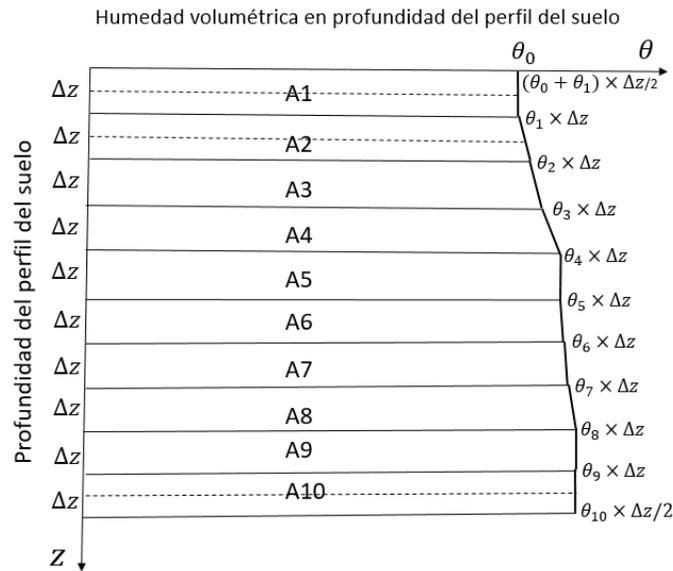


Figura 4. Estimación de la humedad del suelo realizando un promedio entre la primera medida y la segunda medida en profundidad a partir de la superficie del suelo ($\Delta z = 0$) para el primer $\Delta z / 2$ y luego cada Δz en profundidad.

$$h(mm) = \frac{\Delta z}{2} \times \frac{(\theta_0 + \theta_1)}{2} + \Delta z \theta_1 + \Delta z \theta_2 + \Delta z \theta_3 + \Delta z \theta_4 + \Delta z \theta_5 + \Delta z \theta_6 + \Delta z \theta_7 + \Delta z \theta_8 + \Delta z \theta_9 + \frac{\Delta z}{2} * \theta_{10}$$

$$h(mm) = \Delta z \left(\frac{(\theta_0 + \theta_1)}{4} + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6 + \theta_7 + \theta_8 + \theta_9 + 0,5 * \theta_{10} \right)$$

$$h(mm) = \Delta z (0,25\theta_0 + 0,25\theta_1 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6 + \theta_7 + \theta_8 + \theta_9 + 0,5 * \theta_{10})$$

$$h(mm) = \Delta z (0,25\theta_0 + 1,25\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6 + \theta_7 + \theta_8 + \theta_9 + 0,5 * \theta_{10})$$

sustituyendo θ_{10} por θ_n y factorizando podemos deducir la ecuación 13

ec. 13:

$$h(mm) = \Delta z \left(0,25\theta_0 + 1,25\theta_1 + 0,5 * \theta_n + \sum_{i=2}^{n-1} \theta_i \right)$$

y para el caso donde la humedad volumétrica esté expresada en porcentaje tenemos la ecuación 14

ec. 14:

$$h(mm) = \Delta z \left(0,25 * \frac{\% \theta_0}{100} + 1,25 * \frac{\% \theta_1}{100} + 0,5 * \frac{\% \theta_n}{100} + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{\% \theta_i}{100} \right)$$

donde:

ΔZ = longitud del segmento de profundidad del suelo (mm)

n = número total de capas en el perfil del suelo

θ_0 = humedad del suelo volumétrica superficial dada en proporción con base a la unidad

θ_1 = humedad del suelo volumétrica medida al primer ΔZ de profundidad dada en proporción con base a la unidad

θ_i = humedad del suelo volumétrica dada en proporción con base a la unidad, que se presenta en cada uno de los segmentos

θ_n = humedad del suelo volumétrica dada en proporción con base a la unidad, que se presenta en el último segmento

$\% \theta_0$ = porcentaje de humedad volumétrica del suelo que se presenta a nivel superficial

$\% \theta_1$ = porcentaje de humedad volumétrica del suelo medida a la profundidad del primer ΔZ

$\% \theta_i$ = porcentaje de humedad volumétrica del suelo que se presenta en cada uno de los segmentos

$\% \theta_n$ = porcentaje de humedad volumétrica del suelo que se presenta en el último segmento

Ejemplo 4: Se tiene un perfil de suelo de 1,0 m de profundidad al cual se le hicieron muestreos para medir la humedad que hay en él. Para ello se dividió el perfil en capas de 20 cm donde cada una representa cada Δz en profundidad y la humedad volumétrica se midió a partir de la superficie del suelo y luego se continuó con las medidas de humedad cada 20 cm. Se toma la información del cuadro 3. Calcular el total de la humedad retenida en el perfil del suelo utilizando la metodología 4.

Utilizando la ecuación 14 tenemos:

$$h(mm) = \Delta z \left(0,25 * \frac{\% \theta_0}{100} + 1,25 * \frac{\% \theta_1}{100} + 0,5 * \frac{\% \theta_n}{100} + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{\% \theta_i}{100} \right)$$

$$h(mm) = 200 \left(0,25 * \frac{8}{100} + 1,25 * \frac{16}{100} + 0,5 * \frac{38}{100} + \frac{19 + 21 + 27}{100} \right)$$

$$h(mm) = 200 * 1,08$$

$$h(mm) = 216$$

Utilizando la ecuación 3 tenemos para conocer el total de agua que se encuentra en una hectárea a 1,0 m de profundidad tenemos:

$$h\left(\frac{m^3}{ha}\right) = 216 * 10$$

$$h\left(\frac{m^3}{ha}\right) = 2160$$

Metodología 5

Estimación de la humedad del suelo con contenido de agua no saturado en su perfil dividido en segmentos iguales en su longitud (ΔZ) y la respectiva humedad volumétrica (θv) para cada segmento, donde se comienza a medir la humedad a partir de la superficie del suelo (θ_0) y luego continuando la medición a la longitud definida del segmento (ΔZ); tomando el promedio entre las humedades superior e inferior de cada segmento ΔZ .

Tomando en cuenta la figura 5, la fórmula para estimar el agua que se encuentra almacenada en el suelo en un momento dado se demuestra de la siguiente manera:

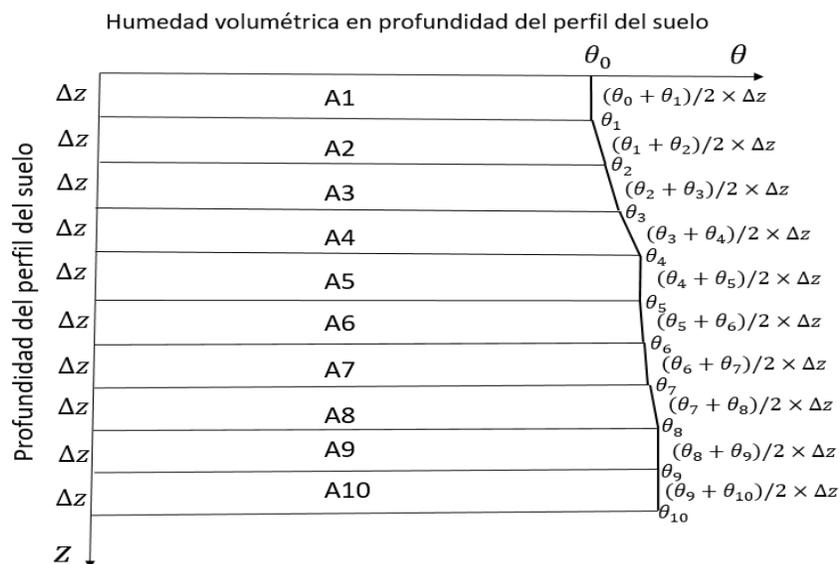


Figura 5. Estimación de la humedad del suelo realizando un promedio entre las humedades superior e inferior de cada segmento ΔZ

$$h(mm) = \Delta Z * \frac{(\theta_0 + \theta_1)}{2} + \Delta Z * \frac{(\theta_1 + \theta_2)}{2} + \Delta Z * \frac{(\theta_2 + \theta_3)}{2} + \Delta Z * \frac{(\theta_3 + \theta_4)}{2} + \Delta Z * \frac{(\theta_4 + \theta_5)}{2} + \Delta Z * \frac{(\theta_5 + \theta_6)}{2} + \Delta Z * \frac{(\theta_6 + \theta_7)}{2} + \Delta Z * \frac{(\theta_7 + \theta_8)}{2} + \Delta Z * \frac{(\theta_8 + \theta_9)}{2} + \Delta Z * \frac{(\theta_9 + \theta_{10})}{2}$$

$$h(mm) = \frac{\Delta Z}{2} * (\theta_0 + \theta_1 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_5 + \theta_6 + \theta_6 + \theta_7 + \theta_7 + \theta_8 + \theta_8 + \theta_9 + \theta_9 + \theta_{10})$$

$$h(mm) = 0,5 * \Delta Z * (\theta_0 + \theta_1 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_5 + \theta_6 + \theta_6 + \theta_7 + \theta_7 + \theta_8 + \theta_8 + \theta_9 + \theta_9 + \theta_{10})$$

$$h(mm) = 0,5 * \Delta Z * (\theta_0 + 2 * \theta_1 + 2 * \theta_2 + 2 * \theta_3 + 2 * \theta_4 + 2 * \theta_5 + 2 * \theta_6 + 2 * \theta_7 + 2 * \theta_8 + 2 * \theta_9 + \theta_{10})$$

$$h(mm) = 0,5 * \Delta Z * (\theta_0 + \theta_{10} + 2 * (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6 + \theta_7 + \theta_8 + \theta_9))$$

$$h(mm) = 0,5 * \Delta Z * [\theta_0 + \theta_{10} + 2 * \left(\sum_{i=1}^{n-1} \theta_i \right)]$$

de donde sustituyendo 10 por n se puede deducir la ecuación 15.

ec. 15:

$$h(mm) = 0,5 * \Delta Z * [\theta_0 + \theta_n + 2 * \left(\sum_{i=1}^{n-1} \theta_i \right)]$$

y para el caso en que la humedad volumétrica se encuentre en términos de porcentaje tenemos la ecuación 16:

ec. 16:

$$h(mm) = 0,5 * \Delta Z * \left[\frac{\% \theta_0}{100} + \frac{\% \theta_n}{100} + 2 * \left(\sum_{i=1}^{n-1} \frac{\% \theta_i}{100} \right) \right]$$

donde:

ΔZ = longitud del segmento de profundidad del suelo (mm)

n = número total de capas en el perfil del suelo

θ_0 = humedad del suelo volumétrica superficial dada en proporción con base a la unidad

θ_i = humedad del suelo volumétrica dada en proporción con base a la unidad, que se presenta en cada uno de los segmentos

θ_n = humedad del suelo volumétrica dada en proporción con base a la unidad, que se presenta en el último segmento

$\% \theta_0$ = porcentaje de humedad volumétrica del suelo a nivel superficial dada en proporción con base a la unidad

$\% \theta_i$ = porcentaje de humedad volumétrica del suelo que se presenta en cada uno de los segmentos

$\% \theta_n$ = porcentaje de humedad volumétrica del suelo que se presenta en el último segmento

Para expresar dicha humedad en metros cúbicos por cada hectárea se puede utilizar la siguiente ecuación 17:

ec. 17:

$$h\left(\frac{m^3}{ha}\right) = \left(0,5 * \Delta Z * [\theta_0 + \theta_n + 2 * \left(\sum_{i=1}^{n-1} \theta_i\right)] \right) * 10$$

y para el caso en que la humedad volumétrica se encuentre en términos de porcentaje tenemos la ecuación 18:

ec. 18:

$$h\left(\frac{m^3}{ha}\right) = \left(0,5 * \Delta Z * \left[\frac{\% \theta_0}{100} + \frac{\% \theta_n}{100} + 2 * \left(\sum_{i=1}^{n-1} \frac{\% \theta_i}{100}\right) \right] \right) * 10$$

Ejemplo 5: Se tiene un perfil de suelo de 1,0 m de profundidad al cual se le hicieron muestreos para medir la humedad que hay en él. Para ello se dividió el perfil en capas de 20 cm donde cada una representa cada Δz en profundidad y la humedad volumétrica se midió a partir de la superficie del suelo y luego se continuó con las medidas de humedad cada 20 cm o cada segmento Δz . Se toma la información del cuadro 3. Calcular el total de la humedad retenida en el perfil del suelo según metodología 5.

Utilizando la ecuación 16 tenemos lo siguiente:

$$h(mm) = 0,5 * \Delta Z * \left[\frac{\% \theta_0}{100} + \frac{\% \theta_n}{100} + 2 * \left(\sum_{i=1}^{n-1} \frac{\% \theta_i}{100}\right) \right]$$

$$h(mm) = 0,5 * 200 * \left[\frac{8}{100} + \frac{38}{100} + 2 * \left(\frac{16 + 19 + 21 + 27}{100}\right) \right]$$

$$h = 0,5 * 200 * (2,12)$$

$$h(mm) = 212$$

Utilizando la ecuación 3 tenemos para conocer el total de agua que se encuentra en una hectárea a 1,0 m de profundidad tenemos:

$$h \left(\frac{m^3}{ha} \right) = 212 * 10$$

$$h \left(\frac{m^3}{ha} \right) = 2120$$

Cuadro 4. Estimación de la cantidad de metros cúbicos por hectárea a 1 metro de profundidad para cada metodología propuesta.

Metodología	Volumen(m3/ha)
1	2420
2	2200
3	2120
4	2160
5	2120
Promedio =	2204,00
Desviación Estandar =	125,22
% Coef. Variación =	5,68

Conclusiones

Las ecuaciones demostradas por la metodología del Trapecio muestran con respecto a todos los resultados de los ejemplos realizados que varían como máximo un 13,60% en promedio que viene a representar 300 m³/ha y presentan un coeficiente de variación del 5,68%. La variación en la estimación cuando no se mide la humedad superficial es del 9,52% y la variación cuando se mide la humedad superficial es de 1,88%. De aquí se puede derivar la importancia en la estimación de la medida de la humedad del suelo en la superficie del suelo la cual aumenta la precisión de las estimaciones obtenidos.

Se puede observar que dependiendo de cómo se realiza el muestreo en la profundidad del suelo y de cómo se definan las humedades para los segmentos, se van a presentar diferencias en las estimaciones del contenido de humedad en un perfil de suelo.

De los ejemplos de estimación por las diferentes metodologías podemos observar que las metodologías 3 y 5 dan resultados iguales y a su vez, las metodologías 1, 2 y 4 presentan diferentes resultados entre ellos y diferentes resultados con las 3 y 5. Además, las metodologías que presentan menores valores son las 3 y 5 y la que presenta el mayor valor de estimación es la metodología 1.

Las metodologías con mayor precisión respecto a las otras son las 3 y 5 debido a dos condiciones conjuntas que son menor variación y la medida de la humedad superficial.

Referencias

- [1] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Roma, 2015, p. 4. Obtenido desde http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/soils-2015/docs/Fact_sheets/print_IYS_Water_es.pdf
- [2] G. Angella, C. Frías y R. Salgado, 2016. Obtenido desde https://www.researchgate.net/publication/322888562_Conceptos_basicos_de_las_relaciones_agua-suelo-planta
- [3] R. López Olivari, Boletín INIA No 340: Manejo y uso eficiente del agua de riego intrapredial para el sur de Chile, Temuco, 2016, p. 497. Obtenido desde https://puntoganadero.cl/imagenes/upload/_5cc083a547bfb.pdf

- [4] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Santiago, 2013. Obtenido desde <http://www.fao.org/3/i3247s/i3247s.pdf>
- [5] P. L. Libardi, *Dinâmica da Água do Solo*, 2da ed., São Paulo, 2012, p. 350.
- [6] V. da Silva, P. de Azevedo, B. da Silva, L. Bassoi, A. Teixeira, J. Soares y J. e Silva, «Estimativa da evapotranspiração da mangueira com base no balanço hídrico do solo,» *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 5, n° 3, pp. 456 - 462, 2001. Obtenido desde https://www.researchgate.net/publication/250985336_Estimativa_da_evapotranspiracao_da_mangueira_com_base_no_balanco_hidrico_do_solo
- [7] V. da Silva, P. de Azevedo, B. da Silva, L. Bassoi, A. de Castro, J. Soares y J. Sobrinho, Campina Grande, 2000, pp. 240 - 249. Obtenido desde <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/134371/1/OPB276.pdf>
- [8] d. S. Cícero, A. de Andrade, J. de S. Lima, A. Antonimo, E. de Souza y I. da Silva, «Balanço hídrico da cultura da mamona sob condições de sequeiro,» *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 17, n° 1, pp. 3 - 10, 2013. Obtenido desde
- [9] Organismo Internacional de Energía Atómica, *Colección de cursos de capacitación No 16/S*, Viena, 2003. Obtenido desde
- [10] R. Haverkamp, M. Vauclin y G. Vachaud, «Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements: 1. Local standpoint,» *Soil Science*, vol. 137, n° 2, pp. 78 - 90, Febrero 1984. Obtenido desde https://journals.lww.com/soilsci/Abstract/1984/02000/Error_Analysis_in_Estimating_Soil_Water_Content.2.aspx
- [11] A. E. Chavarría Vidal, *Apuntes de clases de Relación Suelo Agua*, Cartago, Cartago, 2012, p. 203.

Melón (*Cucumis melo* L.) Honey Dew cultivado bajo invernadero: correlación entre densidad de siembra y variables de rendimiento

Honey Dew melon (*Cucumis melo* L.) grown under greenhouse conditions: correlation among plant density and yield variables

Jorge Manuel Díaz-Alvarado¹, José Eladio Monge-Pérez², Michelle Loría-Coto³

Fecha de recepción: 12 de marzo de 2020
Fecha de aprobación: 23 de julio de 2020

Díaz-Alvarado, J.M; Monge-Pérez, J.E; Loría-Coto, M. Melón (*cucumis melo* L.) Honey dew cultivado bajo invernadero: correlación entre densidad de siembra y variables de rendimiento. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-3 Julio-Setiembre 2021. Pág 34-50.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5033>

- 1 Ingeniero agrónomo. Amazon Development Center Germany GmbH. Alemania. Correo electrónico: jorgeda@gmail.com
- 2 Ingeniero agrónomo. Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno y Sede de Guanacaste, Universidad de Costa Rica, Costa Rica. Correo electrónico: melonescr@yahoo.com.mx
- 3 Economista agrícola. Escuela de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica. Correo electrónico: michelle_loria@yahoo.com



Palabras clave

Cucumis melo; número de frutos por planta; rendimiento; correlación de Pearson; regresión lineal; sólidos solubles totales

Resumen

Se establecieron correlaciones de Pearson en melón Honey Dew producido bajo invernadero, manejado con tres tipos de poda (1 tallo; 2 tallos; sin poda), entre la densidad de siembra y las siguientes variables: edad al inicio de la cosecha, peso del fruto, número de frutos por planta y por metro cuadrado, rendimiento por planta y por área, firmeza de la pulpa del fruto, y porcentaje de sólidos solubles totales. El cultivo se manejó con fertirrigación, en sustrato de fibra de coco. Para los tres tipos de poda, las correlaciones de Pearson que tuvieron significancia estadística ($p \leq 0,05$), en cuyos casos se obtuvo la regresión lineal, fueron entre la densidad de siembra y: número total de frutos por planta ($r = -0,65^{**}$); número de frutos comerciales por planta ($r = -0,65^{**}$); rendimiento total por planta ($r = -0,69^{**}$); y rendimiento comercial por planta ($r = -0,69^{**}$). Para los tratamientos con poda a 2 tallos, se obtuvo una correlación significativa entre la densidad de siembra y el porcentaje de sólidos solubles totales ($r = -0,64^*$). Para el tratamiento sin poda, se obtuvo una correlación significativa entre la densidad de siembra y la edad al inicio de la cosecha ($r = 0,98^{**}$). Se concluye que, en melón Honey Dew manejado con cualquiera de los tipos de poda evaluados, el uso de una mayor densidad de siembra provoca una disminución en el número de frutos (totales y comerciales) por planta, y en el rendimiento total y comercial por planta.

Keywords

Cucumis melo; number of fruits per plant; yield; Pearson correlation; linear regression; total soluble solids.

Abstract

For Honey Dew melon grown under greenhouse conditions and managed with three pruning systems (1-stem; 2-stem; no pruning), the researchers estimated Pearson correlations among plant density and the following variables: days to start of harvest, fruit weight, number of fruits per plant and per square meter, yield per plant and per area, fruit flesh firmness and percentage of total soluble solids. The crop was planted on coconut fiber as substrate, and managed with fertigation. For all three pruning systems, the Pearson correlations that were statistically significant ($p \leq 0,05$), were obtained between plant density and: total number of fruits per plant ($r = -0,65^{**}$); number of commercial fruits per plant ($r = -0,65^{**}$); total yield per plant ($r = -0,69^{**}$); and commercial yield per plant ($r = -0,69^{**}$); in those cases the linear regression was calculated. For 2-stem pruning treatments, a significant correlation was obtained between plant density and percentage of total soluble solids ($r = -0,64^*$). For no pruning treatment, a significant correlation was obtained between plant density and days to start of harvest ($r = 0,98^{**}$). It is concluded that in Honey Dew melon managed with any of the evaluated pruning systems, the use of a higher plant density lead to a decrease in the number of fruits (total and commercial) per plant, and in the total and commercial yield per plant.

Introducción

El melón (*Cucumis melo* L.) es uno de los cultivos económicamente más importantes en Costa Rica. Esta especie pertenece a la familia Cucurbitaceae, y presenta una planta herbácea, anual, cuyos tallos pueden ser rastreros o trepadores si se les facilita un tutorado [1] [2]. Los principales tipos de melón que se cultivan en este país son: Harper, Amarillo, Cantaloupe, Honey Dew, Galia, Charentais, Piel de Sapo, y Orange Flesh [3].

El cultivo protegido presenta varias ventajas sobre el cultivo a campo abierto, como la obtención de mayor número de cosechas durante el año, precocidad de la cosecha, economía de agua y fertilizantes, mayor rendimiento, y mejor calidad de los frutos [4]. En el cultivo bajo ambiente protegido se alteran las características ambientales de clima y de suelo: hay menor radiación solar global, evapotranspiración y viento, y hay mayor radiación difusa, temperatura y humedad relativa del aire [5].

Por otra parte, el cultivo de melón en sistema hidropónico permite un control parcial de las condiciones climáticas, menor aplicación de plaguicidas, manejo adecuado del agua y de los nutrientes de acuerdo al desarrollo del cultivo, la posibilidad de cultivar a mayor densidad, y un aumento significativo en la productividad y calidad del producto final [4].

Una ventaja de la producción de melón en invernadero es que se puede cultivar durante todo el año. En Costa Rica hay una importante demanda insatisfecha durante la época lluviosa, debido a la muy baja o nula producción (y de baja calidad) de melón a campo abierto, por lo que los consumidores podrían estar dispuestos a pagar precios altos por frutos de alta calidad en esa época; la producción de melón bajo ambiente protegido abriría esta oportunidad comercial para los agricultores [6] [7].

La calidad de los frutos de melón está relacionada con características como la concentración de sólidos solubles totales, la apariencia interna y externa del fruto, el grosor de la pulpa y el sabor, las que determinan la aceptabilidad del consumidor [4].

Otra ventaja es que se podrían obtener mejores rendimientos en comparación con los obtenidos a campo abierto, pues permite prolongar el ciclo productivo del cultivo [2] [7] [8]. Para garantizar un buen rendimiento y calidad en invernadero se pueden utilizar tres prácticas importantes: un sistema de amarre o tutorado de las plantas (con cuerdas o mallas), una mayor densidad de siembra, y un sistema de podas [9].

Varios investigadores han estudiado el efecto de la densidad de siembra sobre el cultivo de melón en invernadero; generalmente el rendimiento aumenta al utilizar una mayor densidad [10] [11] [12] [13] [14], y a veces esto provoca un menor peso del fruto [10] [13], pero en otras ocasiones no se afecta el peso o la calidad del mismo [12] [13] [14].

En cuanto a la implementación de sistemas de podas, lo que se busca es adelantar la cosecha, basándose en el principio botánico de que en melón las flores femeninas o hermafroditas sólo aparecen en las ramas secundarias o terciarias [1] [15] [2]. Existen muchos sistemas de podas en melón, pero generalmente lo que se busca es mantener un balance para disminuir el vigor vegetativo y adelantar la aparición de flores femeninas o hermafroditas. Las prácticas de poda involucran la eliminación o conservación del tallo principal, y el manejo de uno, dos o más tallos secundarios y terciarios [2].

La existencia de correlaciones significativas entre diversas variables en un cultivo puede ayudar a realizar una selección más rápida de los mejores genotipos a nivel de producción agrícola, y esto es también un factor de relevancia en los procesos de fitomejoramiento, pues ayuda a identificar las variables más importantes a ser consideradas para la generación de nuevos genotipos [16].

El objetivo de esta investigación fue establecer correlaciones de Pearson entre la densidad de siembra y variables de rendimiento, en melón Honey Dew cultivado en invernadero, en Alajuela, Costa Rica.

Materiales y métodos

La siembra se realizó en condiciones hidropónicas, en el invernadero de Hortalizas de la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno (EEAFBM), la cual está localizada en Barrio San José de Alajuela, Costa Rica, a una altitud de 883 msnm.

Se sembró el híbrido de melón tipo Honey Dew JMX-701 F-1 (*Cucumis melo* L. var. *inodorus*). Las plántulas se trasplantaron el 17 de abril del 2012, cuando tenían dos hojas verdaderas expandidas.

El cultivo se realizó en sacos de fibra de coco, de 1 m de largo, 20 cm de ancho y 15 cm de altura. Las plantas se sujetaron por medio de dos mallas plásticas, ubicadas una a cada lado de cada hilera de plantas.

Se evaluaron nueve tratamientos, correspondiente a la combinación factorial de tres densidades de siembra y tres tipos de poda (cuadro 1). La distancia entre hileras fue de 1,54 m, y la distancia entre plantas fue de 33,0; 20,0; y 16,7 cm, correspondientes a una densidad de siembra de 1,95; 3,25; y 3,90 plantas/m², respectivamente. Los tipos de poda fueron: un tallo secundario; dos tallos secundarios; y plantas sin poda. La poda del tallo principal se realizó a los 15 días después del trasplante (ddt), cuando las plantas tenían tres hojas verdaderas expandidas [9], y se seleccionó uno o dos tallos secundarios, según el tratamiento correspondiente. El tratamiento sin poda se dejó a libre crecimiento.

Para todos los tratamientos, los tallos principales o secundarios fueron tutorados en una malla para el soporte de hortalizas, de polietileno, de 2,0 m de altura. En los tratamientos con poda, una vez tutorado el tallo secundario se realizaron podas semanales de la siguiente manera: los tallos terciarios que tenían fruto se podaron después de la segunda hoja emergida posterior al fruto, y los tallos terciarios sin fruto se podaron después de la cuarta hoja emergida [9]; esta poda de mantenimiento fue realizada durante los 22 días posteriores a la poda inicial, y a partir de ese momento no fue necesario realizar más podas, debido al escaso desarrollo de nuevos tallos terciarios.

Cuadro 1. Tratamientos evaluados.

Tratamiento	Densidad (plantas/m ²)	Tipo de poda
1	1,95	1 tallo
2	1,95	2 tallos
3	1,95	Sin poda
4	3,25	1 tallo
5	3,25	2 tallos
6	3,25	Sin poda
7	3,90	1 tallo
8	3,90	2 tallos
9	3,90	Sin poda

Se implementó un sistema de manejo integrado de plagas, y se utilizó un programa de fertilización validado para la producción comercial de melón, según las experiencias previas en el invernadero de la EEAFBM. El fertirriego se suministró a cada hora, entre las 7:00 a.m. y las 4:00 p.m. Al inicio de la floración se introdujo una colmena de abejas (*Apis mellifera*) con el fin de promover una adecuada polinización.

El periodo total de cultivo fue hasta el 3 de agosto de 2012 (108 ddt); en los tratamientos más precoces la cosecha inició el 2 de julio de 2012 (76 ddt), y se extendió por un periodo de 32 días. El índice de cosecha se basó en la apariencia externa del fruto, donde se consideraron aptos para cosecha los frutos que presentaban una coloración típica de madurez (color crema claro, sin brillo), y un anillo de color amarillo en la zona de la unión peduncular. Se consideró como fruto de calidad comercial aquél con un peso superior a 599 g.

Se evaluaron las siguientes variables:

1. Edad al inicio de la cosecha (ddt): se registró el tiempo transcurrido entre el trasplante y el inicio de la cosecha, para cada tratamiento.
2. Número de frutos por planta y por metro cuadrado: se obtuvo al registrar el número total de frutos producidos en cada parcela, y se dividió ese dato entre el número de plantas por parcela; y luego se multiplicó el valor obtenido por la densidad de siembra.
3. Rendimiento por planta (g) y por área (ton/ha): se estimó el peso de los frutos de melón producidos en cada parcela, y se dividió ese dato entre el número de plantas por parcela; y luego se multiplicó el valor obtenido por la densidad de siembra.
4. Peso del fruto (g): se midió el peso de cada fruto producido, y se obtuvo el promedio.
5. Porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix): se obtuvo el porcentaje de sólidos solubles totales de cada fruto, y se obtuvo el promedio.
6. Firmeza de la pulpa del fruto (N): se midió la firmeza de la pulpa de cada fruto, y se obtuvo el promedio.

El peso de los frutos se obtuvo con una balanza electrónica marca Ocony, modelo TH-I-EK, de $5000,0 \pm 0,1$ g de capacidad. El porcentaje de sólidos solubles totales se determinó con un refractómetro manual marca Atago, modelo N-1a, con una capacidad de $32,0 \pm 0,2$ °Brix. Para la evaluación de firmeza del fruto se utilizó un penetrómetro portátil marca Effegi, modelo FT-327, con una capacidad de $12,5 \pm 0,1$ kilogramo-fuerza, y los datos se multiplicaron por un factor de conversión de 9,806 para obtener el dato en Newtons (N); se utilizó el puntero cuya base mide 7,5 mm de ancho.

Se utilizó un diseño experimental irrestricto al azar, con arreglo de parcelas divididas; las parcelas grandes correspondieron a las densidades de siembra, y las pequeñas a los diferentes sistemas de podas. Se establecieron cuatro repeticiones por tratamiento. El área útil fue equivalente a dos metros lineales ($3,1 \text{ m}^2$) a lo largo de la hilera de siembra. La cantidad de plantas incluidas en cada parcela útil varió en función de la densidad de siembra: la densidad de 1,95 plantas/ m^2 tuvo 6 plantas; la densidad de 3,25 plantas/ m^2 tuvo 10 plantas; y la densidad de 3,90 plantas/ m^2 tuvo 12 plantas. Todos los frutos producidos dentro de la parcela útil fueron evaluados.

Se obtuvo el coeficiente de correlación de Pearson (r) entre la densidad de siembra y las variables de rendimiento, y para aquellas combinaciones en que se obtuvo significancia estadística ($p \leq 0,05$), se calculó la regresión lineal con su respectiva ecuación y su coeficiente de determinación (R^2). Las correlaciones se obtuvieron tanto entre el total de tratamientos evaluados, como según el tipo de poda.

Resultados y discusión

Durante el desarrollo de este ensayo, la temperatura promedio dentro del invernadero fue de 25 °C, con un rango entre 17 y 41 °C; y la humedad relativa promedio fue de 78 %, con un rango entre 24 y 100 %.

Con respecto a la correlación entre la densidad de siembra y el número total de frutos por planta, el valor obtenido fue negativo y altamente significativo para el total de tratamientos ($r = -0,65$; $R^2 = 0,42$) (cuadro 2, figura 1), así como para el tratamiento sin poda ($r = -0,75$; $R^2 = 0,56$) (figura 2); y fue significativo para la poda a 1 tallo ($r = -0,66$; $R^2 = 0,43$) (figura 3) y a 2 tallos ($r = -0,62$; $R^2 = 0,39$) (figura 4).

Las plantas del híbrido JMX-701 F-1 son bastante vigorosas en su desarrollo vegetativo, y de rápido crecimiento, en comparación con otros genotipos, lo que provoca una importante competencia por recursos (luz, espacio, agua, nutrientes) entre los individuos de una población, y es posiblemente por esta razón que disminuyó la cantidad de frutos por planta conforme aumentó la densidad.

Varios autores también obtuvieron un menor número total de frutos por planta al aumentar la densidad de siembra en melón [12] [11] [17], al igual que los resultados hallados en el presente ensayo. Sin embargo, otros investigadores no encontraron diferencias en el número total de frutos por planta al evaluar diferentes densidades de siembra [18] [13] [19] [14].

Cuadro 2. Coeficientes de correlación de Pearson entre densidad de siembra y número total de frutos por planta en melón Honey Dew.

Tratamiento	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total	-0,65	**	0,42
Poda a 1 tallo	-0,66	*	0,43
Poda a 2 tallos	-0,62	*	0,39
Sin poda	-0,75	**	0,56

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

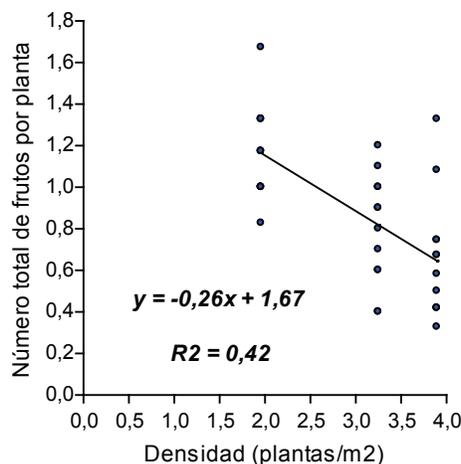


Figura 1. Regresión lineal del número total de frutos por planta versus la densidad de siembra para el total de tratamientos evaluados.

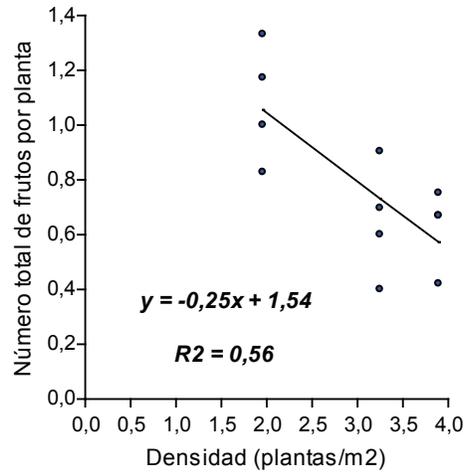


Figura 2. Regresión lineal del número total de frutos por planta versus la densidad de siembra para los tratamientos sin poda.

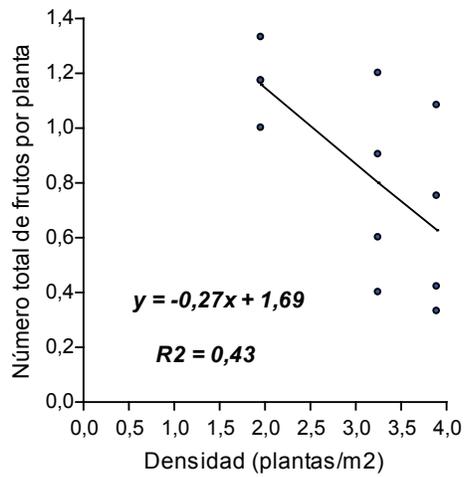


Figura 3. Regresión lineal del número total de frutos por planta versus la densidad de siembra para los tratamientos con poda a 1 tallo.

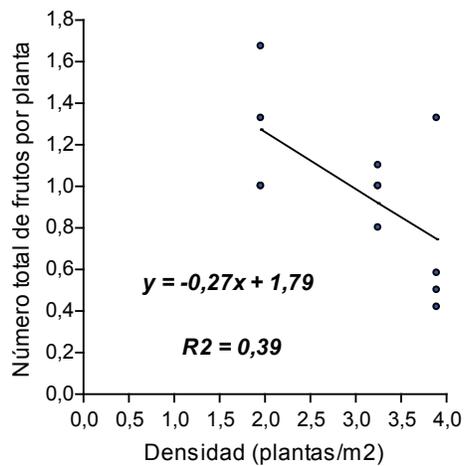


Figura 4. Regresión lineal del número total de frutos por planta versus la densidad de siembra para los tratamientos con poda a 2 tallos.

La correlación entre la densidad de siembra y el número de frutos comerciales por planta fue negativa y altamente significativa, tanto para el total de tratamientos ($r = -0,65$; $R^2 = 0,42$) (cuadro 3, figura 5), como para el tratamiento sin poda ($r = -0,78$; $R^2 = 0,62$) (figura 6); y fue significativa para los tratamientos con poda a 1 tallo ($r = -0,62$; $R^2 = 0,38$) (figura 7) y con poda a 2 tallos ($r = -0,66$; $R^2 = 0,44$) (figura 8).

Sin embargo, otros autores no hallaron diferencias en el número de frutos comerciales por planta, al evaluar diferentes densidades de siembra en melón tipo Cantaloupe [19].

Cuadro 3. Coeficientes de correlación de Pearson entre densidad de siembra y número de frutos comerciales por planta en melón Honey Dew.

Tratamiento	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total	-0,65	**	0,42
Poda a 1 tallo	-0,62	*	0,38
Poda a 2 tallos	-0,66	*	0,44
Sin poda	-0,78	**	0,62

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

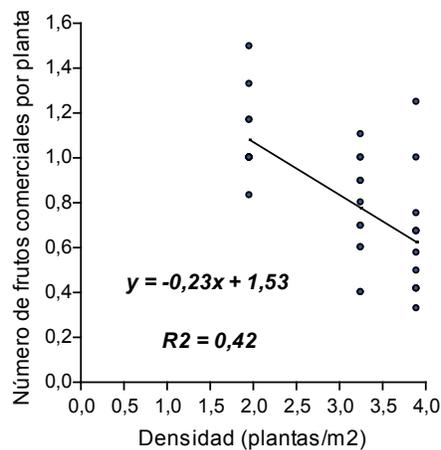


Figura 5. Regresión lineal del número de frutos comerciales por planta versus la densidad de siembra para el total de tratamientos evaluados.

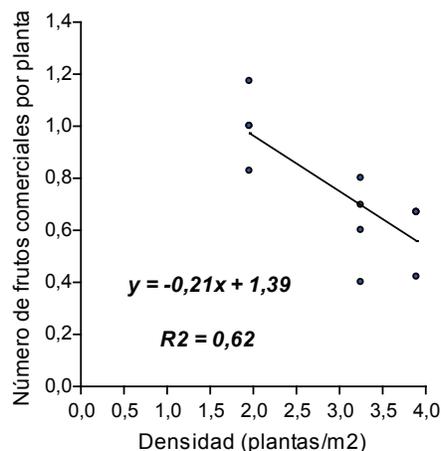


Figura 6. Regresión lineal del número de frutos comerciales por planta versus la densidad de siembra para los tratamientos sin poda.

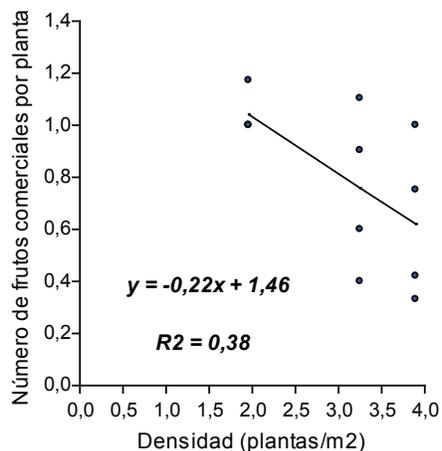


Figura 7. Regresión lineal del número de frutos comerciales por planta versus la densidad de siembra para los tratamientos con poda a 1 tallo.

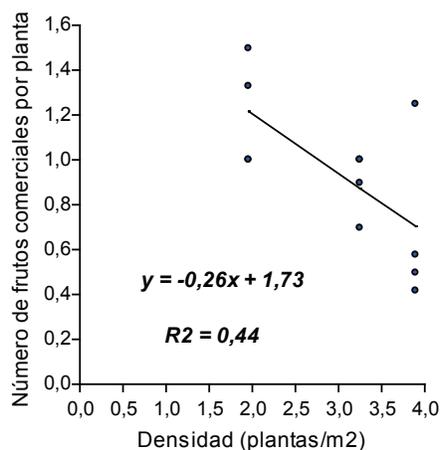


Figura 8. Regresión lineal del número de frutos comerciales por planta versus la densidad de siembra para los tratamientos con poda a 2 tallos.

En cuanto a la correlación entre la densidad de siembra y el rendimiento total por planta, el valor hallado fue negativo y altamente significativo para el total de tratamientos ($r = -0,69$; $R^2 = 0,48$) (cuadro 4, figura 9), así como para los tratamientos de poda a 2 tallos ($r = -0,69$; $R^2 = 0,47$) (figura 10) y sin poda ($r = -0,85$; $R^2 = 0,73$) (figura 11); y fue significativo para la poda a 1 tallo ($r = -0,62$; $R^2 = 0,38$) (figura 12).

Otros investigadores también hallaron un menor rendimiento total por planta en melón, al aumentar la densidad de siembra [17], al igual que los resultados obtenidos en el presente ensayo.

Cuadro 4. Coeficientes de correlación de Pearson entre densidad de siembra y rendimiento total por planta (g) en melón Honey Dew.

Tratamiento	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total	-0,69	**	0,48
Poda a 1 tallo	-0,62	*	0,38
Poda a 2 tallos	-0,69	**	0,47
Sin poda	-0,85	**	0,73

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

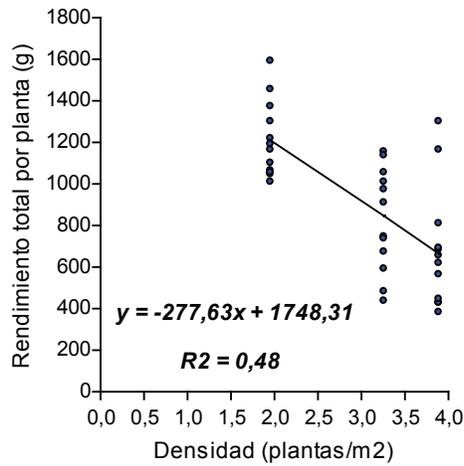


Figura 9. Regresión lineal del rendimiento total por planta versus la densidad de siembra para el total de tratamientos evaluados.

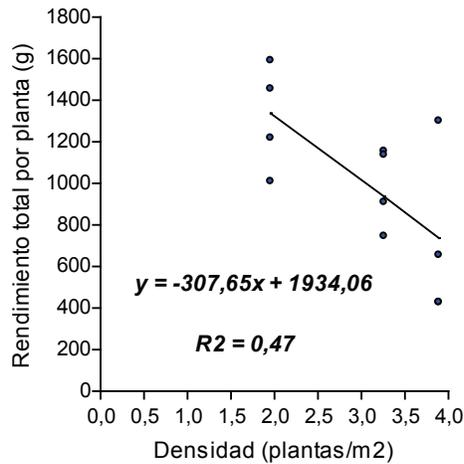


Figura 10. Regresión lineal del rendimiento total por planta versus la densidad de siembra para los tratamientos con poda a 2 tallos.

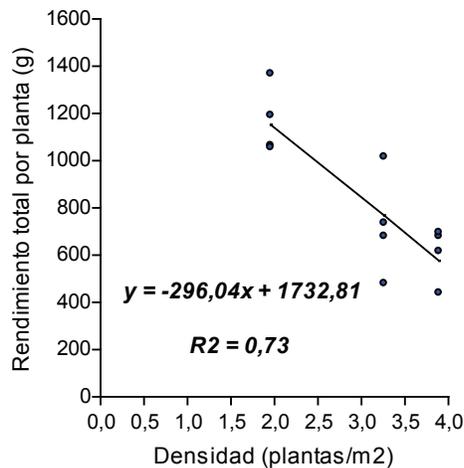


Figura 11. Regresión lineal del rendimiento total por planta versus la densidad de siembra para los tratamientos sin poda.

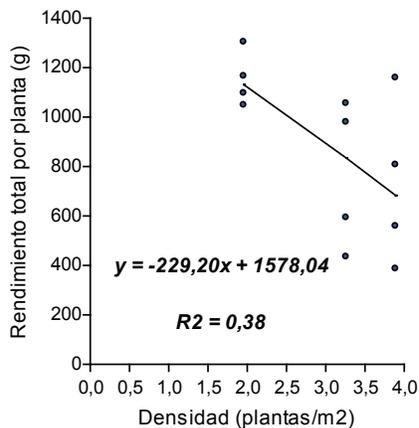


Figura 12. Regresión lineal del rendimiento total por planta versus la densidad de siembra para los tratamientos con poda a 1 tallo.

Con respecto a la correlación entre la densidad de siembra y el rendimiento comercial por planta, el valor obtenido fue negativo y altamente significativo para el total de tratamientos ($r = -0,69$; $R^2 = 0,48$) (cuadro 5, figura 13), así como para los tratamientos con poda a 2 tallos ($r = -0,71$; $R^2 = 0,50$) (figura 14) y sin poda ($r = -0,87$; $R^2 = 0,76$) (figura 15); y fue significativo para la poda a 1 tallo ($r = -0,59$; $R^2 = 0,35$) (figura 16).

Cuadro 5. Coeficientes de correlación de Pearson entre densidad de siembra y rendimiento comercial por planta (g) en melón Honey Dew.

Tratamiento	Coficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total	-0,69	**	0,48
Poda a 1 tallo	-0,59	*	0,35
Poda a 2 tallos	-0,71	**	0,50
Sin poda	-0,87	**	0,76

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

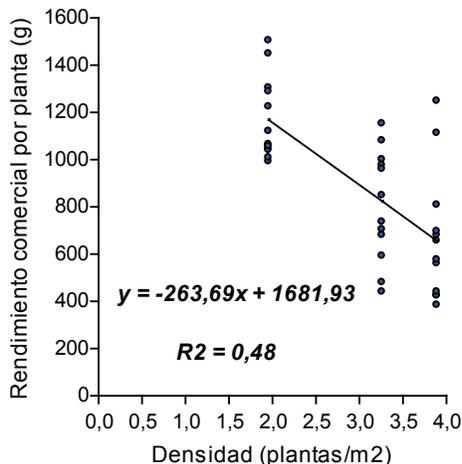


Figura 13. Regresión lineal del rendimiento comercial por planta versus la densidad de siembra para el total de tratamientos evaluados.

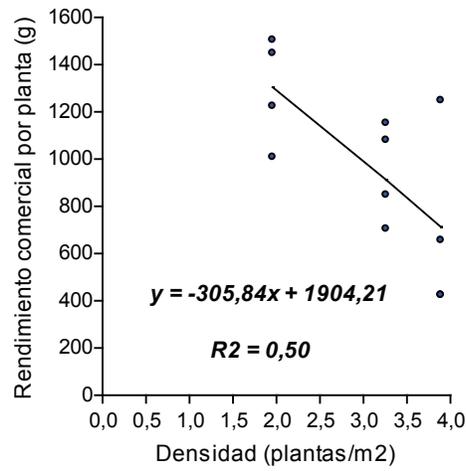


Figura 14. Regresión lineal del rendimiento comercial por planta versus la densidad de siembra para los tratamientos con poda a 2 tallos.

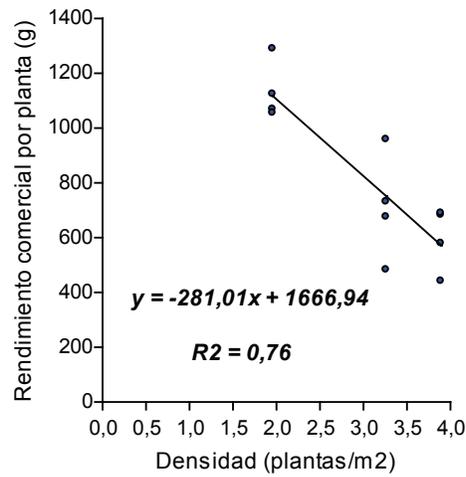


Figura 15. Regresión lineal del rendimiento comercial por planta versus la densidad de siembra para los tratamientos sin poda.

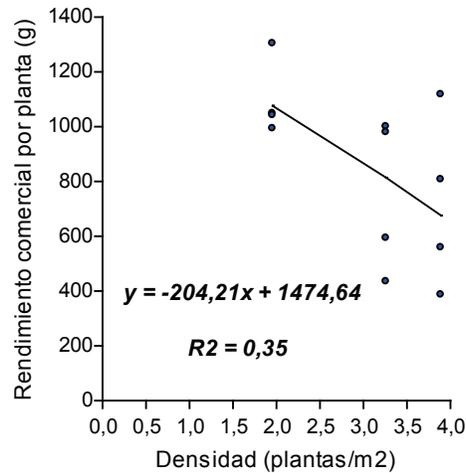


Figura 16. Regresión lineal del rendimiento comercial por planta versus la densidad de siembra para los tratamientos con poda a 1 tallo.

La correlación entre la densidad de siembra y el porcentaje de sólidos solubles totales fue negativa y significativa para el tratamiento con poda a 2 tallos ($r = -0,64$; $R^2 = 0,41$) (cuadro 6, figura 17); pero fue no significativa para el total de tratamientos, y para los tratamientos con poda a 1 tallo y sin poda.

Cuadro 6. Coeficientes de correlación de Pearson entre densidad de siembra y porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix) en melón Honey Dew.

Tratamiento	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total	-0,25	ns	-
Poda a 1 tallo	-0,13	ns	-
Poda a 2 tallos	-0,64	*	0,41
Sin poda	-0,06	ns	-

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

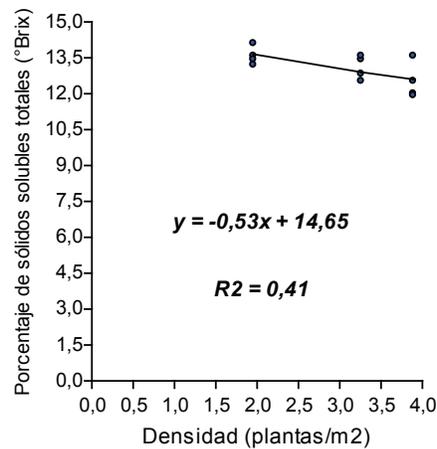


Figura 17. Regresión lineal del porcentaje de sólidos solubles totales versus la densidad de siembra para los tratamientos con poda a 2 tallos.

La disminución en los valores obtenidos en el porcentaje de sólidos solubles totales, conforme aumentó la densidad de siembra en el tratamiento con poda a 2 tallos, es similar a lo encontrado por varios investigadores [19] [20] [21]. El incremento en el contenido de carbohidratos (°Brix) está relacionado con el incremento en el área foliar, como resultado de una mayor separación entre plantas (menor densidad de siembra), es decir, una menor competencia entre ellas [21]. Sin embargo, otros autores no encontraron diferencias significativas para esta variable al evaluar diferentes densidades de siembra [14] [13] [17]; y otros investigadores hallaron que, para un híbrido de melón, el porcentaje de sólidos solubles totales aumentó al incrementarse la densidad de siembra [21].

En cuanto a la correlación entre la densidad de siembra y la edad al inicio de la cosecha, el valor hallado fue positivo y altamente significativo para el total de tratamientos ($r = 0,55$; $R^2 = 0,30$) (cuadro 7, figura 18), así como para el tratamiento sin poda ($r = 0,98$; $R^2 = 0,96$) (figura 19); pero fue no significativo para los tratamientos con poda a 1 tallo y a 2 tallos.

Otros investigadores no encontraron diferencias en la edad al inicio de la cosecha, al evaluar diferentes densidades de siembra en melón tipo Cantaloupe [19] [22].

Cuadro 7. Coeficientes de correlación de Pearson entre densidad de siembra y edad al inicio de la cosecha (ddt) en melón Honey Dew.

Tratamiento	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total	0,55	**	0,30
Poda a 1 tallo	0,55	ns	-
Poda a 2 tallos	0,55	ns	-
Sin poda	0,98	**	0,96

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

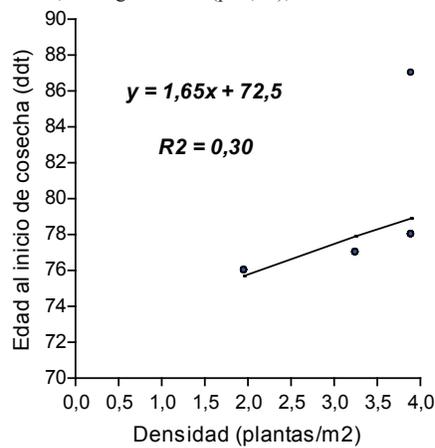


Figura 18. Regresión lineal de la edad al inicio de la cosecha versus la densidad de siembra para el total de tratamientos evaluados.

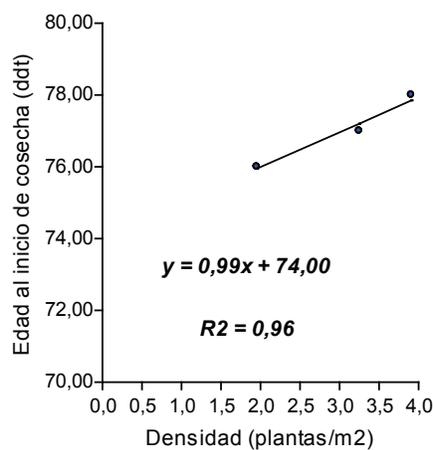


Figura 19. Regresión lineal de la edad al inicio de la cosecha versus la densidad de siembra para los tratamientos sin poda.

En todos los casos, las correlaciones fueron no significativas, entre la densidad de siembra y las siguientes variables: peso del fruto (cuadro 8); rendimiento por área (cuadro 9); firmeza de la pulpa del fruto (cuadro 10); y número total de frutos por metro cuadrado (cuadro 11).

Cuadro 8. Coeficientes de correlación de Pearson entre densidad de siembra y peso del fruto (g) en melón Honey Dew.

Tratamiento	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total	-0,03	ns	-
Poda a 1 tallo	0,50	ns	-
Poda a 2 tallos	-0,32	ns	-
Sin poda	-0,32	ns	-

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

Cuadro 9. Coeficientes de correlación de Pearson entre densidad de siembra y rendimiento por área (ton/ha) en melón Honey Dew.

Tratamiento	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total	0,19	ns	-
Poda a 1 tallo	0,30	ns	-
Poda a 2 tallos	0,15	ns	-
Sin poda	0,14	ns	-

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

Cuadro 10. Coeficientes de correlación de Pearson entre densidad de siembra y firmeza de la pulpa del fruto (N) en melón Honey Dew.

Tratamiento	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total	0,09	ns	-
Poda a 1 tallo	0,05	ns	-
Poda a 2 tallos	0,17	ns	-
Sin poda	0,25	ns	-

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

Cuadro 11. Coeficientes de correlación de Pearson entre densidad de siembra y número total de frutos por m² en melón Honey Dew.

Tratamiento	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total	0,16	ns	-
Poda a 1 tallo	0,12	ns	-
Poda a 2 tallos	0,19	ns	-
Sin poda	0,23	ns	-

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

Por lo tanto, no se presentaron diferencias significativas en el rendimiento total ni comercial por área entre los diferentes tratamientos de densidad de siembra. Estos resultados son contrarios a los obtenidos por otros investigadores, quienes sí hallaron un mayor rendimiento de melón por área al aumentar la densidad de siembra [10] [11] [12] [13] [14].

Conclusiones

Se concluye que, en melón Honey Dew manejado con cualquiera de los tipos de poda evaluados, el uso de una mayor densidad de siembra provoca una disminución en el número de frutos (totales y comerciales) por planta, y en el rendimiento total y comercial por planta.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de Cristina Arguedas, Julio Vega, Carlos González y Andrés Oviedo en el trabajo de campo, y de Mario Monge en la revisión de la traducción del resumen al idioma inglés. Asimismo, agradecen el financiamiento recibido por parte de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica para la realización de este trabajo.

Referencias

- [1] J. M. Torres, «Los tipos de melón comerciales,» de *Melones*, España, Ediciones de Horticultura, 1997, pp. 13-20.
- [2] J. Reche, Cultivo intensivo del melón, Madrid, España: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2007.
- [3] J. E. Monge-Pérez, «Producción y exportación de melón (*Cucumis melo*) en Costa Rica,» *Tecnología en Marcha*, vol. 27, n° 1, pp. 93-103, 2014.
- [4] P. F. Vargas, R. Castoldi, H. C. O. Charlo y L. T. Braz, «Qualidade de melão rendilhado (*Cucumis melo* L.) em função do sistema de cultivo,» *Ciência e Agrotecnologia*, vol. 32, n° 1, pp. 137-142, 2008.
- [5] S. R. Martins, R. M. Peil, J. E. Schwengber, F. N. Assis y M. E. G. Mendez, «Produção de melão em função de diferentes sistemas de condução de plantas em ambiente protegido,» *Horticultura Brasileira*, vol. 16, n° 1, pp. 24-30, 1998.
- [6] J. E. Monge-Pérez, «Evaluación preliminar de 201 genotipos de ocho diferentes hortalizas (berenjena, chile dulce, zucchini, ayote, sandía, pepino, tomate y melón) cultivados bajo invernadero en Costa Rica,» de *La investigación en Guanacaste II*, San José, Costa Rica, Editorial Nuevas Perspectivas, 2016, pp. 277-300.
- [7] B. Santos, H. Obregón-Olivas y T. Salamé-Donoso, «Producción de hortalizas en ambientes protegidos: estructuras para la agricultura protegida,» University of Florida, IFAS Extension, UF Department of Horticultural Sciences, Florida, Estados Unidos, 2010.
- [8] T. Alvarado-Sánchez y J. E. Monge-Pérez, «Efecto de la aplicación de bioactivadores y del raleo manual de frutos sobre el rendimiento y la calidad de melón (*Cucumis melo* L.) bajo cultivo protegido en Costa Rica,» *Tecnología en Marcha*, vol. 28, n° 4, pp. 15-25, 2015.
- [9] M. L. Gómez-Guillamón, R. Camero y J. Gonzáles-Fernández, «El melón en invernadero,» de *Melones*, Barcelona, España, Ediciones de Horticultura S. L., 1997, pp. 67-77.
- [10] H. Nerson, «Effects of population density on fruit and seed production in muskmelons,» *Acta Horticulturae*, vol. 492, pp. 65-70, 1999.
- [11] F. H. Pereira, I. Nogueira, J. Pedrosa, M. Negreiros y F. Bezerra-Neto, «Poda da haste principal e densidade de cultivo na produção e qualidade de frutos em híbridos de melão,» *Horticultura Brasileira*, vol. 21, n° 2, pp. 191-196, 2003.
- [12] D. Ban, S. Goreta y J. Borosic, «Plant spacing and cultivar affect melon growth and yield components,» *Scientia Horticulturae*, vol. 109, pp. 238-243, 2006.
- [13] J. C. Rodríguez, N. L. Shaw y D. J. Cantliffe, «Influence of plant density on yield and fruit quality of greenhouse-grown galia muskmelons,» *Hort Technology*, vol. 17, n° 4, pp. 580-585, 2007.

- [14] J. M. Díaz-Alvarado y J. E. Monge-Pérez, «Producción de melón (*Cucumis melo* L.) en invernadero: efecto de poda y densidad de siembra,» *Revista Posgrado y Sociedad*, vol. 15, n° 1, pp. 1-12, 2017.
- [15] FAO, El cultivo protegido en clima mediterráneo, Vols. %1 de %2Estudios FAO Producción y Protección Vegetal, No. 90, Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2002.
- [16] J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, «Melón (*Cucumis melo* L.) cultivado bajo invernadero: correlaciones entre variables,» *Tecnología en Marcha*, vol. 32, n° 1, pp. 134-150, 2019.
- [17] F. Kultur, H. C. Harrison y J. E. Staub, «Spacing and genotype affect fruit sugar concentration, yield, and fruit size of muskmelon,» *HortScience*, vol. 36, n° 2, pp. 274-278, 2001.
- [18] J. C. García, Z. F. Rodríguez y J. G. Lugo, «Efecto del cultivar y la distancia entre plantas sobre el comportamiento agronómico y rendimiento del melón,» *Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)*, vol. 23, pp. 443-452, 2006.
- [19] J. M. Díaz-Alvarado y J. E. Monge-Pérez, «Efecto de la poda y la densidad de siembra sobre el rendimiento y calidad de melón Cantaloupe (*Cucumis melo* L.) cultivado bajo invernadero,» *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, vol. 11, n° 1, pp. 21-29, 2017.
- [20] H. Nerson, «Relationship between plant density and fruit and seed production in muskmelon,» *Journal of the American Society for Horticultural Science*, vol. 127, n° 5, pp. 855-859, 2002.
- [21] J. C. García, Z. F. Rodríguez, J. G. Lugo y V. Rodríguez, «Efecto del cultivar y distancia entre plantas sobre características físico-químicas del fruto del melón (*Cucumis melo* L.),» *Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)*, vol. 26, pp. 141-158, 2009.
- [22] D. Casaroli, E. B. Fagan, O. S. Santos, D. C. Garcia, S. Sinchak y C. Riffel, «Influência do espaçamento e densidade de frutos por planta em meloeiro hidropônico,» *Horticultura Brasileira*, vol. 22, n° 2, Suplemento 2, pp. 1-6, 2004.

Caracterización morfológica de un lecho de recubrimiento de tabletas farmacéuticas mediante un algoritmo de visión artificial

Morphological characterization of a pharmaceutical tablet coating bed using an artificial vision algorithm

Joel Jesús Alpizar-Castillo¹, Mac Arturo Murillo-Fernández²

Fecha de recepción: 3 de abril de 2020
Fecha de aprobación: 10 de agosto de 2020

Alpizar-Castillo, J.J; Murillo-Fernández, M.A. Caracterización morfológica de un lecho de recubrimiento de tabletas farmacéuticas mediante un algoritmo de visión artificial. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-3 Julio-Setiembre 2021. Pág 51-60.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5032>



- 1 Área Académica de Ingeniería Mecatrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: Joel.AlpizarCastillo@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-1238-4430>
- 2 Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: macarturo61@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-6913-3472>

Palabras clave

Morfología tabletas; recubrimiento de tabletas; sistema de visión artificial.

Resumen

La industria farmacéutica se encuentra en la búsqueda constante de métodos de optimización de sus procesos. En la presente investigación se desarrolló un sistema de visión que permite caracterizar morfológicamente el lecho de tabletas farmacéuticas en el proceso de recubrimiento. Como resultado, se diseñó un algoritmo de visión artificial que permite cuantificar las tabletas presentes en la imagen y determinar el área de cada una mediante el uso de la transformada de Hough y el filtro de Canny, partiendo de un modelo plano y estático del lecho de recubrimiento de tabletas farmacéuticas. Se obtuvo una aproximación de la posición angular de las tabletas farmacéuticas respecto a eje óptico de la cámara, según la cantidad de capas de tabletas en el lecho.

Keywords

Artificial vision system; tablet coating; tablet morphology.

Abstract

The pharmaceutical industry is constantly searching for methods to optimize its processes. In the present investigation was developed a vision system that allows to morphologically characterize the bed of pharmaceutical tablets during the coating process. As a result, an artificial vision algorithm was designed, which allows to quantify the tablets shown in the image and determine the area of each one, through the use of the Hough transformation and the Canny filter, based on a flat and static model of the coating bed of pharmaceutical tablets. An approximation of the angular position of the pharmaceutical tablets with respect to the optical axis of the camera was obtained, according to the number of layers of tablets in the coating bed.

Definición del problema

Un elemento clave en la dosificación de medicamentos por parte de industria farmacéutica son los encapsulados o “tabletas”, cuyo proceso de fabricación, por lo general, implica una cobertura. El proceso anterior se realiza para cubrir algunas características del núcleo, como sabor, olor, textura y fragilidad, entre otros [1].

Esta cobertura se realiza en un tambor en el que se hacen girar las tabletas, dentro del cual una pistola dispersa una mezcla de recubrimiento pigmentado al lecho de tabletas. El color resultante y el grosor del recubrimiento se determinan, *a priori*, en función del tiempo que permanezcan las tabletas girando en el bombo o tambor de recubrimiento [2]. De este modo, la posición angular de las tabletas respecto al eje axial de la pistola tiene un papel importante en la eficiencia del proceso de recubrimiento, por lo que una cuantificación morfológica del acomodo de las tabletas permitiría optimizar el proceso por medio de modelos de simulación, para la implementación de sistemas automatizados en la industria farmacéutica, según las recomendaciones de la FDA, [3].

El control de calidad visual en estos procesos, por lo general es de naturaleza subjetiva, y requiere detener el proceso, extraer las muestras y analizar el aspecto del producto resultante (color, grosor de la capa, acabado, entre otros), por lo que la implementación de un método objetivo para el control de calidad sería de gran utilidad [4]. Doerr y sus colegas mencionan

en [5] que es común el uso de tomografía micro-enfocada para analizar la calidad estructural y la homogeneidad de la muestra. A pesar de lo anterior, resultados experimentales sobre el cambio de color producto de la aspersion de las tabletas no se encontraron en la literatura hasta el trabajo de Murillo *et. al.* presentado en [1], [4] y [6].

Antes de proponer un sistema de control de calidad completo, es necesario determinar el comportamiento de una de las variables más importantes, la variación morfológica de las tabletas durante el proceso de recubrimiento, que incluye no solo el aumento de tamaño producto del recubrimiento, y los posibles daños superficiales, sino que también incluye los diferentes cambios de posición y forma, producto de la rotación en el bombo de recubrimiento, que deberían ser modelados y distinguidos por cualquier sistema de visión artificial.

En esta investigación, se propone un algoritmo de visión artificial que, partiendo de las imágenes fotográficas de un modelo estático simplificado lecho de recubrimiento del lecho de recubrimiento de tabletas, que permite caracterizar morfológicamente su distribución, contribuyendo en trabajos como el desarrollado en [6]. El desarrollo del algoritmo propuesto posibilita el desarrollo de un sistema de visión artificial de alta velocidad que permitiría el análisis en tiempo real del comportamiento morfológico de las tabletas durante el proceso de cobertura.

Antecedentes

Como se menciona en [7], los procesos de recubrimiento de tabletas farmacéuticas han probado ser un desafío dentro del contexto del control de calidad industrial producto de la variabilidad producto de los recubrimientos por aspersion aleatoria. Los principales métodos para caracterizar las capas de recubrimiento se mencionan en [8], destacando: microscopía de fuerza atómica, microscopía láser confocal, espectroscopía fotoelectrónica de rayos X, resonancia paramagnética electrónica, espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, espectroscopía de ruptura inducida por láser y microscopía térmica, procesos que, si bien no son necesariamente destructivos, implican detener el proceso productivo para el análisis, lo que es contraproducente en procesos industriales automatizados [9].

Dentro de los esfuerzos por parte de la FDA por mejorar los procesos anteriormente descritos, surgen las guías ICH (*International Council for Harmonization of Technical Requirements for Pharmaceuticals for Human Use*), dada las evidentes oportunidades de mejora que presentan [10], ya que los procesos de control de calidad tradicionales implican la extracción y análisis de muestras [8], en lugar de poder analizar el proceso en tiempo real, como se propone en [7].

Planteamiento de la solución

Descripción del modelo

Se utilizó un modelado estático del lecho de recubrimiento de tabletas en el tambor durante el proceso de recubrimiento para simplificar su análisis, basado en la eventual utilización de una cámara de alta velocidad al momento de implementar el sistema propuesto. Para esto, se dispusieron las tabletas en una superficie plana, analizando tres casos independientes en cuanto a la cantidad de capas de tabletas (una, dos y tres capas), de modo que sea posible una generalización del algoritmo, independientemente del número de capas en el lecho de recubrimiento.

Para la toma de las fotografías se utilizó una cámara Cognex 7200, con un lente de 16 mm, a una distancia de trabajo de 41 cm sobre un fondo plano y negro con una combinación de iluminación natural y fluorescente. Las imágenes utilizadas tienen unas dimensiones de 800 píxeles x 600 píxeles.

Descripción del algoritmo

Para el análisis de las fotografías, es importante aclarar que, como la cámara toma imágenes en escala de grises, no fue necesaria su conversión a una imagen monocromática; además, debido a que se contó con una cantidad limitada de tabletas, las fotografías tomadas como muestra contaron con lechos de entre una y tres capas de tabletas. Así, en primera instancia se les realizó una transformación gamma a las fotografías para mejorar su calidad, de modo que su procesamiento fuera más eficiente. En las figuras 1.a y 2.a se ejemplifican las imágenes tomadas como base para la evaluación del algoritmo ante lechos con diferente número de capas de tabletas (una capa en la figura 1 y tres capas en la figura 3).

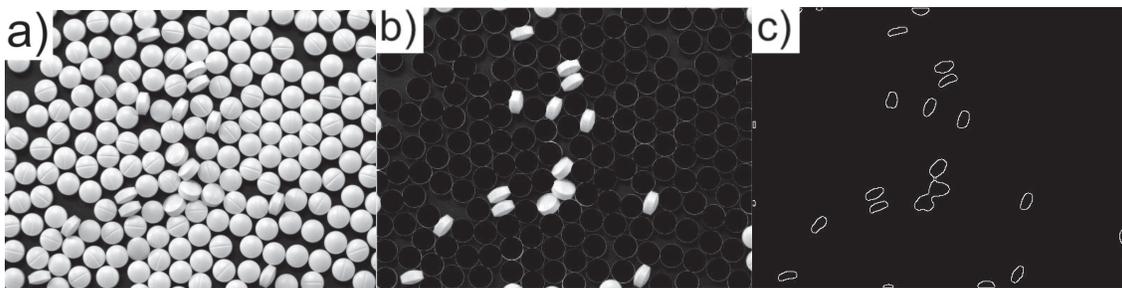


Figura 1. a) Imagen original con transformación gamma, una capa de tabletas. b) Imagen a la que se le eliminaron las tabletas completas, una capa de tabletas. c) Imagen con detección de contornos para las tabletas inclinadas, una capa de tabletas.

Para el análisis morfológico de la imagen se separaron las muestras en dos grandes conjuntos: las tabletas que se encuentran con su cara perpendicular a la cámara y aquellas que se encuentran de costado o con cierto ángulo de inclinación. Para el primer grupo, se modelaron las tabletas como círculos y se utilizó la transformada de Hough para la ubicación sus centros, almacenando sus radios en píxeles y eliminando las regiones de la imagen en las que se encontraban, insertando círculos negros con el centro y radio detectado para cada tableta, como se muestra en las figuras 1.b y 2.b.

Una vez eliminadas las tabletas perpendiculares de la imagen, para las tabletas que no se encontraban perpendiculares a la cámara, se utilizó un filtro de Canny como detector de contornos, con una umbralización y sensibilidad específicas, para identificarlas como elementos individuales y así determinar sus respectivas áreas, como se muestra en las figuras 1.c y 2.c.

La comparación de las áreas individuales de las tabletas, con el promedio de los círculos detectados, permitió obtener la distribución de las tabletas en el área perpendicular a la cámara. Nótese que, las áreas obtenidas se encuentran en número de píxeles, por lo que, fue necesaria la conversión a milímetros cuadrados, según las mediciones de las tabletas, tomando 7 mm como valor de referencia teórica para su diámetro.

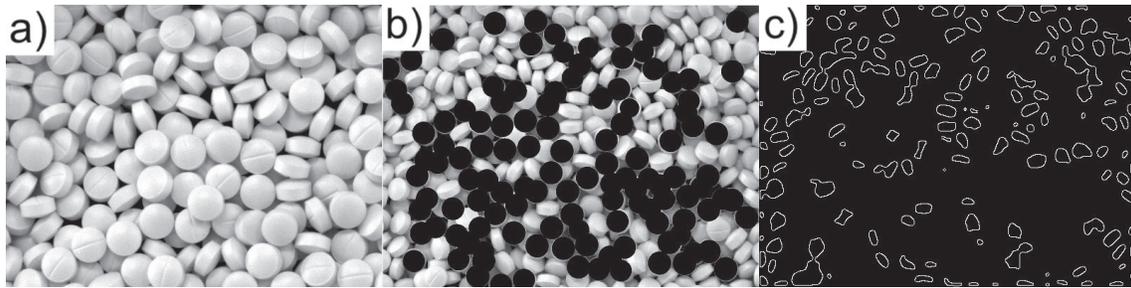


Figura 2. a) Imagen original con transformación gamma, tres capas de tabletas. b) Imagen a la que se le eliminaron las tabletas completas, tres capas de tabletas. c) Imagen con detección de contornos para las tabletas inclinadas, tres capas de tabletas.

Resultados

Al ejecutar el algoritmo, por la naturaleza de las funciones implementadas, se debieron ajustar los siguientes parámetros para obtener un funcionamiento idóneo del algoritmo. Se encontró experimentalmente que, una sensibilidad del 95 % y un límite de umbralización de 150, se diferencian las tabletas del fondo de manera óptima. Por su parte, un rango de radios de 20 píxeles a 25 píxeles permitió identificar con mayor precisión las tabletas perpendiculares a la cámara.

Teniendo lo anterior en cuenta, se ejecutó el algoritmo con fotografías de una lecho con una, dos y tres capas de tabletas, permitiendo un conteo exitoso de las tabletas. Como es intuitivo, al incrementar el número de capas, la cantidad de tabletas perpendiculares a la cámara disminuye y su distribución se torna más compleja, dificultando el cálculo del área de las tabletas inclinadas, según puede apreciarse en la figura 2, donde se muestran las etapas para una fotografía de el lecho con tres capas de tabletas. Todas las fotografías utilizadas se muestran en el cuadro A.1 en la sección de Anexos.

Por cada prueba, se utilizaron cinco fotografías para el lecho de recubrimiento de tabletas con cada número de capas. De este modo, se obtuvo un promedio general de 222 tabletas por fotografía, y la distribución para cada número de capas se presenta en la figura 3.

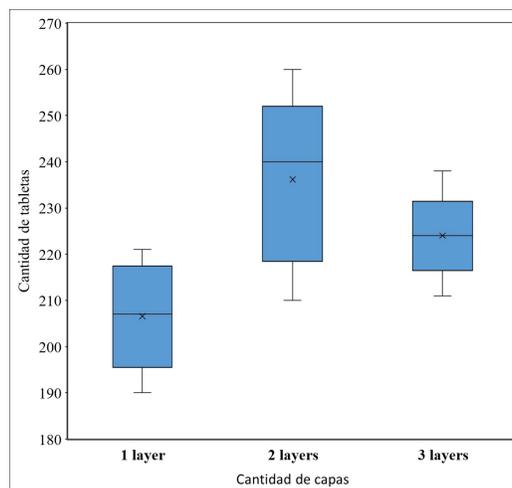


Figura 3. Distribución del conteo de tabletas por número de capas.

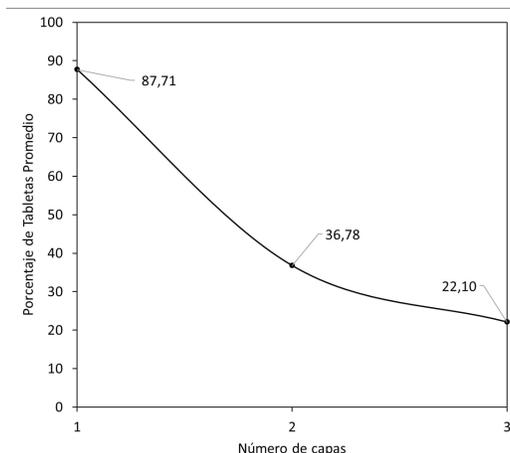


Figura 4. Número de tabletas perpendiculares en función del número de capas.

Del mismo modo, en el cuadro 1 se muestra el porcentaje promedio de tabletas por número de capas que se encuentran totalmente perpendiculares al eje óptico, al igual que el promedio del área de las tabletas perpendiculares con sus respectivos porcentajes de error. Este se calculó en función de un radio teórico de 7 mm. Un mayor detalle en cuanto a las áreas promedio y su respectivo porcentaje de error, definido por la diferencia entre el área detectada por el algoritmo, y el área teórica de las tabletas, puede encontrarse en el cuadro A.2. en la sección de Anexos.

El algoritmo implementado se ejecutó en una computadora con un procesador Intel Core i5 de cuarta generación, con 16 GB de RAM, obteniendo tiempos de respuesta del algoritmo del orden de 1 s por imagen.

Cuadro 1. Datos promedio obtenidos por capa.

Número de capas	Porcentaje de tabletas perpendiculares	Área de las tabletas perpendiculares	Porcentaje de error
1	87.7 %	36,4 mm ²	5,4 %
2	36.8 %	37,3 mm ²	3,0 %
3	22.1 %	38,8 mm ²	1,4 %

Análisis de resultados

Al comparar las figuras 1 y 2, es notorio que la complejidad de la tarea computacional aumenta notablemente dado que, al presentarse más de una capa de tabletas, estas no se distribuyen de una manera uniforme ante la cámara. En cambio, aumenta la variabilidad de ángulo respecto al eje óptico en las tabletas, lo que produce efectos de sombras e iluminación no uniforme.

Los datos mostrados en el cuadro 1 demuestran que, a mayor cantidad de capas, la medición del área de las tabletas perpendiculares muestra ser más precisa en cuanto a la comparación con el área teórica. Este fenómeno podría justificarse basado en que se tiene una menor variabilidad e las mediciones dado que la muestra es menor, sumado al hecho de que, al aumentar las sombras los contornos de los objetos en la imagen se define mejor, facilitando la identificación de los mismos, Por otra parte, este fenómeno compromete los cálculos de las áreas de las tabletas rotadas, debido a que el fondo ya no es visible, por lo tanto, la distribución de pixeles por tono de gris se hace más homogénea y la umbralización pierde precisión.

Por su parte, en la figura 4 se muestra la tendencia del número de tabletas perpendiculares en función del número de capas mostradas en el cuadro 1. Como puede verse, la variación en los porcentajes entre capas tiende a disminuir conforme aumenta el número de capas.

Conclusiones

Dados los datos obtenidos, se demuestra la eficacia del método para la obtención de datos experimentales, permitiendo obtener una primera aproximación al comportamiento del lecho de recubrimiento de tabletas en función del número de capas.

Debido a la naturaleza estocástica del acomodo de las tabletas en el lecho, es posible que, al aumentar la cantidad de capas, la afcción de la cantidad de capas inferiores sobre la primera capa tienda a converger posterior a un número determinado de capas. Es decir, se plantea la hipótesis que la variación en la cantidad de tabletas perpendiculares a la cámara al pasar de un número determinado al siguiente será despreciable tras un número determinado de capas, pero este estudio sobrepasa las limitaciones propuestas para esta investigación y se plantea como trabajo futuro, evaluar el comportamiento de lechos con una mayor cantidad de capas de tabletas, así como el desarrollo de un modelo de simulación que tome en cuenta la posición de las mismas.

El tiempo de ejecución del algoritmo *a priori* podría presentar una limitante en cuanto a la ejecución en tiempo real del algoritmo de caracterización, no obstante, el tiempo de ejecución del algoritmo en una computadora diseñada para análisis de datos y dedicada únicamente al proceso será mucho menor. Asimismo, el algoritmo planteado podrá ser sujeto de optimizaciones posteriores, de modo que el tiempo de ejecución del algoritmo en tiempo real no comprometa la funcionalidad del sistema de caracterización una vez implementado en un proceso real.

Agradecimientos

Se le agradece al Dr. Juan Luis Crespo Mariño coordinador del Laboratorio de Inteligencia Artificial para las Ciencias Naturales (LIANA), al Dr. Ernesto Montero Zeledón coordinador del Laboratorio Espectroscopía Molecular, Imagen y Color (LEMIC) del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), por su constante apoyo y guía a lo largo de la presente investigación, y al Dr. Jorge Pacheco Molina el Instituto de Investigaciones Farmacéuticas (INIFAR) de la Facultad de Farmacia, de la Universidad de Costa Rica (UCR) por su apoyo en la fabricación de los comprimidos recubiertos.

Referencias

- [1] M. Murillo, *et. al.* "Colour evolution during a coating process of pharmaceutical tablet cores by random spraying", *Color Res Appl.* Vol 44, 160-167, 2019.
- [2] S. Muschert "Polymeric coatings for solid dosage forms: characterization and optimization", tesis de doctorado, Universidad de Lille, Francia, 2008.
- [3] FDA. Department of Health and Human Services U.S. Food and Drug Administration. "Guidance for Industry PAT – A Framework for Innovative Pharmaceutical Development, Manufacturing, and Quality Assurance". 2004.
- [4] M. Murillo-Fernández, D. Gutiérrez-Fallas, J. Pacheco-Molina, & E. Montero-Zeledón, "Physical and optical characterization of solid dosage forms coatings" presentado en *Simposio en Ciencia de Materiales Avanzados y Nanotecnología*, San José, Costa Rica, diciembre, 2016.
- [5] F. Doerr *et al.* "Morphological Characterization of Solid Pharmaceutical Products using X-ray tomography", presentado en *Micro-CT User Meeting 2017* Bruselas, BE, junio, 2017.

- [6] M. Murillo-Fernández, D. Gutiérrez-Fallas, J. Pacheco-Molina, & E. Montero-Zeledón. “Caracterización de tabletas farmacéuticas recubiertas por el método de aspersion aleatoria”, *Tecnologías en Marcha*, vol 32 Especial, 53-62, marzo 2019.
- [7] M. Murillo-Fernández “Caracterización y modelización del recubrimiento de tabletas farmacéuticas, para el desarrollo de soluciones de reconocimiento óptico-visible”, tesis de doctorado, Instituto Tecnológico de Costa Rica-Universidad de Costa Rica, 2020.
- [8] A. J. Fitzgerald, B. E. Cole & P. F. Taday “Nondestructive Analysis of Tablet Coating Thicknesses Using Terahertz Pulsed Imaging”, *Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 9(1), 177-183, 2005.
- [9] O. V. García “La calidad desde el diseño: principios y oportunidades para la industria farmacéutica” *Estudios Gerenciales*, vol. 31, 68-78, 2015.
- [10] D. Reitter. “FDA Draft Guidance Document Comments on Use of Inks, Pigments, Flavors and Taggants to Guard Against Counterfeiting”. ColorCon Ing.

Anexos

Imágenes utilizadas para las pruebas

Para los distintos análisis y calibración del algoritmo se utilizaron cinco imágenes para cada número de capas de tabletas, estas se muestran a continuación en las figuras A.1, A.2 y A.3.

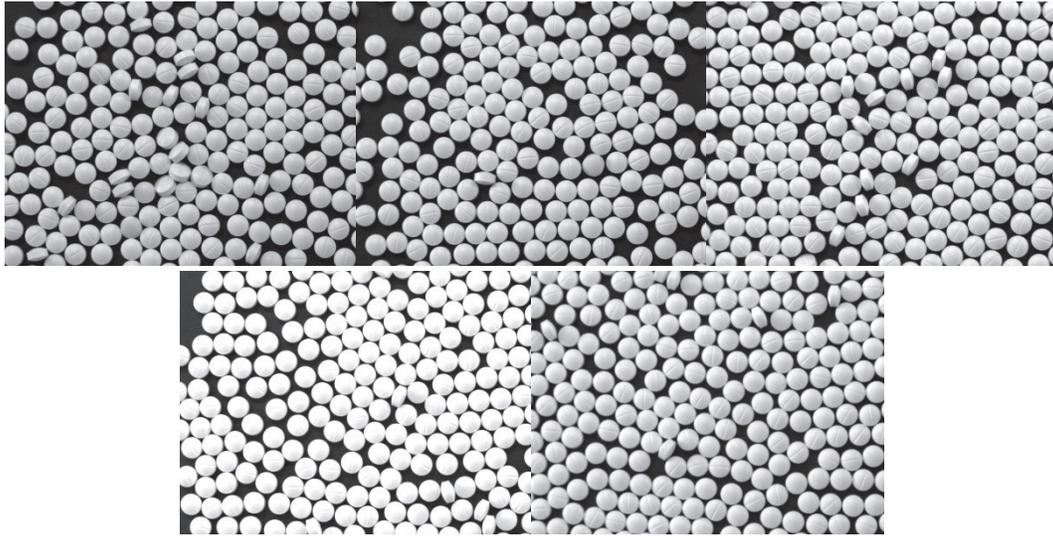


Figura A.1. Imagen de muestra 1, 2, 3, 4 y 5 con una capa de tabletas.

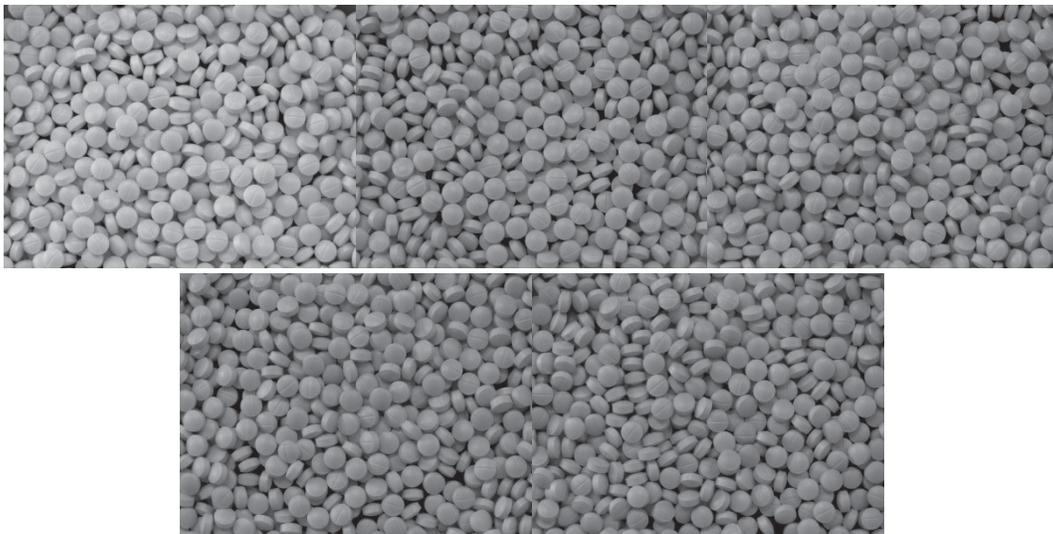


Figura A.2. Imagen de muestra 1, 2, 3, 4 y 5 con dos capas de tabletas.

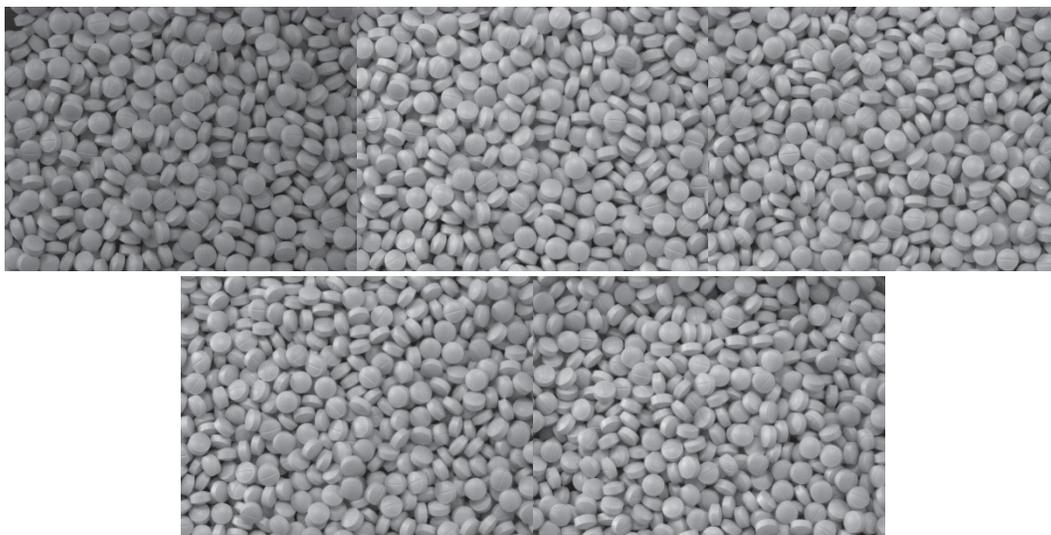


Figura A.3. Imagen de muestra 1, 2, 3, 4 y 5 con tres capas de tabletas.

Resultados obtenidos por capa

A continuación, en el cuadro A.2 se muestran la totalidad de los datos encontrados para cada una de las fotografías tomadas.

Cuadro A.2. Datos promedio obtenidos por capa.

Número de capas	Número de muestra	Tabletas encontradas	Tabletas perpendiculares encontradas	Área de las tabletas perpendiculares	Porcentaje de error (%)
1	1	201	172	36,4	5,42
1	2	190	168	36,3	5,68
1	3	221	192	36,3	5,68
1	4	207	183	36,4	5,42
1	5	214	191	36,6	4,90
2	1	210	85	37,6	2,30
2	2	260	93	36,9	4,12
2	3	240	88	37,1	3,60
2	4	244	84	37,5	2,56
2	5	227	83	37,5	2,56
3	1	224	50	38,1	1,00
3	2	225	57	37,9	1,52
3	3	222	48	37,7	2,04
3	4	238	44	37,9	1,52
3	5	211	48	38,8	0,8

Microgeneración de energía eólica en un entorno boscoso en Costa Rica: estudio de caso

Micro wind power generation in a Costa Rica's forested area: a case study

Karina Torres-Castro¹, Cindy Torres-Quirós²,
Gustavo Richmond-Navarro³

Fecha de recepción: 21 de abril de 2020
Fecha de aprobación: 18 de agosto de 2020

Torres-Castro, K; Torres-Quirós, C;
Richmond-Navarro, G. Microgeneración de energía eólica en un entorno boscoso en Costa Rica: estudio de caso. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-3 Julio-Setiembre 2021. Pág 61-69.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5063>



- 1 Profesión Ingeniería Química. departamento de Ingeniería Electrica y de Computacion. Universidad de Virginia. Estados Unidos. Correo electrónico: kt2fe@virginia.edu
 <https://orcid.org/0000-0001-9959-6040>
- 2 Profesión Ingeniería Química. Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico cindy.torres@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-8312-0814>
- 3 Profesión Ingeniero en Mantenimiento Industrial. Escuela de Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico grichmond@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-5147-5952>

Palabras clave

Turbina eólica; zona boscosa; producción energética; energía renovable; estudio de caso.

Resumen

Se presenta un estudio de caso en Costa Rica sobre instalación y medición de la producción energética de una turbina eólica. Se trata de un aerogenerador de eje horizontal, 5 aspas y 3 kW, instalado a 18 metros de altura en una zona boscosa. Se selecciona un micro beneficio de café y se calcula la producción energética teórica en el punto de interés. Posteriormente se realiza la instalación de la turbina y se mide su producción energética. También se instala una estación meteorológica para registrar la velocidad del viento mensual promedio.

Durante los ocho meses que se extendió el estudio, se obtuvo una generación distribuida de 225,76 kWh. Lo que implicó tan solo un 37,75 % de la cifra estimada de 598 kWh según modelos teóricos. Se concluye que el aerogenerador de 3 kW utilizado no se ajusta a las condiciones técnicas del sitio en estudio. Además, que la predicción del recurso eólico sin mediciones en sitio es poco representativa para el punto geográfico de interés.

Keywords

Wind turbine; forested area; energy production; renewable energy; case study.

Abstract

This work aims to describe a case study on the installation and energy assessment of a micro wind turbine as a renewable energy alternative. The system consisted of a horizontal axis wind turbine, five blades, and 3 kW. It was installed 18 meters above ground level in a forested area. A micro coffee producer was selected, and the theoretical energy generation at the site area was estimated. Subsequently, the turbine was installed, and its energy production is measured. A weather station was also installed to record the average monthly wind speed.

During the eight months that the study was conducted, it was obtained 225,76 kWh. According to theoretical models, it meant 37,75% less energy of the expected 598 kWh. It is concluded that the 3 kW wind turbine rated wind speed does not match the actual wind speed in the specific location. In addition, the prediction of the wind resource could be improved with on-site measurements.

Introducción

El viento es una importante fuente de energía en Costa Rica y el mundo. La potencia eólica instalada a nivel global, para finales del 2018 alcanzó 597 GW [1]. En 2015 se alcanzó en el mundo una cifra de 945 MW en turbinas eólicas de pequeña escala, alrededor de 1 millón de unidades instaladas [2]. En el caso de Costa Rica, actualmente existen 18 parques eólicos con un total de 343 turbinas, con potencias que van de los 410 kW hasta los 3 MW, para un total instalado de 407 MW, lo que representa más del 10 % de la matriz eléctrica nacional [3], [4], [5], [6].

En cuanto a turbinas eólicas de pequeña escala, definidas según la *International Electrotechnical Commission* IEC 61400-2 como aquellas con rotores de menos de 8 metros de radio [7], son poco comunes en Costa Rica. Se pueden citar aerogeneradores de pequeña escala de eje horizontal como los instalados en 2019 en el colegio COVAO de Cartago, o las turbinas de eje vertical instaladas para iluminación, junto con paneles solares, en Grecia de Alajuela [8].

La escasa cantidad de turbinas eólicas de pequeña escala instaladas en Costa Rica, contrasta con lo indicado en [9], en cuanto a que son una fuente de energía confiable, incluso con valor socio económico en los países en desarrollo. Esto puede ser debido a su costo inicial y coste de mantenimiento, así como bajo desempeño aerodinámico [10]. Otra posible razón es que en el mercado es común encontrar turbinas eólicas de pequeña escala que ofrecen una curva de desempeño mejor que el máximo posible [11], lo que se traduce en resultados muy por debajo de los esperados.

Existen estudios de caso de microgeneración eólica en países como Nueva Zelanda [12], Irán [13] y Turquía [14] donde las turbinas poseen una potencia entre 3 kW y 10 kW, así como otras investigaciones en la Unión Europea con turbinas de pequeña escala desde los 2,5 kW [15]. Según el mejor conocimiento de los autores, no se encuentra documentado un estudio de caso de la operación y rendimiento de una turbina eólica de pequeña escala en Costa Rica.

El objetivo de esta investigación es presentar, por vez primera en Costa Rica, la experiencia de la instalación de una micro turbina eólica de eje horizontal en un beneficio de café, mostrando los resultados experimentales de la velocidad del viento y del rendimiento del aerogenerador durante ocho meses.

Metodología

En primera instancia se define el punto de instalación de la micro turbina eólica que se analizará en este estudio de caso. Para el sitio se estima la velocidad del viento y se calcula la producción de energía teóricamente. Luego se instala un equipo de medición de velocidad del viento y un aerogenerador de 3 kW acoplado a la red eléctrica para medir y aprovechar la energía producida por la turbina.

Punto de instalación

Se definió como sitio para el estudio de caso el micro beneficio Undecaf, en San Isidro de León Cortés, Costa Rica. La ubicación en el país y una imagen satelital del punto exacto de instalación de la turbina se muestra en la figura 1, en las coordenadas $9^{\circ} 40' 29,75''$ N, $84^{\circ} 04' 51,19''$ W, con una elevación de 1669,1 m sobre el nivel del mar.

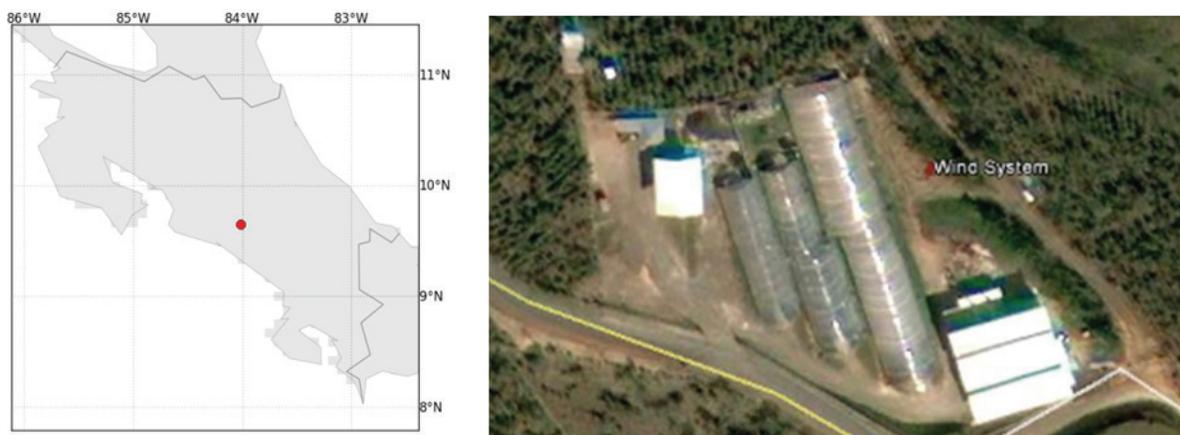


Figura 1. Punto de instalación de la turbina eólica.

Estimación del recurso eólico

Para estimar el recurso eólico en la localidad se utilizó como referencia la velocidad del viento a 50 metros de altura según datos de la NASA [16]. Considerando que la turbina operará a 18 metros, es necesario calcular la velocidad a esa altura sobre la superficie. Para ello se utilizó el perfil de velocidades logarítmica mostrada en la ecuación 1, que relaciona la velocidad a dos diferentes alturas sobre el suelo [17]:

$$V = V_r \left(\frac{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_r}{z_0}\right)} \right) \quad (1)$$

Donde V es la velocidad a la altura h , V_r es la velocidad de referencia a una altura h_r . En este caso la V_r es obtenida de los datos de la NASA con $h_r = 50$ m. El valor z_0 es conocido como longitud de rugosidad y es característico del terreno. Para esta investigación fue tomado del Centro de Estudio de los Recursos Energéticos CERRE, de la Universidad de Magallanes [18].

Cálculo de la producción de energía

La energía teórica que puede ser capturada por una turbina en operación se obtiene al multiplicar el tiempo de operación por la potencia capturada por la turbina en ese tiempo. Usualmente la energía no se calcula en las unidades estándar del Sistema Internacional, sino en kilowatt-hora (kWh), debido a que es la unidad de medida que emplean los distribuidores de potencia eléctrica en Costa Rica, como se muestra en ecuación 2.

$$E_{kWh} = P_{kW} t_h \quad (2)$$

Donde E_{kWh} es la energía en kWh, P_{kW} es la potencia capturada por la turbina en kW y t_h es el tiempo de operación a esa potencia, en horas.

La potencia teórica a la que operará la turbina se obtiene a partir de la potencia máxima contenida en el viento [19] y la eficiencia de la turbina, como se muestra en la ecuación 3.

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \eta \quad (3)$$

Donde P es la potencia (en W en este caso), ρ es la densidad del fluido (kg/m^3), A es el área del rotor (m^2), V es la velocidad del viento (m/s) y η es la eficiencia de la turbina.

Instalación de la turbina y mediciones

La medición de la velocidad del viento se realizó mediante la instalación de una estación meteorológica, que permite conocer la velocidad y dirección del viento además de la presión atmosférica, precipitación, humedad relativa y temperatura del sitio en estudio. Tanto el anemómetro como la turbina eólica se instalaron a 18 metros sobre el nivel del suelo.

Las características de la turbina eólica instalada se presentan en el cuadro 1. Dado que no se dispone de la curva de potencia del fabricante, pero sí de la indicación que la potencia máxima se da entre 13 m/s y 14 m/s, se calcula la eficiencia de la turbina considerando que los 3 kW de

potencia nominal son a una velocidad de viento de 13,5 m/s a nivel del mar. En este caso, se compara la potencia disponible en el viento con los 3 kW nominales de la turbina y se obtiene una eficiencia del 27,25 % para el aerogenerador.

Cuadro 1. Características del aerogenerador eólico.

Potencia	3000 W
Velocidad de arranque	2,5 m/s
Velocidad máxima	60 m/s
Número de aspas	5
Material de las aspas	Fibra reforzada de vidrio-nylon
Diámetro del rotor (m)	3,05
Material del generador	Aleación de aluminio en el cuerpo y acero inoxidable de precisión en el rotor.

Para la instalación de la turbina eólica, Coopesantos donó e instaló la torre, incluyendo la cimentación y los cables tensores. La compañía Purasol instaló propiamente la turbina en la torre y los demás componentes del sistema eólico. El personal de Undecaf se encargó de hacer los canales subterráneos que conectan la turbina con el lugar donde se encuentra el rectificador, la caja de disipación de calor y el inversor.

En la figura 2 se muestra el proceso de instalación de la turbina y en la figura 3 se aprecia la turbina en operación, en un entorno boscoso.

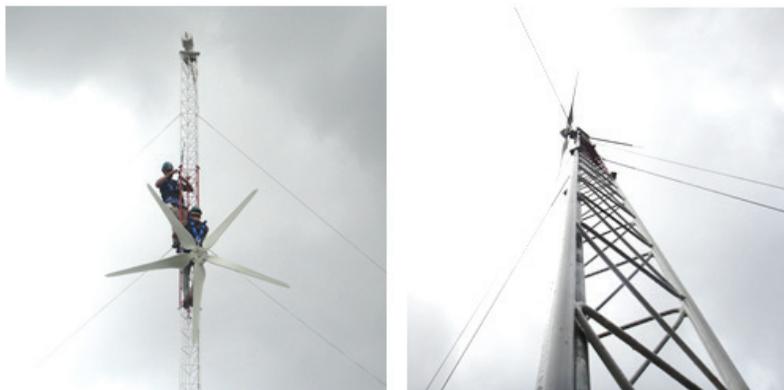


Figura 2. Proceso de instalación de la turbina eólica.

Una vez instalada la turbina eólica, Coopesantos fue el responsable de instalar un medidor bidireccional capaz de registrar la energía que se envía a la red por parte del generador eólico, así como la energía total consumida por el micro beneficio.



Figura 3. Turbina eólica de 3kW instalada en un entorno boscoso a 18 m de altura [20].

Resultados y discusión

El equipo estuvo a punto a partir del mes de julio de 2013, por lo que el periodo experimental se extiende desde ese mes hasta febrero de 2014.

Los resultados comparativos de la velocidad del viento medida experimentalmente y la estimada según la ecuación 1 con los datos de [16] se presentan en la figura 4. Destaca una sobre estimación del recurso eólico en el cálculo teórico. Se observa también que la tendencia si es capturada adecuadamente salvo en el mes de diciembre de 2013, cuando según la predicción teórica se esperaba un aumento en la velocidad promedio mensual, pero en el resultado experimental se obtuvo una reducción. Esta notable diferencia puede ser debida a los micro climas que se presentan en Costa Rica.

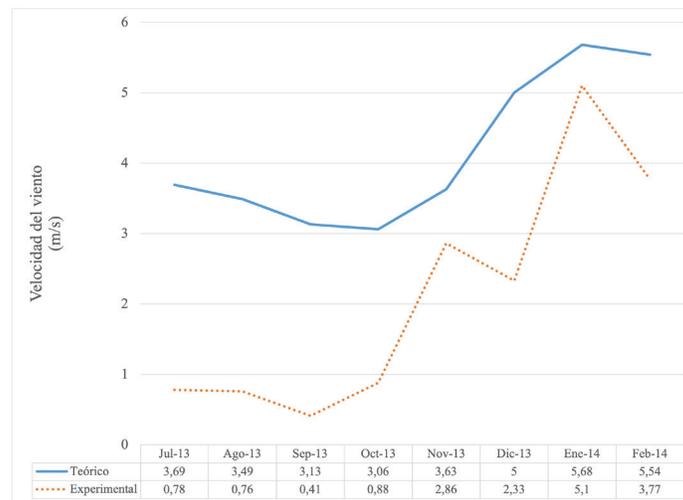


Figura 4. Resultados teóricos y experimentales de la velocidad del viento.

La captura de pantalla del software que censó la producción de energía de la turbina eólica se muestra en la figura 5. Nótese que en la figura 5 se utiliza el punto como separador decimal.

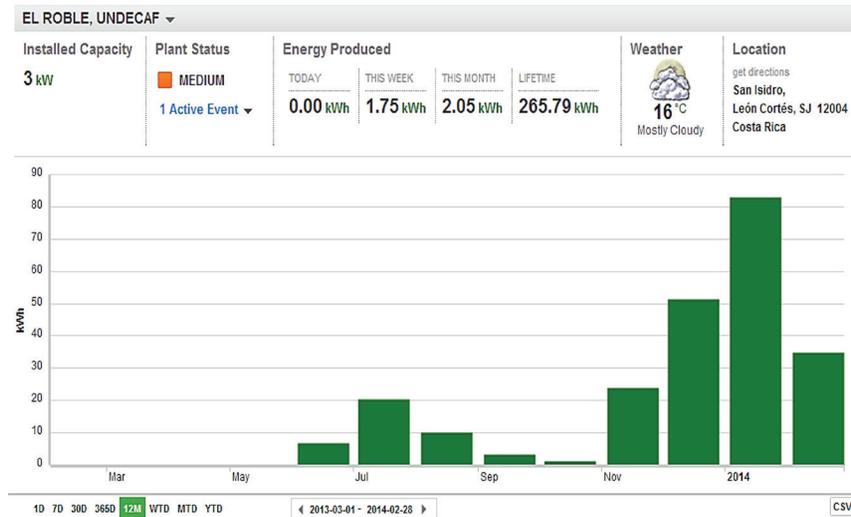


Figura 5. Captura de pantalla del software de censado del aerogenerador.

Los resultados comparativos de los datos experimentales de la energía entregada por la turbina eólica y los cálculos de la energía teórica según las ecuaciones 2 y 3 se presentan en la figura 6. Se evidencia que la producción de energía es mucho menor que la calculada teóricamente, lo cual obedece a que el recurso eólico es menor que el estimado, según los resultados de la velocidad del viento.

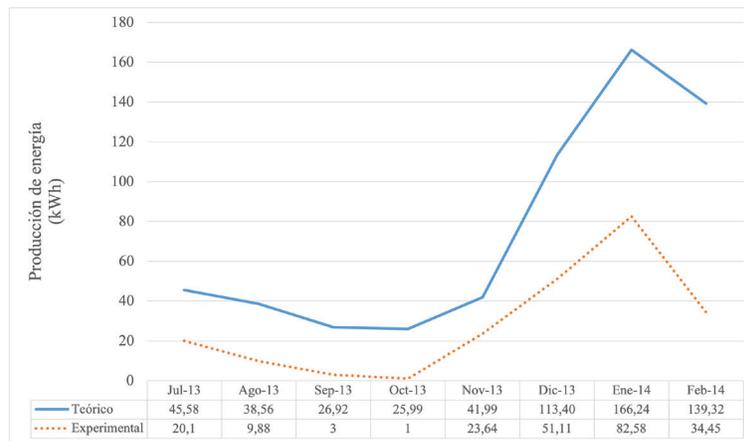


Figura 6. Resultados teóricos y experimentales de la producción de energía

Una vez más es posible notar que los resultados experimentales siguen la tendencia de los teóricos, sin embargo, la diferencia es abrumadora, en el mes de enero, por ejemplo, la producción de energía es de menos del 50 % de lo esperado, a pesar que según se muestra en la figura 4, en enero la predicción de velocidad de viento fue muy cercana al resultado experimental.

El total de energía obtenida experimentalmente durante los ocho meses fue de 225,76 kWh, tan solo un 37,75 % de la cifra esperada de 598 kWh.

Entre noviembre y febrero el micro beneficio tiene los máximos de producción y de consumo eléctrico. Una característica positiva de los resultados, tanto del recurso eólico como de la producción energética, es que sus valores máximos coinciden con el periodo de mayor demanda del micro beneficio.

Conclusiones

En esta investigación se presenta el funcionamiento real de una turbina eólica de pequeña escala en un ambiente boscoso, mediante un estudio de caso en un micro beneficio de café en Costa Rica. Producto del análisis teórico del recurso eólico y el posterior procesamiento de los resultados experimentales de la velocidad del viento y la potencia capturada por la turbina eólica, se proponen las siguientes conclusiones:

- Los datos de NASA junto con el modelo de perfil de viento logarítmico no reproducen de forma fiel la realidad del sitio, pues la velocidad del viento medida es mucho menor que la calculada.
- La producción de energía fue mucho menor que la esperada, tan solo se alcanzó el 37,75 % de los kWh calculados en total durante los ocho meses de estudio.
- Los resultados sugieren que el recurso eólico en entornos boscosos no puede ser calculado mediante proyecciones teóricas, sino que debe ser medido experimentalmente antes de realizar la inversión en una turbina eólica.
- La turbina eólica seleccionada posee una velocidad nominal que es mucho mayor que las velocidades promedio del sitio en estudio, por lo que se concluye que se requiere una turbina eólica cuya curva de potencia se ajuste a las condiciones técnicas del sitio.

Adicional a las conclusiones indicadas, vale destacar como lección aprendida, la necesidad de un adecuado sistema de puesta a tierra para el correcto funcionamiento de los inversores que transforman corriente directa entregada por el aerogenerador a corriente alterna propia de la red eléctrica.

Agradecimientos

Nuestro especial reconocimiento a la iniciativa “Energy and Climate Partnership of the Americas”, liderada por el Departamento de Estado de los Estados Unidos, cuya instancia proporcionó el financiamiento para el presente estudio, como parte del proyecto “Modelo Energético Sostenible: Caso de estudio Producción de Café en Centroamérica”. Extendemos además nuestro agradecimiento al micro beneficio Undecaf, a la empresa distribuidora de electricidad Coopesantos, por su participación y colaboración durante la experimentación.

Referencias

- [1] World Wind Energy Association, «Wind Power Capacity Worldwide Reaches 597 GW, 50,1 GW added in 2018,» 04 Junio 2019. [En línea]. Available: <https://wwindea.org/blog/2019/02/25/wind-power-capacity-worldwide-reaches-600-gw-539-gw-added-in-2018/>. [Último acceso: 01 Diciembre 2019].
- [2] World Wind Energy Association, «WWEA released latest global small wind statistics,» 02 Junio 2017. [En línea]. Available: <https://wwindea.org/blog/2017/06/02/wwea-released-latest-global-small-wind-statistics/>. [Último acceso: 02 Diciembre 2019].
- [3] G. Richmond-Navarro, G. Murillo-Zumbado, P. Casanova-Treto y J. F. Piedra-Segura, «Estado actual de la investigación sobre turbinas eólicas en Costa Rica,» *Tecnología en Marcha*, vol. 32, nº 2, pp. 54-67, 2019.
- [4] J. Garza, «Costa Rica supera los 400 megavatios de capacidad eólica instalada,» *La Reública*, 16 Enero 2019. [En línea]. Available: <https://www.larepublica.net/noticia/costa-rica-supera-los-400-megavatios-de-capacidad-eolica-instalada>. [Último acceso: 01 Diciembre 2019].
- [5] «Parque Eólico Cacao de Coopeguanacaste beneficiará a más de 20000 hogares guanacastecos,» *Periódico Mensaje*, 10 Enero 2019. [En línea]. Available: <https://www.periodicomensaje.com/cantoniales/3298-parque-eolico-cacao-de-coopeguanacaste-beneficiara-a-mas-de-20-000-hogares-guanacastecos>. [Último acceso: 01 Diciembre 2019].

- [6] «The Wind Power Wind Energy Market Intelligence.» [En línea]. Available: https://www.thewindpower.net/windfarm_es_27454_rio-naranjo.php. [Último acceso: 01 Diciembre 2019].
- [7] International Electrotechnical Commission (IEC), «IEC 61400-2. Wind turbines – Part 2: Small wind turbines,» vol. 3, p. 278, 2013.
- [8] Repretel, «Primeros postes de energía eólica se instalaron en Grecia,» 22 Noviembre 2018. [En línea]. Available: <http://www.repretel.com/actualidad/primeros-postes-energia-eolica--instalaron--grecia-134489>. [Último acceso: 01 Diciembre 2019].
- [9] A. Tummala, R. K. Velamati, D. K. Sinha, V. Indrāja y V. H. Krishna, «A review on small scale wind turbines,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 1351-1371, 2016.
- [10] W. M. Okita y K. A. Ismail, «Aerodynamic assessment of airfoils for use in small wind turbines,» *Advances in Energy Research*, 6(1), , vol. 6, n° 1, pp. 35-54, 2019.
- [11] Z. Simic, J. G. Havelka y M. B. Vrhovcak, «Small wind turbines—A unique segment of the wind power market,» *Renewable Energy*, vol. 50, pp. 1027-1036, 2013.
- [12] A. J. Bowen, N. Zakay y R. L. Ives, «The field performance of a remote 10 kW wind turbine,» *Renewable energy*, vol. 28, n° 1, pp. 13-33, 2003.
- [13] A. Pourrajabian, M. Mirzaei, R. Ebrahimi y D. Wood, «Effect of air density on the performance of a small wind turbine blade: A case study in Iran,» *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 126, pp. 1-10, 2014.
- [14] L. Bilir, M. Imir, Y. Devrim y A. Albostan, «An investigation on wind energy potential and small scale wind turbine performance at İncek region—Ankara, Turkey,» *Energy Conversion and Management*, vol. 103, pp. 910-923, 2015.
- [15] M. Bortolini, M. Gamberi, A. Graziani, R. Manzini y F. Pilati, «Performance and viability analysis of small wind turbines in the European Union,» *Renewable Energy*, vol. 62, pp. 629-639, 2014.
- [16] NASA, «Atmospheric Science Data Center,» [En línea]. Available: <https://eosweb.larc.nasa.gov>. [Último acceso: 10 Junio 2014].
- [17] M. O. Hansen, *Aerodynamics of wind turbines.*, Routledge, 2015.
- [18] Universidad de Magallanes, «Centro de Estudio de los Recursos Energéticos,» [En línea]. Available: <http://www.cere-umag.cl/>. [Último acceso: 10 Junio 2014].
- [19] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins y E. Bossanyi, *Wind energy Handbook*, England: John Wiley & Sons, 2001.
- [20] K. O'neal Coto, «Energías limpias son viables en industria del café,» Oficina de Divulgación e Información, UCR., 10 Junio 2014. [En línea]. Available: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2014/06/10/energias-limpias-son-viables-en-industria-del-cafe.html>. [Último acceso: 02 Diciembre 2019].

Oportunidades y desafíos para la integración de almacenamiento electroquímico en las redes eléctricas centroamericanas

Opportunities and challenges to integrate electrochemical storage in central american power grids

Gustavo Adolfo Gómez-Ramírez¹, Carlos Meza², Sergio Morales-Hernández³

Fecha de recepción: 28 de agosto de 2020
Fecha de aprobación: 6 de noviembre de 2020

Gómez-Ramírez, G.A; Meza, C; Morales-Hernández, S.
Oportunidades y desafíos para la integración de almacenamiento electroquímico en las redes eléctricas centroamericanas. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-3 Julio-Setiembre 2021. Pág 70-82.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5352>

- 1 Escuela de Ingeniería en Electromecánica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. Correo electrónico: ggomez@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-9195-072X>
- 2 Escuela de Ingeniería en Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. Correo electrónico: cmeza@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-7374-505X>
- 3 Escuela de Ingeniería en Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. Correo electrónico: smorales@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-2136-0382>



Palabras clave

Almacenamiento electroquímico; generación eléctrica intermitente; G2V; V2G; vehículos eléctricos; sistemas estacionarios de generación eléctrica; almacenamiento.

Resumen

La integración de sistemas estacionarios y de los vehículos eléctricos como almacenamiento electroquímico en la red eléctrica, traerán consigo una serie de acciones en los sistemas eléctricos de potencia a fin de robustecer la red existente, diversificar las mallas energéticas actuales y lograr una contribución significativa ante los requerimientos energéticos de la región y los problemas asociados debido al cambio climático. El presente artículo expone las principales oportunidades y desafíos de su integración, muestra la evolución y situación actual de la matriz eléctrica de Centroamérica. La región presenta condiciones favorables para permitir una penetración de diversas tecnologías de almacenamiento en combinación con generación de electricidad intermitente lo cual representa una nueva consideración en el análisis. Diversas tecnologías de almacenamiento son expuestas que, a pesar de ser antiguas en su descubrimiento y uso, hoy se presentan como una oportunidad para la producción masiva de energía eléctrica renovable. Por último, se analizarán las formas en que dichas tecnologías pueden interactuar con la red eléctrica como unidades de almacenamiento y carga. Finalmente, se identificarán las principales oportunidades y desafíos de la integración de sistemas de almacenamiento electroquímico en la red eléctrica.

Keywords

Electrochemical storage; intermittent power generation; G2V; V2G; electric vehicles; stationary power generation systems; storage.

Abstract

Stationary systems integration and electric vehicles (in storage conditions) will require actions to improve the existing grid in power electrical systems. To diversify current energy grid and achieve a significant contribution to energies requirements and associated problems due to climate change in Central American region. This article shows main opportunities and challenges in integration, it indicates the evolution and current situation in area. Region presents satisfactory conditions to penetration of several storage technologies with intermittent electricity generation combinations, which it represents a new issue in analysis and studies. Much storage technologies are exposed that but nowadays, they are presented as an opportunity to increase renewable electricity's production. Therefore, actual technologies must interact with actual grid, storage, intermittent renewable generation, and electrical vehicles. Finally, main opportunities and challenges in storage and electrical vehicles penetration will recognized in power systems analysis.

Introducción

Centroamérica es una región idónea para el desarrollo de soluciones energéticas carbono neutro ya que posee una gran variedad de recursos energéticos renovables y ha explotado poco sus escasos recursos fósiles [1]. Si bien es cierto la mayoría de sus redes eléctricas han dependido de centrales termoeléctricas con combustibles fósiles, en los últimos años todos los

países centroamericanos han incluido más fuentes de energía renovable. Esta transición no está exenta de desafíos, siendo el más importante la intermitencia intrínseca que presentan algunas fuentes de energía renovable.

Las plantas de generación que están conectadas a la red eléctrica realizan procesos de transformación de una fuente de energía a electricidad. Algunas tecnologías renovables dependen de fuentes de energía que no son constantes. Este es el caso de las plantas hidroeléctricas a filo de agua, fotovoltaicas y eólicas. La electricidad generada por dichas plantas depende de un flujo (agua, radiación solar, viento) que es variable dado que depende de condiciones climáticas que tienen un comportamiento dinámico caótico y por lo tanto difíciles de predecir.

Por otro lado, el sistema eléctrico debe asegurar en todo el momento el correcto balance entre generación y consumo dado que un eventual desbalance puede ocasionar el colapso del sistema y por lo tanto la interrupción del suministro eléctrico. En este sentido, si bien es cierto que las plantas solares fotovoltaicas y eólicas presentan un bajo impacto ambiental y son necesarias para alcanzar la carbono neutralidad en el sistema eléctrico, hace más complejo alcanzar el balance generación-consumo, además de potencialmente poner en riesgo la seguridad del sistema.

Incluir sistemas de almacenamiento de energía en la red eléctrica permite asegurar un mayor control sobre la entrega de energía renovable intermitente. El almacenamiento electroquímico representa una de las tecnologías de almacenamiento más maduras y que ha mantenido una reducción de costos sostenida en los últimos años, tendencia que de acuerdo con [28] se estaría manteniendo hasta el 2050. Además de sistemas de almacenamiento electroquímico estacionarios es también posible disponer del almacenamiento incluido en los vehículos eléctricos para contribuir con la gestión y control de energía renovable.

El presente artículo tiene como objetivo presentar las principales oportunidades y desafíos en la integración de sistemas estacionarios y con vehículos eléctricos de almacenamiento electroquímico en la red eléctrica Centroamericana. De esta forma, en la sección siguiente se presenta la evolución y la situación actual de la matriz eléctrica en los distintos países de Centroamérica de forma tal que se pueda apreciar el rol cada vez más importante que tienen las fuentes de energías renovables intermitentes en la Región. Posteriormente, se presentarán las principales tecnologías de almacenamiento estacionario electroquímico disponible hoy en día. Luego, se analizarán las formas en las que los vehículos eléctricos pueden interactuar con la red eléctrica como unidades de almacenamiento y carga. Finalmente, y con base en lo expuesto en las secciones anteriores, se identificarán las principales oportunidades y desafíos en la integración de sistemas de almacenamiento electroquímico en la red eléctrica.

Evolución y estado actual de las matrices eléctricas en Centroamérica

El istmo centroamericano, conformado por Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica y Panamá, está eléctricamente interconectado por medio de una red de transmisión de potencia dedicada denominada SIEPAC, [1], [2]. Esta red, administrada por un ente privado transnacional, permitió el desarrollo de un mercado eléctrico en donde los países centroamericanos pueden intercambiar energía [2].

El mercado eléctrico centroamericano se consolidó en un momento histórico en donde todos los países estaban experimentando un crecimiento económico sostenido que iba acompañado de un aumento en la cobertura eléctrica y por lo tanto en el consumo de energía, [1]. Dicha situación fue uno de los elementos que, tal y como se describe en [1] y en [3], motivó la implementación de algunas reformas del sector eléctrico.

Los costos elevados del petróleo, la reducción en los costos de la tecnología renovable y los programas para incentivar las fuentes renovables impulsaron un crecimiento acelerado de fuentes de energía renovable en los primeros años del siglo XXI. De acuerdo con el reporte del 2020 de la CEPAL, [4], el 75% de la energía eléctrica generada por los países interconectados al SIEPAC en el 2018 provino de fuentes renovables. La figura 1 muestra la evolución de la capacidad instalada de fuentes de energía renovable y de las fuentes de energía térmica en los países del SIEPAC. Se aprecia como el crecimiento en las fuentes de energía renovables fue significativamente mayor que las fuentes de energía no renovable.

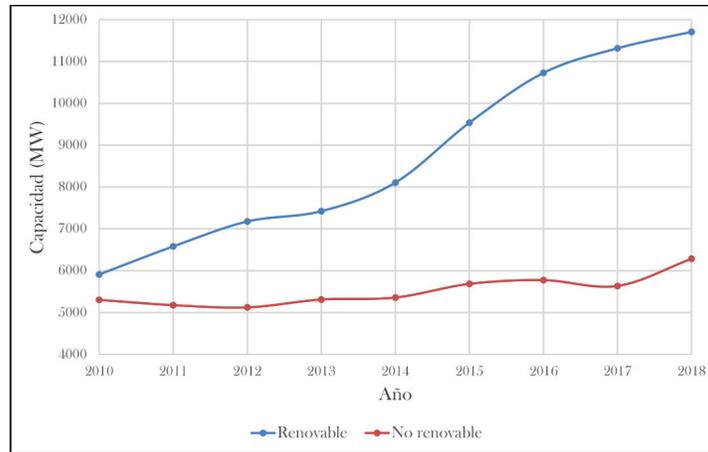


Figura 1. Evolución de la capacidad total por tipo de fuente de energía para los países interconectados al SIEPAC. Fuente: Elaboración propia con datos tomados de [4].

El crecimiento en la capacidad instalada de fuentes de energía renovable no ocurrió con la misma razón de crecimiento en las distintas tecnologías que se utilizaron. En la figura 2 se aprecia la curva de la capacidad instalada normalizada para distintas fuentes de energía en los países del SIEPAC. Se puede observar cómo existió un crecimiento más acelerado en la instalación de plantas eólicas y fotovoltaicas, ya que presentan una pendiente de crecimiento mayor que las otras fuentes de energía. La figura 3 ilustra, con datos absolutos, el crecimiento en la capacidad instaladas en las plantas eólicas y fotovoltaicas. El desarrollo acelerado de estas tecnologías se puede explicar dado a la tendencia sostenida en la reducción de los costos y los tiempos más cortos de implementación.

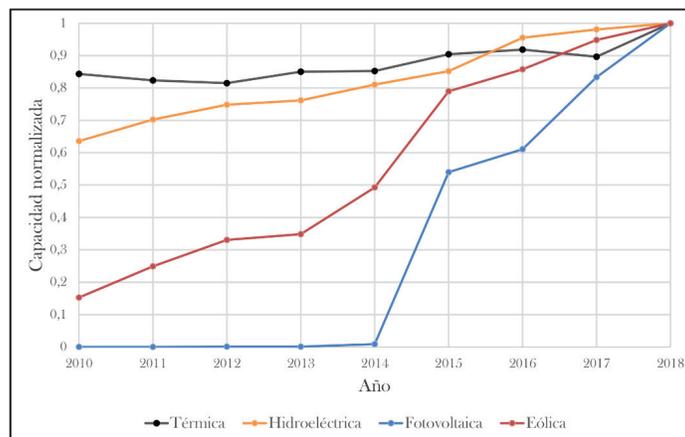


Figura 2. Capacidad normalizada instalada por tipo de fuente de energía para los países del SIEPAC. Fuente: Elaboración propia con datos tomados de [4].

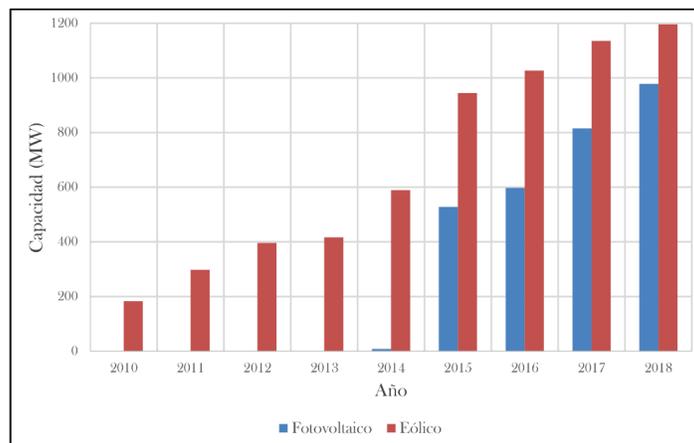


Figura 3. Evolución de la capacidad instalada en los países del SIEPAC en instalaciones fotovoltaicas y eólicas. No se toma en cuenta la generación distribuida para autoconsumo. Fuente: Elaboración propia con datos tomados de [4].

Si bien es cierto, la generación de energía con tecnología fotovoltaica y eólica tiene un bajo impacto ambiental y está asociada a emisiones nulas de carbono durante su operación tiene el inconveniente que es intermitente, esto es, produce electricidad de forma variable de acuerdo con las condiciones ambientales existente que varían de forma diaria y estacional. Esta característica representa un desafío para los sistemas eléctricos que tienen como principal objetivo mantener en todo momento el balance entre la generación y el consumo. El efecto de las fluctuaciones de la potencia eólica y solar puede ser mitigado por medio de sistemas de almacenamiento de energía. De esta forma, la energía producida en exceso y que no es consumida instantáneamente sería almacenada para luego ser utilizada cuando existe un faltante. Esto significa que el binomio generador fotovoltaico/eólico + almacenamiento operarían como una planta virtual que entrega energía de forma constante, sin fluctuaciones. El almacenamiento provee una herramienta de control efectiva sobre las fuentes de energía intermitentes. Existen distintas formas en las que se puede almacenar energía eléctrica que se presentarán en la siguiente sección.

Descripción del Sistema de Potencia en Centroamérica

El sistema eléctrico de Centroamérica está caracterizado por ser muy diverso en sus fuentes de generación. Cuenta con más de 650 centrales de generación de electricidad entre las más importantes son: hidroeléctricas, eólicas, solar, geotérmica y un alto componente de generación por combustibles fósiles (térmica). Cada una de ellas está interconectada a una extensa red de transmisión desde Guatemala hasta Panamá con cerca de 2200 barras en niveles de tensión de 230, 138 kV hasta la baja tensión interconectada con México con un enlace de 225 MW en 400 kV. El sistema cuenta con más de 2250 líneas de transmisión con alrededor de 1200 transformadores de potencia funcionando como elevadores y reductores de acuerdo con el requerimiento. Asimismo, cerca de 140 capacitores compensan la potencia reactiva requerida por las cargas. Cabe destacar, que se alimentan alrededor de 850 cargas. Por lo tanto, es importante destacar los siguientes aspectos para la integración de almacenamiento y su combinación con las fuentes de generación intermitente en la región:

Integración de Generación Eléctrica Intermitente en la Red de Transmisión.

La red eléctrica presenta grandes oportunidades debido a la riqueza en cuanto al recurso eólico, solar y marino. Asimismo, la infraestructura de la red permite una penetración tanto en distribución como en transmisión la cual debe ser valorada. Debido a los niveles de tensión en toda la región se deben ubicar las zonas con grandes posibilidades de integración y aprovecharla incluso como generación local.

Posibilidades de integración de Generación Intermitente junto con almacenamiento.

Dado el potencial de generación de las fuentes renovables no intermitentes en la región es posible aprovechar los excedentes para almacenamiento de la energía eléctrica en grandes centros de baterías. De esta manera se lograría disminuir la producción de electricidad por combustibles fósiles. De esta forma, la energía generada por medios intermitentes representaría un aporte importante a la matriz energética de la región optimizando el uso de los recursos de generación.

¿Puede el almacenamiento contribuir a la estabilidad del sistema eléctrico de la región?

La integración eléctrica de los países supone problemas de la estabilidad del sistema ante las perturbaciones en la red. El almacenamiento combinado con la generación intermitente puede ser una opción importante para lograr mantener en dado caso el balance de la potencia de generación-carga, de igual manera el suministro de potencia activa y reactiva entre los nodos de interconexión, esto con el fin de mejorar la estabilidad transitoria, de frecuencia y de tensión respectivamente. Analizar puntos estratégicos para la inserción de los centros de almacenamiento puede contribuir grandemente en la estabilidad del sistema y de esta manera minimizar el riesgo de apagón o colapso del sistema.

Tecnologías almacenamiento integrado a los sistemas eléctricos de potencia

Los sistemas de almacenamiento ofrecen importantes beneficios para un sistema eléctrico. Por ejemplo, Kleinberg et. Al en [5] menciona las siguientes aplicaciones del almacenamiento en los sistemas eléctricos: regulación del sistema, reserva rápida, aplanamiento de picos de potencia ("*peak shaving*"), nivelación de cargas, aplazamiento de la capacidad de generación y nivelación de la capacidad de transmisión. Esto es, los sistemas de almacenamiento de energía mejoran la entrega de potencia ininterrumpida y de alta calidad al usuario final antes los posibles comportamientos estocásticos e inciertos que se pueden producir en las distintas etapas de la cadena de suministro de energía eléctrica [5].

La flexibilidad añadida al sistema eléctrico que ofrece el almacenamiento lo hace un buen complemento para los centrales de generación renovable de potencia intermitente [6]. Existen distintas tecnologías de almacenamiento que atienden distintas necesidades y capacidades de almacenamiento de energía y de entrega de potencia. Una de las formas más antiguas de almacenamiento de energía en el sector eléctrico es aprovechando la energía potencial que ocurre en

1. Bombeo hidráulico

La primera planta de bombeo se construyó en 1929. Representa el 96% de la capacidad instalada de almacenamiento de energía en el mundo. Existen alrededor de 200 plantas de bombeo en el mundo para una potencia nominal total de alrededor de 150 GW [7].

2. Aire comprimido

Descompresión de un gas previamente comprimido a través de una turbina para recuperar dicha energía. Sólo dos plantas comerciales con aire comprimido. una de 290 MW construida en Hundorf, Alemania en 1978 y una segunda de 110 MW en McIntosh, Alabama, USA. Es específico al sitio. [6]

3. Volante de inercia

Almacenamiento cinético en una masa giratoria. Se acelera para almacenar y se frena para almacenar energía. Las capacidades típicas rondan los 3kWh a 133 kWh. Recientemente se han usado para almacenamiento en la red.

4. Hidrógeno electrólisis

La electrólisis es el proceso en donde el agua se divide en hidrógeno y oxígeno. El hidrógeno producido por la electrólisis puede utilizarse para generar electricidad (celdas de combustible).

5. Baterías de flujo

La energía se almacena en disoluciones de electrolitos contenido en dos tanques diferenciados. Presenta una recarga rápida. El dimensionamiento de potencia y su capacidad se tratan de manera independiente. Capacidades típicas son de 100 kWh a 1MWh. Existen varias decenas de instalaciones de almacenamiento en el mundo.

6. Baterías de sales fundidas

Batería electroquímica que opera a altas temperaturas. Es fabricada con materiales económicos. Electrolítico sólido con uno de sus electrodos en estado líquido (fundido). Opera a temperatura superiores a los 300 °C.

7. Baterías electroquímicas

El principal problema con las baterías electroquímicas es que se convertirán en desechos tóxicos a futuro, además, brindan una menor autonomía como reservorio de energía si se comparan con los métodos utilizados en los vehículos de combustión interna. Sin embargo, actualmente se está trabajando en las bio-baterías, basadas en componentes biológicos que generan bajas corrientes eléctricas [26,27]. Las baterías electroquímicas pueden integrarse naturalmente a la red eléctrica por medio de vehículos eléctricos. Los Vehículos Eléctricos (VEs), integrados de forma masiva en la red eléctrica pueden presentar dos condiciones: en modo de almacenamiento para *entregar* energía a la red (V2G) o en modo de carga (G2V) para *consumir* potencia. Ambos casos son importantes para el análisis de cargabilidad del sistema pues esta puede afectar las condiciones operativas del sistema de potencia. Su integración masiva puede afectar la estabilidad tanto transitoria, de frecuencia, tensión y pequeña señal.

Los tipos de baterías electroquímicas principales se indican a continuación:

- *Ácido plomo (Pb ácido)*: son baterías de tecnología antigua. Presentan un alto riesgo por utilizar sustancias ácidas. Sus principales desventajas son su baja relación de energía almacenada versus su peso, y su baja relación de energía almacenada versus volumen. No son una solución económica para los vehículos eléctricos.
- *Níquel Cadmio (NiCd)*: su tecnología aumentó su vida útil gracias a un incremento en el número de ciclos de carga y descarga. Sin embargo, su principal aspecto negativo es el uso de Cadmio, el cual es un metal pesado muy contaminante. Además, presentan el

“efecto memoria” que básicamente es una reducción de su capacidad de carga debido a procesos de cargas incompletas, es decir, que, si la batería no se carga completamente, irá reduciendo su capacidad de carga total.

- *Níquel Hidruro metálico (NiMH)*: estas baterías son similares a las de NiCd en cuanto a su construcción y operación, sin embargo, casi no presentan “efecto memoria”, lo cual le da más ventajas a esta tecnología con respecto a las anteriores.
- *Ión Litio (Li-ion)*: tienen una gran capacidad de almacenamiento de energía, así como una alta relación de densidad de energía versus peso. Sin embargo, su costo, sobrecalentamiento y baja vida útil, han reducido su uso.
- *Polímero Ión Litio (LiPO)*: estas baterías tienen un ciclo de vida mayor que las de Li-ion, sin embargo, su estabilidad se ve comprometida cuando se dan sobrecargas en sus ciclos de carga y descarga, por lo que requieren de una circuitería electrónica adicional para evitar problemas.
- *Cloruro de Níquel Sódico (NaNiCl)*: se conoce comercialmente como “batería cebra”. Tiene un amplio rango de operación en temperatura (desde 270 hasta 350 grados Celsius), así como una alta densidad de energía almacenada. Sin embargo, deben considerarse los aspectos como la seguridad y el almacenamiento por periodos extensos.

En la figura 4 se muestran las diferentes tecnologías de baterías, comparando la relación entre energía y peso y energía y volumen [26, 27]. En la actualidad, las tecnologías de los vehículos han alcanzado mejoras relacionadas con el modo de operación, velocidad y autonomía, de acuerdo con el tipo de batería. Las baterías de iones de litio son las más utilizadas en los vehículos eléctricos, en los cuales se pueden alcanzar hasta 200 km/h, con autonomías que van de los 120 km y hasta los 390 km, mientras que los híbridos enchufables (HEV) con baterías de NiMH pueden alcanzar velocidades de hasta 170 km/h y autonomías entre los 900 y 1200 km [26, 27].

De acuerdo con [28], la tecnología de almacenamiento de iones de litio tiene la mayor probabilidad de ser la alternativa más económica en los próximos 10 a 30 años.

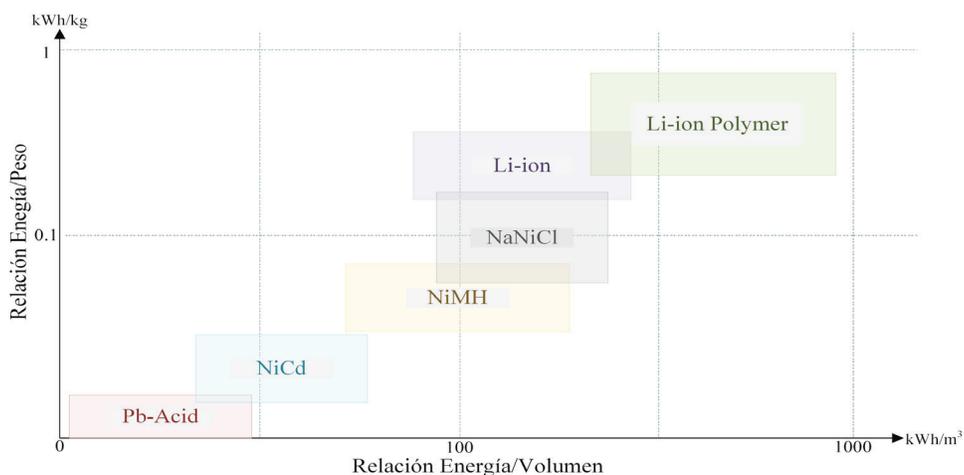


Figura 4: Tecnologías de baterías electroquímicas relacionadas por su densidad de peso/volumen vrs energía basada en [26,27].

Modelado de baterías como una carga en el sistema de potencia

El modelado de las cargas en los modelos de simulación en la región de Centroamérica tradicionalmente ha sido hecho como *cargas estáticas*, no obstante representar matemáticamente el comportamiento de estas, será un reto para conocer las componentes de potencia, corriente o impedancia constante (ZIP, por su acrónimo en inglés) utilizada en el modelado [8]. Dichos modelos deberán responder de manera eficiente ante los cambios en la demanda tanto en potencia activa como reactiva a diversas condiciones de operación del sistema. No obstante, hay que recordar que las cargas dependen directamente de la tensión. El modelo matemático ZIP se analiza con las siguientes ecuaciones:

$$P_0 \left(p_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + p_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + p_3 \right), \quad (1)$$

donde $p_1 + p_2 + p_3 = 1$

$$Q_0 \left(q_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + q_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + q_3 \right) \quad (2)$$

donde $q_1 + q_2 + q_3 = 1$

La demanda representada como un modelo *exponencial*, se analiza de la siguiente manera:

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha \quad (3)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\beta \quad (4)$$

Los valores V_0 es la tensión inicial, las potencias P_0 y Q_0 son las potencias *activas* a una tensión V_0 y *reactiva* a una tensión V_0 . Los parámetros p_1 a p_3 y q_1 a q_3 son los coeficientes del modelo. Los valores son los *exponentes* de la potencia activa y reactiva respectivamente. Dependiendo de cada uno de estos parámetros, las ecuaciones (1), (2), (3) y (4) se modelará cargas de *impedancia*, *corriente* o *potencia* constante. Los modelos de cargas dinámicos son ampliamente utilizados para el modelado de la recuperación de demanda posterior a las perturbaciones donde hubo afectación de la tensión. Este modelo posee un *exponente* de potencias activa y reactiva para modelar en estado permanente y transitorio.

Consideraciones de la alta penetración de baterías en los sistemas eléctricos de potencia.

El comportamiento de la penetración baterías estacionarias o aquellas utilizadas en VE en cualesquiera de sus condiciones e.g. *carga*, *descarga* o *reposo conectado (stand by)* y el desarrollo de un modelo que se adecua a los anteriores, será un reto para lograr integrar este tipo de cargas a las herramientas de simulación. Por lo tanto, las aplicaciones informáticas de simulación deberán cada vez más adaptarse a dichos requerimientos, pero también los modelos deberán tener datos más certeros y confiables sobre las cargas a modelar, aun así,

quedará a futuro la tarea pendiente de estudiar la interacción en tiempo real la masificación de las baterías en los VEs en las redes eléctricas dado que estos no constituyen una carga tradicional al sistema.

Los modelos de los sistemas de almacenamiento planteados como *corriente constante* pueden provocar inestabilidad en las redes estudiadas mientras que si se hace a *potencia constante* permiten una mayor integración de baterías en VEs en la red; de igual modo sucede con los vehículos híbridos modelados a *corriente constante* [9].

Estos efectos se pueden analizar por medio de software de simulación como los indicados en el cuadro 1 en donde se muestra dos estudios del sistema de potencia aplicados en la investigación incluyendo el software aplicado para su análisis.

Cuadro 1. Resumen de estudios del sistema de potencia aplicados en la investigación.

Estudio	Software de Análisis	Referencia
Cargabilidad	PSS/E, Eurostag, OpenDSS, DigSILENT, MATLAB, RTDS Real-Time Simulator	[9] [22] [10] [16] [19] [117]
Estabilidad	PSS/E, Eurostag, OpenDSS, DigSILENT, MATLAB, RTDS Real-Time Simulator	[22] [13] [10] [21] [18] [24] [23] [14] [12] [19] [12] [15]

Se presenta un reto el establecer un modelo adecuado que pueda simular el comportamiento real de las baterías en vehículos eléctricos (BVE) en los sistemas de potencia. En las ecuaciones (1), (2), (3) y (4) las investigaciones deberían contemplar el efecto de la cargabilidad en la frecuencia del sistema a fin de determinar las distintas condiciones de penetración de BVEs. Otro aspecto importante es el análisis de los BVEs en presencia de fuentes de energía renovables *intermitentes* como la energía solar, eólica o marina ante una alta penetración de BVEs en condición V2G o G2V. Un desafío para la investigación de la región de Centroamérica será el análisis de la reconfiguración de la red ante grandes perturbaciones como la pérdida de generación o la carga y de esta forma establecer estrategias de control para mitigar sus efectos nocivos e.g. *problemas de cargabilidad, estabilidad, regulación de frecuencia y de tensión entre otros*. El sistema de Dinamarca fue estudiado bajo esta condición, tomando en cuenta la energía eólica y una alta penetración de BVEs [10], asimismo el sistema de potencia Nórdico, no obstante, solamente analizó cargabilidad con una alta penetración de BVEs [11]. Las redes eléctricas centroamericanas deberán considerar escenarios de integración de generación de energía intermitente, almacenamiento y VEs.

Condiciones de Inestabilidades para el Sistema de Potencia

Varias investigaciones se han enfocado en el análisis de *redes de distribución*, sobre todo por el impacto de la cargabilidad vehicular en la inestabilidad tensión y transitoria en condición V2G o G2V. Otros análisis complementarios han sido las pérdidas en las redes eléctricas, perfiles de tensión en barras y sin dejar de lado los estudios económicos y de mercados eléctricos [12]. La estabilidad de tensión es importante tomarla en cuenta, pues debe ser analizada en la condición G2V ya que la tensión depende de la cargabilidad. Por lo tanto, este problema se dará de forma local en las redes eléctricas y será necesario el uso de compensación de potencia reactiva.

Establecer cuotas de BVEs ha sido una manera eficaz de estimar la cargabilidad en las barras del sistema. Un ejemplo sería establecer simulaciones con aumentos definidos a través de tiempo, no obstante, se pueden proponer estimaciones de cálculo más realistas a partir de métodos

matemáticos de predicciones futuras tomando en consideración variables macroeconómicas, de consumo, eléctricas entre otras. Otras redes eléctricas tanto en transmisión como distribución han sido analizadas en presencia de gran cantidad de BVEs pero el análisis se ha enfocado a algunas *redes de prueba* y no a condiciones reales.

Para el caso de Centroamérica será de gran importancia en estudios de estabilidad conocer el comportamiento en estado dinámico de las cargas, por lo que el desarrollo de controladores para lograr mantener la regulación de la frecuencia ha sido tomado en cuenta en otros estudios [13]. La estabilidad *transitoria* puede ser afectada debido a los desbalances de *generación-carga* en el sistema de potencia. Los estudios de estabilidad transitoria se han enfocado en la búsqueda de *controladores* para que con un algoritmo adecuado puedan tomar decisiones en la integración de la carga o generación dependiendo el requerimiento energético del momento e.g. un controlador de grupo de generadores fue propuesto para la mejora de estabilidad y otros diversos controladores han sido desarrollados como opción para el tratamiento de las *cargas* a fin de mejorar la estabilidad transitoria [16][21]. Los controladores son una opción importante para mantener el equilibrio de potencia de la generación y carga ante perturbaciones. A nivel centroamericano se presentan oportunidades de análisis en el parque de generación.

Otros controladores funcionando en conjunto con el control primario de la frecuencia [18], son una opción ante ciclos de carga y descarga masivos. De igual modo, es necesario considerar las fuentes de energía renovable intermitente y las interconexiones que posean los sistemas de potencia. En condición G2V se podría estudiar el efecto de las tecnologías de los elementos de carga de BVEs.

El análisis de estabilidad de *pequeña señal* podría determinar los modos de oscilación para algunas perturbaciones del sistema de potencia. Este tipo de análisis será importante al considerar los diversos ciclos de carga y descarga de los BVEs a lo largo del día [15]. En este aspecto es importante comprender los hábitos de consumo energéticos de la población para con el uso de BVEs pues de esta manera se puede conocer y administrar la energía *demandada* o *entregada* a la red eléctrica. Algunas de las medidas para la administración energética dentro del mercado eléctrico podrían ser el aprovechamiento de la disponibilidad de potencia (*si se tienen BVEs integrados de forma masiva*) a diversas horas del día y de esta manera entregar potencia activa y reactiva al sistema eléctrico y de esta forma minimizar el uso de *combustibles fósiles*. El impacto energético y económico de las medidas deberá ser evaluado ampliamente para buscar alternativas y soluciones en la descarbonización de los países [20].

Por lo tanto, la investigación en una red como la centroamericana con modelos, datos reales y herramientas computacionales poderosas contribuirán a determinar el impacto de la penetración de los BVEs en el sistema de potencia, en condiciones V2G o G2V. De esta manera, proponer y plantear alternativas en estrategias de control para la mejora de las condiciones ante una alta penetración de BVEs en presencia de fuentes renovables intermitentes u otros es una necesidad creciente y de esta forma mitigar sus efectos negativos en el sistema de potencia. El análisis de las redes eléctricas será de gran importancia pues no solo repercutirá a futuro en beneficios potenciales debido a la integración de las nuevas tecnologías para proveer estabilidad y capacidad de penetración sino mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico [29] debido crecimiento de la demanda y los requerimientos energéticos de los clientes eléctricos de la región.

Conclusiones

Centroamérica presenta condiciones óptimas para continuar desarrollado el sistema eléctrico con generación renovables, existe una infraestructura la cual esta desarrollada para continuar integrando alternativas de generación distintas a las existentes. El auge en la generación regional de la energía eólica y solar, implican acciones para robustecer la infraestructura actual para de esta forma mantener las condiciones operativas del sistema de potencia. Se presentan, por lo tanto, un desafío importante en la integración de este tipo de generación renovable intermitente, pues debido a los ciclos de generación que esta pueda tener a lo largo del día, los desbalances en la producción de electricidad pueden afectar el equilibrio generación – carga.

Existe de esta manera una oportunidad para desarrollar un sistema eléctrico capaz de absorber energía con grandes cambios debido a la intermitencia en su producción de electricidad. No obstante, el futuro deparará una gran cantidad de alternativas de generación de electricidad que se irán integrando a las redes eléctricas siempre y cuando los beneficios económicos permitan su aplicación. El desarrollo de estas tecnologías permitirá una creciente y constante innovación en la manera de cómo operar los sistemas de potencia pues habrá que adaptarse a cada una de ellas conforme su presencia sea significativa en la matriz energética de los países.

Por último, cada vez se hará imperante conocer los modelos matemáticos de cada una de las tecnologías a fin de simular su integración en la red y de esta manera poder tomar las mejores decisiones en el planeamiento y expansión de los sistemas de potencia. La planificación de los sistemas eléctricos requerirá de herramientas computacionales que puedan simular de manera poderosa cada una de las tecnologías que se presenten. La masificación en la integración de estas tecnologías supone oportunidades de investigación en armónicos, mercados eléctricos, estabilidad, cargabilidad y entre otros.

Agradecimientos

Se agradece a Vicerrectoría de Investigación y Docencia en ITCR por el apoyo al proyecto “*Modelado de la futura penetración de Vehículos Eléctricos para realizar estudios eléctricos y ambientales para Costa Rica*” código 5402-1341-1801. Así mismo al CENCE-ICE por los datos proporcionados y el apoyo al proyecto de doctorado del autor. Le damos gracias a CFS SISTEMAS S.A (*represente exclusivo de ETAP para Costa Rica*) y ETAP por proveer la licencia de ETAP para apoyar el proyecto de doctorado del autor en la investigación y análisis en este y artículos futuros que se desarrollen.

Referencias

- [1] C. Meza, “A review on the Central America electrical energy scenario”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, p. 566-577, 2014.
- [2] J. Zarnikau, I. Partridge, J. Dinning, D. Robles. “Will the SIEPAC Transmission Project Lead to a Vibrant Electricity Market in Central America?”. *International Association for Energy Economics*, Fourth Quarter 2013.
- [3] D. Gent, and J. Tomei. “Electricity in Central America: Paradigms, reforms and the energy trilemma.” *Progress in Development Studies* 17.2 (2017): 116-130.
- [4] M.E. Rojas Navarrete. “Estadísticas del subsector eléctrico de los países del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA)”, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2018.
- [5] Kleinberg, Michael, et al. “Energy storage valuation under different storage forms and functions in transmission and distribution applications.” *Proceedings of the IEEE* 102.7 (2014): 1073-1083.
- [6] Zach, K. A., and H. Auer. “Bulk energy storage versus transmission grid investments: Bringing flexibility into future electricity systems with high penetration of variable RES-electricity.” 2012 9th International Conference on the European Energy Market. IEEE, 2012.

- [7] Phillips-Brenes, Hayden, Roberto Pereira-Arroyo, and Mauricio Muñoz-Arias. "Energy-based model of a solar-powered pumped-hydro storage system." 2019 IEEE 39th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXIX). IEEE, 2019.
- [8] J. Machowski, J. W. Bialek y B. James R., *Power System Dynamics: Stability and Control*, West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2008.
- [9] T. Das y D. C. Aliprantis, «Small-Signal Stability Analysis of Power Systems Integrated with PHEVs» de 2008 IEEE Energy 2030 Conference, 2008.
- [10] J. R. Pillai y B. Bak-Jensen, «Integration of Vehicle-to-Grid in the Western Danish Power System» IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 2, n° 1, pp. 12-19, 2011.
- [11] L. Zhaoxi, W. Qiuwei, N. Arne Hejde y Y. Wang, «Day-ahead Energy Planning with 100\% Electric Vehicle Penetration in the Nordic Region by 2050» Multidisciplinary Digital Publishing Institute (ENERGY), vol. 7, n° 3, pp. 1733--1749, 2014.
- [12] U. C. Chukwu, «Assessment of the Impact of V2G on the Electric Distribution Network» Tennessee Technological University, Tennessee, 2011.
- [13] P. M. P. da Rocha Almeida, «Impact of Vehicle to Grid in the Power System Dynamic Behaviour» Universidade do Porto (Portugal), Porto, 2011.
- [14] D. Wu, K. T. Chau, C. Lui , S. Gao y F. Li, «Transient Stability Analysis of SMES for Smart Grid With Vehicle-to-Grid Operation "», IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 22, n° 3, 2012.
- [15] C. H. Dharmakeerthi, N. Mithulanathan y A. Atputharajah, «Development of Dynamic EV Load Model for Power System Oscillatory Stability Studies» de 2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2014.
- [16] A. Gajduk, M. Todorovski, J. Kurths y L. Kocarev, «Improving power grid transient stability by plug-in electric vehicles» New Journal of Physics, vol. 16, n° 11, 2014.
- [17] C. Zhang, C. Chen, J. Sun, P. Zheng, X. Lin y Z. Bo, «Impacts of electric vehicles on the transient voltage stability of distribution networks and the study of improvement measures» de Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2014 IEEE PES Asia-Pacific, 2014.
- [18] S. Izadkhasht, P. García-González y P. Frías, «An aggregate model of plug-in electric vehicles for primary frequency control» 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016.
- [19] J. Xiong, K. Zhang, Y. Guo y W. Su, «Investigate the Impacts of PEV Charging Facilities on Integrated Electric Distribution System and Electrified Transportation System» IEEE TRANSACTIONS ON TRANSPORTATION ELECTRIFICATION, vol. 1, n° 2, pp. 178-187, 2015.
- [20] M. S. Khalid, X. Lin, Y. Zhuo, R. Kumar y M. K. Rafique, «Impact of energy management of electric vehicles on transient voltage stability of microgrid,» de International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, 2015.
- [21] B. Zhou, T. Littler y L. Meegahapola, «Assessment of transient stability support for electric vehicle integration» de Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016.
- [22] P. Mitra y G. K. Venayagamoorthy, «Wide Area Control for Improving Stability of a Power System with Plug-in Electric Vehicles» IET generation, transmission & distribution, vol. 4, n° 10, pp. 1151-1163, 2010.
- [23] T. N. Pham, H. Trinh, L. V. Hien y K. P. Wong, «Integration of Electric Vehicles for Load Frequency Output Feedback Hoo; control of smart grids» IET Generation, Transmission Distribution, vol. 10, n° 13, pp. 3341-3352, 2016.
- [24] J. A. P. Lopes, F. J. Soares y P. M. R. Almeida, «Integration of Electric Vehicles in the Electric Power System» Proceedings of the IEEE, vol. 99, n° 1, pp. 168-183, 2011.
- [25] K. Yuan, Y. Song, C. Sun, Z. Xue, Z. Wu, J. Li y B. Yuan, «Harmonic characteristics of distributed generation and electric vehicles integrating to the grid» de IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration, 2017.
- [26] A. M. Andwari, A. Pesiridis, S. Rajoo, R. Martinez Botas, and V. Esfahanian, "A review of battery electric vehicle technology and readiness levels," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 414–430, 2017.
- [27] J. Y. Yong, V. K. Ramachandaramurthy, K. M. Tan, and N. Mithulanathan, "A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 365–385, 2015.
- [28] Schmidt, O., Melchior, S., Hawkes, A., & Staffell, I. (2019). Projecting the future levelized cost of electricity storage technologies. *Joule*, 3(1), 81-100.
- [29] Gómez-Ramírez, Gustavo Adolfo. "Evolución y tendencias de índices de confiabilidad en sistemas eléctricos de potencia". *Revista Tecnología en Marcha*, 2016, vol. 29, no 2, p. 3-13.

Evaluación del impacto ambiental de una planta de lácteos en Costa Rica

Environmental impact assessment of a dairy plant in Costa Rica

Kelvin Arce-Villalobos¹, Alejandro Arias-Castro²,
Yuliana González-Jiménez³, Karina Hernández-Ugalde⁴,
José Carlos Mora-Barrantes⁵

Fecha de recepción: 3 de febrero de 2020
Fecha de aprobación: 10 de mayo de 2020

Arce-Villalobos, K; Arias-Castro, A;
González-Jiménez, Y; Hernández-Ugalde, K;
Mora-Barrantes, J.C. Evaluación del impacto ambiental de una planta de lácteos en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-3 Julio-Setiembre 2021. Pág 83-95.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.4919>

- 1 Químico Industrial, Estudiante de Licenciatura en Química Industrial, Universidad Nacional (UNA), Escuela de Química, Costa Rica.. Correo electrónico: kelvin.arce.villalobos@est.una.ac.cr.
 <https://orcid.org/0000-0002-7722-3275>
- 2 Químico Industrial, Estudiante de Licenciatura en Química Industrial, Escuela de Química, Universidad Nacional (UNA), Costa Rica. Correo electrónico: luis.arias.castro@est.una.ac.cr.
 <https://orcid.org/0000-0001-5655-1029>
- 3 Laboratorista Química, Estudiante de Licenciatura en Química Industrial, Escuela de Química, Universidad Nacional (UNA), Costa Rica. Correo electrónico: yuliana.gonzalez.jimenez@est.una.ac.cr.
 <https://orcid.org/0000-0003-4956-3720>
- 4 Química Industrial, Estudiante de Licenciatura en Química Industrial, Escuela de Química, Universidad Nacional (UNA), Costa Rica. Correo electrónico: karina.hernandez.ugalde@est.una.ac.cr.
 <https://orcid.org/0000-0002-9248-4828>
- 5 Investigador y académico, Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT), Escuela de Química, Universidad Nacional (UNA), Costa Rica. Correo electrónico: jose.mora.barrantes@una.cr.
 <https://orcid.org/0000-0002-0409-5276>



Palabras clave

Industria; lácteos; gestión ambiental; evaluación de impacto ambiental; aspecto e impacto ambiental; sostenibilidad.

Resumen

La Gestión Ambiental (GA), como paradigma funcional de los procesos de control y sostenibilidad de actividades planificadas, incorpora la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) como estrategia de análisis para garantizar una ejecución ambientalmente racional y sostenible de acciones en diferentes ámbitos. La industria de lácteos figura como un sobresaliente generador de Impactos Ambientales (IAs), los cuales requieren ser analizados como medida de contingencia para la protección del ambiente. En el presente estudio se desarrolló la identificación, valoración y priorización de aspectos ambientales (AAs) e impactos ambientales (IAs) de una planta de lácteos. La identificación de los AAs se realizó mediante vistas de campo, entrevistas a funcionarios de la planta, sesiones de análisis con autoridades de la empresa, aplicación de lista de verificación, análisis del proceso productivo, entrevistas con expertos en el tema y revisión bibliográfica relacionada. La evaluación, valoración y priorización de los AAs e IAs se realizó mediante la aplicación de la Matriz de Importancia de Impacto Ambiental (MIIA), utilizando criterios de campo recopilados durante el proceso de identificación de los aspectos ambientales. Se identificaron nueve AAs y cuatro IAs; siendo el AA denominado consumo de agua el más crítico para el ambiente, producto del alto consumo y consecuente agotamiento del recurso hídrico. Los tres principales IAs de carácter negativo al ambiente encontrados fueron: consumo de agua, abastecimiento externo de energía eléctrica y emisiones de olores; con valores de impacto ambiental de -87, -65 y -52, respectivamente.

Keywords

Industry; dairy; environmental management; environmental impact assessment; environmental aspect and impact; sustainability.

Abstract

The Environmental Management (EM), as a functional paradigm of the processes of control and sustainability of planned activities, incorporates the Environmental Impact Assessment (EIA) as an analysis strategy to guarantee an environmentally and sustainable execution of actions in different fields. The dairy industry is listed as an outstanding generator of Environmental Impacts (EIs), which need to be analyzed as a contingency measure for environmental protection. In the present study, the identification, assessment and prioritization of environmental aspects (EAs) and environmental impacts (EIs) of a dairy plant was developed. The identification of the AAs was carried out through field views, interviews with plant officials, analysis sessions with company authorities, application of a checklist, analysis of the production process, interviews with experts in the subject and related bibliographic review. The evaluation, valuation and prioritization of AAs and IAs was carried out through the application of the Environmental Impact Importance Matrix (MIIA), using field criteria compiled during the process of identifying environmental aspects. Nine AAs and four IAs were identified; being the AA called water consumption the most critical for the environment, due to high consumption and consequent depletion of the water resource. The three main AAs of a negative nature to the environment were: water consumption, external power supply and odor emissions; with environmental impact values of -87, -65 and -52, respectively.

Introducción

La Gestión Ambiental (GA) engloba un sólido movimiento estructurado de gestión de la calidad y sostenibilidad del medio ambiente desde 1980, la cual pretende establecer esquemas de evaluación integrada, como medio para su incorporación en la toma de decisiones en las etapas del ciclo de planificación en diversos ámbitos sociales, económicos y productivos [1].

La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) puede considerarse como un instrumento de GA, el cual implica el análisis y evaluación de actividades planificadas para garantizar su desarrollo de forma ambientalmente racional y sostenible; por lo que se considera una herramienta eficaz en la toma de decisiones, planificación e identificación del tipo, magnitud y cambios en el entorno como resultado de una actividad o política [2].

El fortalecimiento de planes, procedimientos y reglamentos asociados con la gestión ambiental ha permitido a través del tiempo que los procesos y sistemas productivos mejoren su rendimiento, en tanto, su cumplimiento se ejecute a través de una interacción sinérgica con protocolos de calidad, lo que resulta especialmente crítico e inminente para aquellos procesos caracterizados por propiciar el desarrollo de Aspectos Ambientales (AAs) que atentan con la sostenibilidad del medio ambiente [3].

En este sentido, la multiplicidad de productos lácteos que contempla un sistema contemporáneo de producción de dichos bienes engloba un sinnúmero de beneficios para el hombre; sin embargo, están sujetos a grandes cantidades de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) e Impactos Ambientales (IAs) principalmente en el agua, aire y suelo [4].

Cualquier derivado lácteo se obtiene tras haber concretado al menos las etapas de *Producción de Leche* (PL), *Manufactura* (M) y *Empaquetado* (E). El proceso de producción de leche contempla múltiples impactos ambientales, pero en especial, emisiones acumulativas de GEI, los cuales se atribuyen principalmente a la forma de alimentación vacuna, método de producción de leche y manejo de estiércol. Por su parte, la etapa de manufactura demanda procesos térmicos, conversión de materia prima, limpieza, saneamiento, entre otros; los cuales generan emisiones a la atmósfera, alto consumo de energía y agua, generación de residuos sólidos e higiénicos, entre otros aspectos. El empaquetado involucra impactos según el sistema empleado, sin embargo, el uso de energía y generación de residuos figuran como las principales afectaciones ambientales de esta etapa [5].

Es por esto, que la problemática ligada a dichos patrones de trabajo demanda concretar una adecuada y responsable GA en la industria de lácteos de manera que, a través del establecimiento de evaluaciones y mediciones de desempeño ambiental, sea posible prevenir las consecuencias de la utilización insostenible de los recursos y los IAs adversos [6].

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo evaluar el impacto ambiental de una planta de lácteos en Costa Rica, mediante la identificación, valoración y priorización de los aspectos e impactos ambientales, utilizando como insumo principal la metodología denominada Matriz de Importancia de Impacto Ambiental (MIIA).

Metodología

Este artículo, refleja la EIA realizada en una planta de producción de lácteos en Costa Rica, mediante el análisis del proceso de producción de los productos de mayor demanda. El estudio fue realizado por un período de 5 meses (julio a noviembre del 2019), mediante la realización de visitas a las instalaciones de la planta de lácteos. La evaluación se realizó según las siguientes tres etapas:

1. Identificación de aspectos e impactos ambientales

Se realizó un total de 6 visitas a las instalaciones de la planta de producción de lácteos. Durante las inspecciones de campo, se identificaron las entradas y salidas del proceso productivo y sus principales materias primas e insumos, se estudió el diagrama general del proceso mediante el uso de balances de masa y energía. Además, se ejecutaron entrevistas, encuestas, listas de chequeo y reuniones con grupos focales de la industria en estudio. Se realizaron además reuniones con expertos internos (de la empresa) y externos en el tema de evaluación y gestión ambiental.

Producto de las actividades mencionadas, se generó una base de datos con los AAs e IAs del proceso productivo de la empresa de lácteos.

2. Valoración de los aspectos e impactos ambientales

La valoración del impacto ambiental (IA) de cada aspecto ambiental (AA) se realizó utilizando la Matriz de Importancia de Impacto Ambiental (MIIA) descrita en el Anexo 2 del decreto costarricense N°32966 *Manual de instrumentos Técnicos para el proceso de Evaluación del Impacto Ambiental* denominado “Instrumento para la valoración de impactos ambientales” [7]. La escogencia de los criterios a incluir en la MIIA se realizó mediante la información recopilada en el trabajo de campo y con base al criterio de los encargados de la empresa y expertos externos en el tema. En el cuadro 1 se incluyen los factores de evaluación (signo, extensión, intensidad, momento, persistencia, reversibilidad, recuperabilidad, acumulación, sinergia, efecto y periodicidad) que utiliza la MIIA para la evaluación del IA de cada AA. Se incluye además en el cuadro los criterios de campo utilizado para definir el valor del factor incluido en la MIIA, en este caso en particular, se incluye en el cuadro 1 información relativa al IA del AA denominado “Emisiones de fuentes fijas”.

3. Priorización de aspectos e impactos ambientales

El valor de importancia del IA de cada AA se determinó mediante la ecuación 1:

$$I = \pm (3IN + 2EX + MO + PE + PV + SI + AC + EF + PR + MC) \quad (\text{Ecuación 1})$$

La priorización de cada AA e IA se realizó mediante las escalas de valoración de impacto e importancia del impacto incluidas en el cuadro 2. De esta forma un AA puede ser clasificado en; irrelevante negativo, crítico negativo, severo positivo, irrelevante positivo, entre otros.

Posteriormente, se agruparon los AAs según el componente ambiental (Aire, Agua, Suelo y Recursos Naturales) sobre el cual recae el IA, asignándose un valor de IA (sobre determinado componente ambiental) resultante del promedio de los valores individuales de importancia de cada IA.

Cuadro 1. Criterios utilizados para la valoración del AA “Emisiones de fuentes fijas”.

Factor de MIIA	Significado según MIIA	Criterios utilizados para valorar el aspecto ambiental	Factor MIIA	Significado según MIIA	Criterios utilizados para valorar el aspecto ambiental
Signo	Hace alusión al carácter beneficioso (+) o perjudicial (-) de las distintas acciones.	(+): Se cuenta con un sistema de control de emisiones. (-): No se cuenta con un sistema de control de emisiones.	Reversibilidad (RE)	Posibilidad de reconstrucción del factor afectado por medios naturales: (1) menos de 1 año (2) de 1 año a 5 años (4) irreversible o dura más de 5 años.	Mismo criterio indicado en la MIIA. Existencia de ventilación natural.
Intensidad (IN)	Grado de incidencia de la acción sobre el factor en términos de porcentaje del área del proyecto Baja (1) Media (2) Alta (4) Muy alta (8) Total (12)	Porcentaje de área de la planta de lácteos, donde se desarrolla el AA. (1): Área ≤ 20% (2): Área 21%-39% (4): Área 40%-59% (8): Área 60%-79% (12): Área ≥ 80%	Recuperabilidad (MC)	Posibilidad de reconstrucción, total o parcial, por medio de la intervención humana Recuperable inmediato (1) Recuperable a medio plazo (2) Recuperable parcialmente (4) Irrecuperable (8)	Empresa cuenta con programas de gestión ambiental, responsable ambiental, política internas y control de emisiones. (1): dispone con 4/4 (2): dispone con 3/4 (4): dispone con 1/4 (8): dispone con 0/4
Extensión (EX)	Porcentaje de área del entorno en que se manifiesta el efecto Puntual (1) Parcial (2) Extenso (4) Total (8) Crítica (12)	Magnificación del AA en relación con el tratamiento aplicado: (1): Lechería + 1 equipo con tratamiento (2): Lechería + varios equipos con tratamiento (4): Lechería + 1 equipo sin tratamiento (8): Lechería + varios equipos sin tratamiento (12): Leche + varios equipos sin tratamiento y en zona abierta	Acumulación (AC)	Incremento progresivo de la manifestación del efecto Simple (1) Acumulativo (4)	Cantidad de días de la semana en que se generan las emisiones: (1): ≤ 2 (4): > 2
Momento (MO)	Tiempo que transcurre entre la aparición de la acción y el comienzo del efecto (1) tiempo mayor a 5 años (2) entre 1-5 años (4) tiempo inferior a 1 año (8) tiempo transcurrido nulo (+4) crítico	Con relación a los sistemas de tratamiento con que se cuenta: (1): Localizados y generales (2): Localizados (4): Generales (8): Sin tratamiento	Sinergia (SI)	Cuando dos aspectos en el mismo medio ocurren de forma simultánea (1) no sinérgico con otras acciones (2) sinergia moderada, su efecto se magnifica en un 30%. (4) altamente sinérgico, su efecto se magnifica en más de un 30%.	Existencia de otras actividades similares en un radio de 500 m: (1): no existen actividades similares (2): existen en un radio > 500 m (4): existen en un radio < 500 m
Persistencia (PE)	Tiempo duración de retorno a condiciones iniciales por medios naturales o medidas correctoras (1) efecto dura menos de un año (2) entre 1-5 años (4) superior a los 5 años	Existencia de protocolos para el control de las emisiones internas y alrededores (1): Existe protocolo para control de emisiones y efecto en los alrededores (2): Existe protocolo para control de emisiones, pero solo internamente (4): No existe protocolo para control de emisiones internas y en alrededores	Efecto (EF)	Forma de manifestación del efecto sobre un factor, como consecuencia de una acción. Indirecto (1) Directo (4)	Existencia o no de sistemas de tratamiento de emisiones: (1): Existe (4): No existe
			Periodicidad (PR)	Regularidad en la manifestación del efecto Irregular (1) Periódico (2) Continuo (4)	Regularidad en la manifestación del AA (1): 1 día/semana (2): 2 días/semana (4): ≥ 3 días/semana

Cuadro 2. Priorización de los aspectos ambientales.

Importancia	Rango	Color	Priorización
Valores de importancia signo negativo			
Irrelevante negativo	< -25		Bajo
Moderado negativo	-25 a -50		Moderado
Severo negativo	-50 a -75		Severo
Crítico negativo	> -75		Alto
Valores de importancia signo positivo			
Crítico positivo	< +25		Bajo
Severo positivo	+25 a +50		Moderado
Moderado positivo	+50 a +75		Severo
Irrelevante positivo	> +75		Alto

Resultados y discusión

Identificación de aspectos e impactos ambientales

En total se identificaron 9 AAs y 4 IAs, siendo los principales AAs las emisiones a la atmósfera, el uso de combustibles y el consumo de agua y de energía eléctrica. En el cuadro 3 se incluyen los AAs e IAs identificados, así como las principales fuentes de generación en términos del espacio físico de la planta de lácteos y una descripción de estas.

Según el cuadro anterior, las principales fuentes generadoras de IA son las denominadas “Lechería” y “Producción de lácteos”. En el caso de la “Lechería” su principal AA es la generación de aguas residuales, procedentes principalmente del lavado de equipos y pisos, así como el aporte de aguas residuales de carácter especial, cuya fuente de generación es el suero de la leche, además la “Lechería” incide en la totalidad de IAs identificados. El componente ambiental sobre el cual recaen la mayor cantidad de AAs es el denominado aire, con tres AAs (Emisiones de fuentes fijas, Emisiones de olores y Uso de combustibles) generando un impacto ambiental definido como “Contaminación de la atmósfera”. En el caso de la “Producción de lácteos”, su principal AA es el “Consumo de agua” producto del lavado de pisos y equipos. Los IAs generados por la producción de lácteos son “Contaminación de agua superficial y subterránea” y “Agotamiento de recursos naturales”.

Valoración y priorización de los aspectos e impactos identificados

Un ejemplo de la valoración de un aspecto ambiental en particular (Emisiones de fuentes fijas) según lo descrito por la matriz MIIA y los criterios de campo (ver cuadro 1), se muestra en el cuadro 4.

Cuadro 3. Aspectos e impactos ambientales identificados en la Planta de Lácteos.

Fuente	Descripción	Aspecto Ambiental	Impacto Ambiental	Componente Ambiental
Caldera y Lechería	Generación de gases de combustión producto de la quema de diésel para abastecimiento energético.	Emisiones de fuentes fijas	Contaminación de la atmósfera	Aire
Lechería	Generación de olores producto del excremento vacuno en el proceso de extracción de la leche.	Emisiones de olores		
Caldera	Quema de diésel para la producción de vapor de agua.	Uso de combustibles		
Lechería y Producción de Lácteos	Aguas residuales ordinarias (lavados de equipos y pisos) y aguas residuales especiales (suero de la leche)	Generación de aguas residuales	Contaminación de agua superficial y subterránea	Agua
Lechería y Producción de Lácteos	Productos de limpieza con propiedades básicas, ácidas y tensoactivos para el lavado de pisos y equipo.	Utilización de productos de limpieza		
Lechería	Generación de excretas durante el proceso de extracción de la leche.	Generación de excremento vacuno	Contaminación del suelo	Suelo
Vestidores, Oficinas, Almacenamiento de Materia Prima, Empaque de Productos	Disposición de guantes, cofias, envolturas, plástico de empaque, botellas, papel, etiquetas.	Generación de residuos sólidos		
Lechería, Producción de Lácteos y Vestidores	Consumo de agua para los procesos productivos, lavado de pisos y equipo	Consumo de agua	Agotamiento de recursos naturales	Recursos naturales
Toda la Planta de Lácteos	Utilización de equipos, luces, computadoras	Abastecimiento externo de energía eléctrica		

Cuadro 4. Ejemplo para la evaluación del aspecto ambiental Emisiones de fuentes fijas.

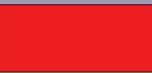
Factor Ambiental de MIIA	Valor MIIA	Justificación (criterios de campo)
Signo	-	No se cuenta con un sistema de control de emisiones para la sección de lechería y para la caldera.
Intensidad	2	La influencia de la caldera y lechería, con respecto al área total de la planta, aportan en un 23,2%.
Extensión	4	Las emisiones se generan por parte de la caldera en la etapa de pasteurización de la leche y los gases generados por las vacas de la “Lechería”. En ambos casos no hay control de emisiones.
Momento	8	No hay sistema de tratamiento para las emisiones fijas.
Persistencia	4	No existe protocolo que permita el control de emisiones y su efecto en los alrededores.
Reversibilidad	2	En la planta prevalece un sistema de ventilación natural que se limita al acceso de aire que ingresa por puertas y ventanas.
Recuperabilidad	2	La planta cuenta con un seguimiento en las emisiones de la caldera y además se han desarrollado estudios referentes a la emisión de gases por parte de las vacas. Aunado a esto, la planta cuenta con un Plan de Gestión Ambiental Institucional y un responsable ambiental.
Acumulación	4	Se hace uso de la caldera al menos tres días a la semana y las vacas generan emisiones todos los días de la semana.
Sinergia	2	En un radio de 500 m a la redonda de la planta se desarrollan actividades agropecuarias similares.
Efecto	4	No existe un sistema de control de emisiones. Se cuenta con un biodigestor, sin embargo, este no funciona actualmente.
Periodicidad	4	El ordeño de las vacas se desarrolla todos los días a la semana y la planta produce al menos 3 días a la semana.

Los valores obtenidos para cada IA en función a la evaluación de su AA se observan en el cuadro 5. Para obtener el valor de importancia de cada AA se utilizó la Ecuación 1. La interpretación de la importancia indicada se realiza de acuerdo con los rangos indicados en el cuadro 2. Como se puede observar en el cuadro 5 y en la figura 1, en total existen dos AAs (generación de aguas residuales y utilización de productos de limpieza) con un IA clasificado como irrelevante positivo; dos AAs (generación de excremento vacuno y generación de residuos sólidos) severos positivos; dos AAs (emisiones de fuentes fijas y uso de combustibles) moderados negativos; dos AAs (abastecimiento externo de energía eléctrica y emisiones de olores) severos negativos; y un AA (consumo de agua) crítico negativo.

Según los resultados de la figura 1 y del cuadro 5 los AAs con mayor impacto positivo al ambiente son la generación de excremento vacuno, la generación de residuos sólidos, la generación de aguas residuales y la utilización de productos de limpieza, con valores de importancia de impacto de +25, +25, +78 y +79, respectivamente. El impacto positivo del AA denominado “Generación de excremento vacuno” obedece a que todo el residuo recolectado es utilizado para la generación de *lombricompost*; el cual, es comúnmente utilizado como medio de crecimiento para la horticultura ya que tiene un alto contenido de nutrientes disponibles y promotores del crecimiento de las plantas [8], el mismo, posteriormente tiene como disposición final su utilización en cursos impartidos en la universidad, así como su venta y distribución en los potreros aledaños, justificando así el valor positivo de importancia de impacto. El AA “Generación de excremento vacuno” produce un IA sobre el componente “suelo” categorizado como “severo positivo”.

Para el caso del AA denominado “*Generación de residuos sólidos*” su efecto positivo se debe a la adecuada separación y recolección de los residuos, que, además son tratados por un ente externo. Este AA genera un IA considerado como “severo positivo” (valor de importancia es de +25) sobre el componente ambiental “suelo”. Los residuos sólidos generados y sus fuentes de generación representan solo el 8,4% del área total de la planta.

Cuadro 5. Importancia de los aspectos ambientales identificados.

Importancia de los impactos ambientales positivos (MIIA)						
Aspecto Ambiental	Impacto Ambiental	Componente Ambiental	Valor de Importancia	Importancia	Rango	Color
Generación de excremento vacuno	Contaminación del suelo	Suelo	25	Severo positivo	+25 a +50	
Generación de residuos sólidos			25			
Generación de aguas residuales	Contaminación de agua superficial y subterránea	Agua	78	Irrelevante positivo	> +75	
Utilización de productos de limpieza			79			
Importancia de los impactos ambientales negativos (MIIA)						
Aspecto Ambiental	Impacto Ambiental	Componente Ambiental	Valor de Importancia	Importancia	Rango	Color
Consumo de agua	Agotamiento de recursos naturales	Recursos naturales	-87	Crítico negativo	> -75	
Abastecimiento externo de energía eléctrica			-65	Severo negativo	-50 a -75	
Emissiones de olores	Contaminación de la atmósfera	Aire	-52			
Emissiones de fuentes fijas			-44	Moderado negativo	-25 a -50	
Uso de combustibles			-27			

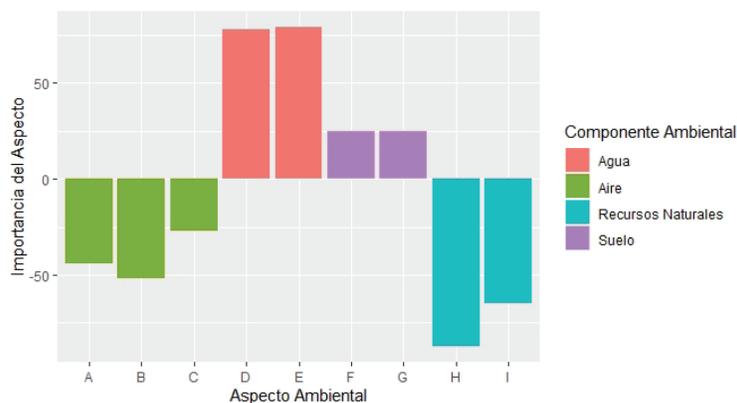


Figura 1. Descripción gráfica de la importancia de los aspectos ambientales para A: Emisiones de fuentes fijas; B: Emisiones de olores; C: Uso de combustibles; D: Generación de aguas residuales; E: Utilización de productos de limpieza; F: Generación de excremento vacuno; G: Generación de residuos sólidos; H: Consumo de agua; I: Abastecimiento externo de energía eléctrica.

El AA “Generación de aguas residuales”, presenta un IA categorizado como “irrelevante positivo”, con un valor de importancia de +78 sobre el componente ambiental “agua”. Esta afectación ambiental positiva está en función a la gestión interna de las aguas residuales de la planta, las cuales son canalizadas y transportadas hacia una laguna de oxidación para su tratamiento, sistema que cumple con los parámetros operacionales normados (Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales, Decreto N° 33601) para descargar las aguas al cuerpo receptor final. Aunado a esto, la producción de quesos se caracteriza por la generación de suero, lo cual es la porción líquida producida durante la coagulación de la caseína de la leche [9], que para el caso de la planta se generan aproximadamente 9 litros de suero por cada 10 litros de leche que ingresan al proceso. La inadecuada disposición de suero puede generar afectaciones de las características fisicoquímicas del suelo reducción del oxígeno disuelto de cuerpos de agua, obstaculización de la biodegradabilidad y en general representa un riesgo para la vida acuática, el ambiente y la salud humana [10]; a pesar de esto, la disposición del suero residual en la laguna de oxidación posibilita la dilución del contaminante, lo que asegura valores permisibles en la disposición final del agua residual.

La utilización de productos de limpieza es el AA que representa el mayor IA positivo (+79, “irrelevante positivo”), este valor obedece a que los productos de limpieza utilizados en la lechería y en la planta de lácteos, son materiales biodegradables. Los productos de limpieza utilizados reportan valores de Demanda Química de Oxígeno(DQO) de 300 mg/L como valor máximo, mientras que los reportes operacionales de la laguna de oxidación indican un valor promedio de DQO de 84 mg/L; por lo que este AA representa un valor positivo al tratarse de productos de rápida degradación.

Por otra parte, como se observa en la figura 1 y cuadro 5, los principales IAs con carácter negativo proceden AAs como consumo de agua, abastecimiento externo de energía, emisión de olores, emisiones de fuentes fijas y uso de combustibles.

El consumo de agua representa el aspecto con mayor IA negativo identificado, con un valor de importancia del de -87 sobre el componente ambiental “recursos naturales”, dicho valor corresponde a una importancia de “crítico negativo” y de alta prioridad. El impacto negativo de este AA se debe principalmente a la ausencia de equipos automatizados y la no puesta en marcha de prácticas de recirculación de las aguas para ser utilizada dentro de la planta. Problemática a la que se le suma el hecho de que el agua utilizada en la planta es captada de un pozo lo que implica que el IA denominado agotamiento de recursos naturales es aún más crítico.

El AA “abastecimiento externo de energía eléctrica” es el segundo con mayor valor de importancia negativa (-65), clasificándose como “severo negativo”. Esta clasificación se debe principalmente a la utilización de recursos no renovables para la producción de energía eléctrica y al consumo permanente de energía. El consumo de una fuente externa renovable, aporta a la reducción de las emisiones de CO₂ y la protección del medio ambiente [11], situación que no se presenta actualmente en el proceso.

El valor negativo (-52, clasificándose como “severo negativo”) del AA denominado “emisiones de olores”, obedece al olor generado por las actividades del proceso, especialmente en la lechería. Las respuestas de los funcionarios entrevistados y las visitas de campo realizadas evidencia que esta percepción de olor es permanente, además no se dispone de sistema de tratamiento de olores. Según la actividad del sector agroindustrial, la fabricación de productos lácteos presenta intrínsecamente emisiones de gases como el amoníaco y el metano [12].

El AA “emisiones de fuentes fijas” presenta un valor de importancia de impacto sobre el aire de -44 (moderado negativo). En el sitio de estudio no se dispone de un sistema para la canalización, extracción y tratamiento de emisiones gaseosas. Las principales fuentes de generación de

emisiones de fuentes fijas son la lechería y caldera, áreas que representan conjuntamente menos del 27% del área total de la planta. El AA denominado “uso de combustible” presenta un valor de importancia de IA de -27 (“moderado negativo”). El combustible es utilizado en la caldera de la planta de productos lácteos, la cual representa un área < 20% del total de la misma. No obstante, la principal causa del IA negativo de este AA es la materia prima utilizada como combustible, en este caso particular, el diésel.

Cuadro 6. Importancia y priorización de los impactos ambientales identificados.

Aspecto Ambiental	Impacto Ambiental	Componente Ambiental	Importancia del Impacto	Interpretación	Color	Valor promedio	Priorización de impacto
Emisiones de fuentes fijas	Contaminación a la atmósfera	Aire	-44	Moderado negativo	Yellow	-41	Moderado impacto ambiental
Emisiones de olores			-52	Severo negativo	Orange		
Uso de combustibles fósiles			-27	Moderado negativo	Yellow		
Generación de aguas residuales	Contaminación de agua superficial y subterránea	Agua	78	Irrelevante positivo	Green	78,5	Bajo impacto ambiental
Utilización de productos de limpieza			79				
Generación de excremento vacuno	Contaminación al suelo	Suelo	25	Severo positivo	Orange	25	Severo impacto ambiental
Generación de residuos sólidos			25				
Consumo de agua	Agotamiento de recursos naturales	Recursos naturales	-87	Crítico negativo	Red	-76	Alto impacto ambiental
Abastecimiento externo de energía eléctrica			-65	Severo negativo	Orange		

El figura 2 y Cuadro 6 muestra el valor promedio del IA procedente de los diferentes AAs que lo conforman. Los principales IAs de carácter negativo son la contaminación a la atmósfera y el agotamiento de los recursos naturales, con valores promedios de -41 y -76, respectivamente. Estos IAs corresponden a los AAs denominados, emisiones de fuentes fijas, emisiones de olores, uso de combustibles fósiles, consumo de agua y abastecimiento externo de energía eléctrica. Por otro lado, los valores positivos promedio de importancia de IA obedecen a los AAs catalogados como, generación de aguas residuales, utilización de productos de limpieza, generación de excremento vacuno y generación de residuos sólidos. Los IAs generados por estos AAs son la contaminación de agua superficial y subterránea y la contaminación al suelo, con valores promedio de impacto de 78,5 y 25, respectivamente.

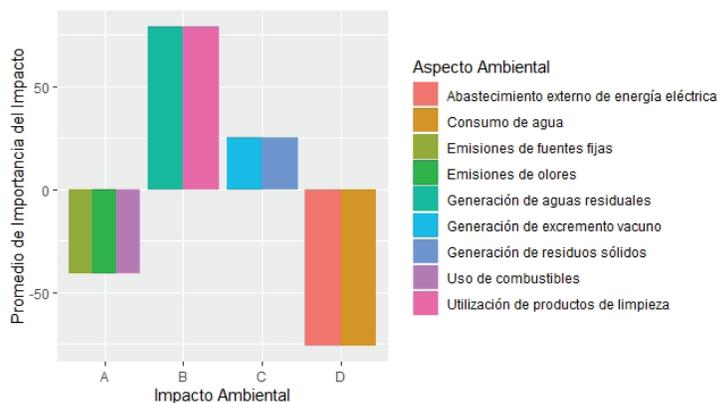


Figura 2. Descripción gráfica del promedio de importancia del impacto para A: Contaminación de la atmósfera; B: Contaminación de agua superficial y subterránea; C: Contaminación del suelo; D: Agotamiento de recursos naturales.

El *Agotamiento de Recursos Naturales* se cataloga como el IA con la más alta priorización, por lo cual se deben tomar medidas inmediatas para reducir el agotamiento de los recursos naturales producto del consumo de agua y el abastecimiento externo de energía. Las emisiones a la atmósfera también deben ser reducidas, al ocasionar una moderada contaminación a la atmósfera. Por el contrario, la contaminación de agua superficial y subterránea producto de la generación de aguas residuales y de la utilización de productos de limpieza es el impacto más bajo de todos, debido a su depuración en el sistema de lagunas de oxidación. Por último, la *Contaminación al Suelo* es considerada severa positiva, lo cual indica que los AAs que generan estos impactos están siendo controlados, sin embargo, es importante establecer mejoras para disminuir su generación y, de esta forma, ocasionar un menor IA.

Conclusiones y Recomendaciones

La elaboración de la MIIA permitió identificar los AAs que contribuyen al IA derivado de la operación de la planta de producción de lácteos; de los que destacan las emisiones de fuentes fijas y olores, consumo de agua y energía, generación de excremento vacuno, entre otros.

La evaluación, cuantificación y posterior priorización de los AAs determinó que existen dos AA con un IA severo positivo, dos AA con un IA irrelevante positivo, dos AA con un IA moderado negativo, dos AA con IA severo negativo y un AA con IA crítico negativo.

Los AAs con valores de impacto beneficioso al ambiente son: utilización de productos de limpieza (+79), generación de aguas residuales (+78), generación de residuos sólidos (+25) y generación de excremento vacuno (+25). Esto se debe a que la contaminación al agua y al suelo ocasionada por estos AAs es mínima debido a la correcta gestión de las aguas residuales y los residuos sólidos.

Los tres AAs con valores de impacto más negativo al ambiente son: consumo de agua (-87), abastecimiento externo de energía eléctrica (-65) y emisiones de olores (-52). En el caso del AA "consumo de agua", se da en más del 80% del área total de toda la planta, utilizándose en varias etapas del proceso productivo y sin contar con sistemas de recirculación. Por otra parte, los principales valores promedios de los IAs de carácter negativo son: consumo de agua, abastecimiento externo de energía eléctrica, emisiones de olores y emisiones de fuentes fijas, los cuales coinciden con los respectivos AAs.

Se recomienda a la empresa la optimización de los procedimientos de producción, de manera que se pueda minimizar el consumo de agua y energía eléctrica; así como, la mejora de los medidores de agua y luz de manera que permiten un adecuado monitoreo del consumo y por ende la reducción del impacto ambiental identificado.

Referencias

- [1] D. A. Lubin and D. . Esty, "The sustainability imperative," *Harv. Bus. Rev.*, vol. 88, no. 5, pp. 42–50, 2010.
- [2] J. Toro, O. Duarte, I. Requena, and M. Zamorano, "Determining Vulnerability Importance in Environmental Impact Assessment. The case of Colombia," *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 32, no. 1, pp. 107–117, Jan. 2012.
- [3] F. Wiengarten and M. Pagell, "The importance of quality management for the success of environmental management initiatives," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 140, no. 1, pp. 407–415, Nov. 2012.
- [4] I. Djekic, J. Miodinovic, I. Tomasevic, N. Smigic, and N. Tomic, "Environmental life-cycle assessment of various dairy products," *J. Clean. Prod.*, vol. 68, pp. 64–72, Apr. 2014.
- [5] F. X. Milani, D. Nutter, and G. Thoma, "Invited review: Environmental impacts of dairy processing and products: A review," *Journal of Dairy Science*, vol. 94, no. 9, pp. 4243–4254, Sep-2011.
- [6] M. Herva, A. Franco, E. F. Carrasco, and E. Roca, "Review of corporate environmental indicators," *J. Clean. Prod.*, vol. 19, no. 15, pp. 1687–1699, 2011.
- [7] "Decreto Ejecutivo N° 34375-MINAE," *Procuraduría General de la República*, 2007.
- [8] O. L. Hernandez *et al.*, "Humic substances from vermicompost enhance urban lettuce production," *Agron. Sustain. Dev.*, vol. 35, no. 1, pp. 225–232, 2014.
- [9] F. Carvalho, A. R. Prazeres, and J. Rivas, "Cheese whey wastewater: Characterization and treatment," *Sci. Total Environ.*, vol. 445–446, pp. 385–396, 2013.
- [10] J. S. S. Yadav, S. Yan, S. Pilli, L. Kumar, R. D. Tyagi, and R. Y. Surampalli, "Cheese whey: A potential resource to transform into bioprotein, functional/nutritional proteins and bioactive peptides," *Biotechnol. Adv.*, vol. 33, no. 6, pp. 756–774, 2015.
- [11] S. Khoshnevis Yazdi and B. Shakouri, "Renewable energy, nonrenewable energy consumption, and economic growth," *Energy Sources, Part B Econ. Plan. Policy*, vol. 12, no. 12, pp. 1038–1045, 2017.
- [12] A. Fredeen, S. Juurlink, M. Main, T. Astatkie, and R. C. Martin, "Implications of dairy systems on enteric methane and postulated effects on total greenhouse gas emission," *Animal*, vol. 7, no. 11, pp. 1875–1883, 2013.

Pesca de *Octopus* sp. en las costas de Cuajiniquil, Guanacaste, Costa Rica

Octopus sp. fishing on the coast of Cuajiniquil, Guanacaste, Costa Rica

Adrián Mora-Gamboa¹, Milagro Carvajal-Oses²,
Roel Campos-Rodríguez³

Fecha de recepción: 8 de junio de 2020

Fecha de aprobación: 13 de setiembre de 2020

Mora-Gamboa, A; Carvajal-Oses, M;
Campos-Rodríguez, R. Pesca de *Octopus* sp. en las costas de Cuajiniquil, Guanacaste, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-3 Julio-Setiembre 2021. Pág 96-107.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5205>

- 1 Maestría en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción. Instituto Costarricense de Pesca y Acuicultura (INCOPESCA), Departamento de Extensión y Capacitación, Puntarenas, Costa Rica.
Correo electrónico: amora@incopesca.go.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-4811-7975>
- 2 Académica Escuela Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional de Costa Rica/ Parque Marino del Pacífico, Puntarenas, Costa Rica.
Correo electrónico: milagro.carvajal.oses@una.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-8294-9863>
- 3 Doctor en Ciencias Naturales para el Desarrollo, docente e investigador de la Escuela de Agronegocios. Coordinador del Área Académica Agroforestal Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: rocampos@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-4460-2313>



Palabras clave

Cefalópodo; biometría; esfuerzo pesquero; flota artesanal.

Resumen

En Cuajiniquil, Pacífico Norte de Costa Rica; se practica la pesquería del pulpo *Octopus* sp. mediante el buceo y el arte de pesca denominado “bichero”, sin embargo, este recurso no ha contado con las medidas necesarias para un manejo sostenible. El objetivo de la investigación es aportar información biológica sobre *Octopus* sp. que permita un aprovechamiento sostenible en Costa Rica. Se realizaron muestreos mensuales durante seis meses entre mayo del 2018 y marzo del 2019 de *Octopus* sp. con ayuda de la flota artesanal en la zona de estudio. Se determinaron los siguientes parámetros biométricos: peso (g), la longitud dorsal del manto (cm), longitud total (cm) y ancho (cm). Se identificó el sexo por medio de la presencia/ausencia del hectocótilo y se obtuvo la relación talla-peso. Solo existieron diferencias significativas en el ancho (cm) de los organismos de acuerdo al sexo ($p < 0,05$), la proporción entre sexos no mostró diferencias significativas ($p \geq 0,05$), y la relación talla-peso resultó ser alométrico negativo para ambos sexos. Estadísticamente ($p < 0,05$) las tallas menores de organismos se identificaron en la época lluviosa, específicamente noviembre. El arte de pesca utilizado es no selectivo, los datos mostraron que se están pescando organismos de menos tamaño que los establecidos y recomendados en la literatura. En un posible plan de manejo se recomienda no extraer organismos en el mes de noviembre pues existe alta presencia de organismos juveniles y es requerido establecer medidas sostenibles de extracción.

Keywords

Cephalopod; biometry; fishing effort; artisanal fleet.

Abstract

In Cuajiniquil, North Pacific of Costa Rica; *Octopus* sp. through diving and the fishing gear called “hook”, however, this resource has not contacted the necessary measures for sustainable management. The objective of the research is to provide biological information about *Octopus* sp. that allows a sustainable use in Costa Rica. Monthly samplings were carried out for six months between May 2018 and March 2019 of *Octopus* sp. with the help of the artisanal fleet in the study area. The following biometric parameters were determined: weight (g), the dorsal length of the mantle (cm), total length (cm) and width (cm). Sex was identified through the presence / absence of hectocotyl and the length-weight relationship was obtained. There are only determined differences in the width (cm) of the organisms according to sex ($p < 0,05$), the sex ratio without different differences ($p \geq 0,05$), and the height-weight relationship turned out to be negative allometric for both sexes. Statistically ($p < 0,05$) the smallest sizes of organisms were identified in the rainy season, specifically November. The fishing gear used is not selective, the data showed that organisms of smaller sizes than those established and recommended in the literature are being removed. In a possible management plan, it is recommended not to extract organisms in the month of November because there is a high presence of juvenile organisms and it is required to establish sustainable extraction measures.

Introducción

Los octópodos están presentes en regiones tropicales y templadas; son parte de una pequeña clase de moluscos marinos, corresponden a especies bentónicas que habita una gran variedad de fondos, desde rocosos, arenosos hasta praderas submarinas, y en un rango de profundidades muy variado, desde la orilla hasta los 200 metros [1]. Según [2] cuando se encuentra en fondos arenosos es capaz de excavar guaridas para acumular restos de presas. Según estos mismos autores los pulpos pasan la mayor parte de las horas de sol en sus guaridas, saliendo a cazar al anochecer.

Presentan una gran variedad de coloraciones, no obstante, debido a su relación filogenética complica la identificación de las especies por lo que actualmente se utilizan metodologías moleculares cada vez más avanzadas, así por ejemplo el caso de *Octopus vulgaris* el cual se ha dificultado catalogarlo con el estatus de verdadera especie o como un complejo de especies [3].

Se estima que entre los 110-150 días de vida los organismos estén comenzando la madurez sexual, o bien alcanzan la talla de primera madurez, pueden tener dos picos reproductivos al año [4] [5] y la mayoría de las especies viven entre 10 y 15 meses y mueren después del desove [6].

Además, son animales con capacidad para camuflarse; adaptan su visión a diferentes niveles de luz; poseen una línea lateral (análoga a los peces) para escuchar y detectar a larga distancia la presencia de los depredadores; son los únicos cefalópodos con memoria quimiotáctil y presentan un sentido del olfato desarrollado [7].

La mayoría de los cefalópodos, responden rápidamente a las variaciones ambientales debido a que tienen un ciclo de vida corto y se cree que podrían ser especies bioindicadoras del cambio climático [4]. Se ha demostrado que altas temperaturas podrían influenciar en el tiempo de su desarrollo embrionario (de días a meses) e inclusive afectar a los juveniles [8].

En Costa Rica la pesca de pulpo se realiza sobre todo en la especie *Octopus vulgaris*; y de manera general *Octopus* sp. se ha capturado principalmente en las zonas de Sámara, El Coco y Cuajiniquíl [9]. Además, existe una carencia de estudios científicos en *Octopus* sp. lo que ha dificultado establecer las medidas pertinentes para un adecuado ordenamiento pesquero y es que como lo indica [10] datos básicos como tallas mínimas de captura, época y potencial de reproducción son fundamentales para un manejo adecuado de cualquier recurso.

Este trabajo tiene como objetivo aportar información biológica de *Octopus* sp. y su pesquería, que permita el establecimiento de fundamentos científicos para el establecimiento de un manejo sostenible del recurso.

Metodología

Área de estudio

El área de estudio abarcó la plataforma continental y la zona costera alrededor de pueblo de Cuajiniquíl, distrito de San Elena, Cantón de la Cruz, provincia de Guanacaste, Costa Rica y cuyas coordenadas geográficas correspondieron a 10°38'37" N. 85°38'17" W (Figura 1). Los ejemplares de *Octopus* sp., muestreados fueron capturados por la flota artesanal de Cuajiniquíl utilizando el buceo y el "gancho" o fisga como arte de pesca, el cual consistió en una varilla de hierro de 60-80 cm de largo aproximadamente, en cuyo extremo se encuentra un anzuelo amarrado con alambre. La pesca se realizó cerca de las áreas rocosas, a una profundidad entre

2 a 20 metros. Las embarcaciones utilizadas fueron de fibra de vidrio y madera de entre 6 a 7 m de eslora, equipadas con un motor fuera de borda de entre 70 a 115 caballos de fuerza y participaron de 3 a 4 buzos por embarcación. Los registros se llevaron a cabo en los meses de mayo, agosto, setiembre y noviembre del 2018; y entre febrero y marzo del 2019. Se realizaron mediciones biométricas para 137 individuos.

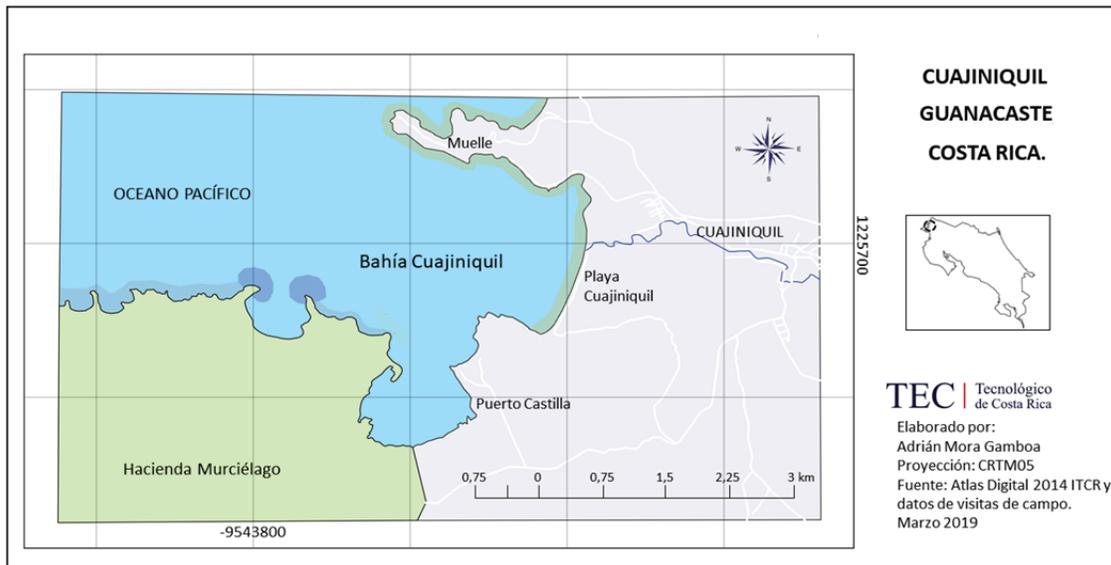


Figura 1. Área de estudio, Cuajiniquil, Guanacaste, Costa Rica.

Parámetros biométricos

Se registraron las siguientes variables para todos los organismos capturados, peso (g) para lo cual se utilizó una balanza digital con capacidad mínima de 20 gramos y máxima de 30 kg, para la longitud dorsal del manto (LDM) (cm); el ancho del manto (cm) y longitud total (cm) se utilizó un ictiómetro de madera con precisión de centímetros y una longitud total de 1 metro. Se determinó el sexo mediante la presencia o ausencia del órgano sexual denominado hectocótilo.

Relación talla-peso

Los datos obtenidos de longitud y peso total se examinaron mediante la hoja de cálculo de Microsoft Excel, con el fin de determinar el tipo de crecimiento tanto isométrico como alométrico de acuerdo al sexo. Un valor de $b = 3$ indica crecimiento isométrico, mientras que los valores de $b < 3$ indican crecimiento alométrico negativo y valores de $b > 3$ indican crecimiento alométrico positivo [11] [12] [13]. Las estimaciones fueron conducidas para obtener la ecuación potencial de las relaciones corporales [11]:

$$P = a (Lt)^b$$

Donde:

P : peso en gramos

a : Factor de condición

Lt : longitud total en cm

b : pendiente.

Esfuerzo Pesquero y Caracterización de la flota

La captura por unidad de esfuerzo (CPUE) de los meses que comprendió la toma de datos, se estimó relacionando la captura (C) en kilogramos (kg) y el esfuerzo de pesca (E) en horas efectivas de pesca según la ecuación de [14].

$$CPUE = \frac{C}{E}$$

Se analizó las frecuencias de captura de acuerdo al peso (g), LDM (cm) y el sexo, esto con el fin de determinar el nivel de selectividad del arte de pesca utilizado.

Análisis estadístico

Se utilizaron las variables de longitud, peso, LDM, y ancho y se compararon de acuerdo a la época climática (época seca: febrero y marzo; época lluviosa: mayo, agosto, setiembre, noviembre), mes muestreado y sexo. Se verificó la normalidad y homocedasticidad de los datos. Solamente, la longitud cumplió con ambos aspectos por tanto se utilizó la Prueba de Fisher para dicha variable. En cuanto a las otras variables se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis.

Para la proporción de hembras- machos se realizó una prueba Chi-cuadrado (χ^2) para determinar si la proporción de sexos difiere a 1:1. Fueron excluidos del análisis los individuos en que no fue posible identificar el sexo. Para todos los análisis se consideró un nivel de significancia (α) de 0,05. Se utilizó el programa estadístico del INFOSTAT [15].

Resultados y discusión

Parámetros biométricos

Se registró un total de 137 individuos de *Octopus* sp.; 56 machos para un porcentaje del 41%, 63 hembras para un total de 46% de la muestra y 18 indefinidos que representaron el 13%. Al comparar estadísticamente todos los meses analizados, no existieron diferencias significativas en la proporción de machos y hembras ($p \geq 0,05$). [16] indican que la proporción de sexos depende de la región geográfica, del tipo de muestreo que se realice y según [17] también es dependiente de la disponibilidad de refugios. Sin embargo, al evaluar los meses de manera unitaria, en noviembre ($p < 0,05$) se reportaron mayor cantidad de machos, lo anterior puede estar relacionado al cuidado parental característico en los octópodos [18] realizado posiblemente en el mes anterior. Durante este periodo de cuidado la hembra protege la puesta de huevos hasta la eclosión, sin alimentarse [19] lo habitual es que utilicen sus propias reservas energéticas para mantenerse vivas y con ello, asegurar un desarrollo embrionario exitoso, poco antes del desove dejan de alimentarse y permanecen exclusivamente en el cuidado, casi al mismo tiempo, o poco después que estos eclosionan, ocurre la muerte de la hembra [20].

Los meses de septiembre (21 ♂ y 25 ♀) y marzo (10 ♂ y 15 ♀) correspondieron a los de mayor captura lo cual coincide con lo reportado [21] en su estudio de *Octopus vulgaris* en Venezuela, mientras que mayo (4 ♂ y 3 ♀), y agosto (4 ♂ y 4 ♀) los de menor captura. Noviembre (9 ♂ y 5 ♀) y febrero (8 ♂ y 11 ♀) presentaron valores intermedios. Solo existieron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en el ancho de los individuos, siendo mayor en hembras, esto podría estar relacionado con alimentación y condiciones reproductivas [22] [23] (cuadro 1).

Cuadro 1. Resumen estadístico de los parámetros biométricos de acuerdo al sexo.

Parámetro biométrico	Sexo		p value
	Macho	Hembra	
Longitud dorsal de manto (cm)	9,17 ±2,56	9,71 ±3,07	0,21
Longitud total (cm)	47,2 ± 10,96	48,1 ± 9,51	0,66
Ancho (cm)	6,60±1,60	6,83±1,38	0,02
Peso (g)	453,78 ±224,1	420 ±197,08	0,09

De acuerdo a la época climática, estadísticamente ($p < 0,05$) se obtuvieron mayores valores en verano tanto para el ancho ($7,18 \pm 1,64$ cm ♂ y $7,22 \pm 1,37$ cm ♀) como para el peso ($0,49 \pm 0,28$ kg ♂ y $0,53 \pm 0,26$ kg ♀) de los individuos muestreados (figura 2).

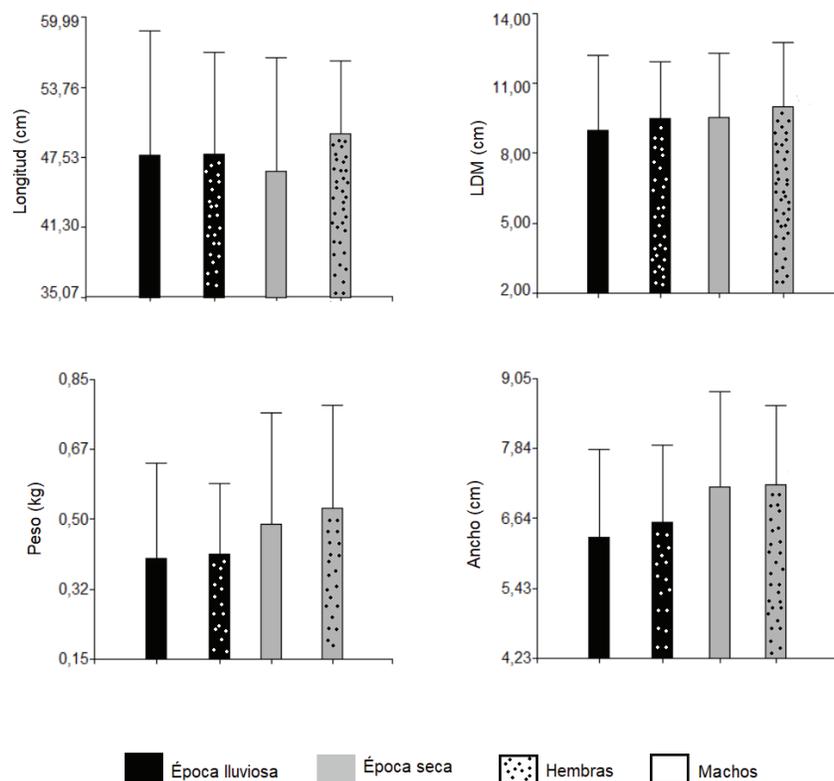


Figura 2. Parámetros biométricos de acuerdo a la época climática en *Octopus sp.*

La diferencia en ancho y peso, puede estar relacionado a que es en la época lluviosa cuando se dan los mayores picos reproductivos, hay mayor presencia de juveniles y por lo tanto menores tallas con respecto al verano [24] y además las hembras podrían estar alimentándose menos [20] por el cuidado parental que posiblemente se da en esta misma época. Según [24] el periodo reproductivo en *O. vulgaris* es irregular, pero puede ser mayor a partir de abril y setiembre/octubre. [16] señala que los pulpos desovan a finales de verano y se da la eclosión en época de invierno cuando se dan variaciones de temperaturas, salinidad y existe mayor plancton disponible. Apoyando los resultados anteriores, noviembre correspondió estadísticamente ($p < 0,05$) al mes donde se reportaron los menores pesos, LDM y ancho de los organismos (mayor presencia de organismos jóvenes); mientras que febrero se identificaron los organismos de mayores pesos, LDM y ancho ($p < 0,05$) (figura 3).

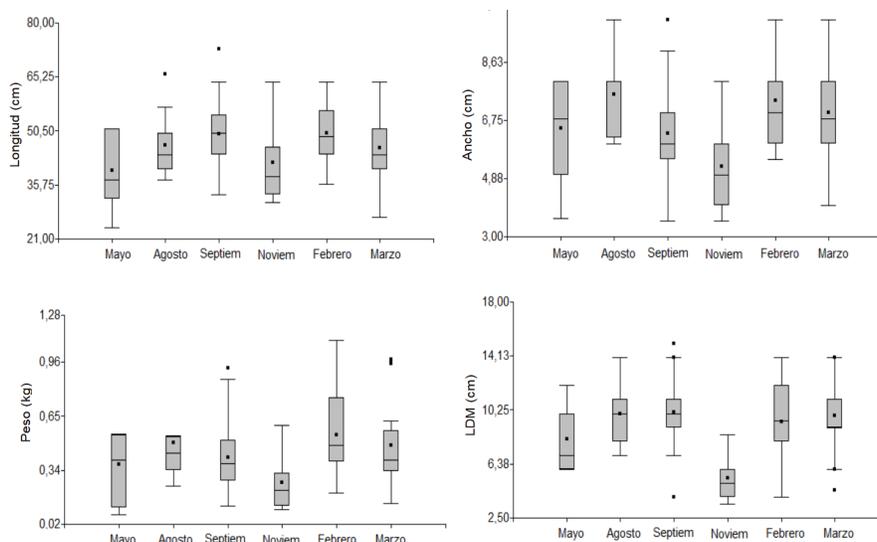


Figura 3. Parámetros biométricos de *Octopus* sp. de acuerdo al mes muestreado.

Relación talla-peso

El valor de b , para machos ($b=1,934$) y hembras ($b=2,176$) indicó un crecimiento alométrico negativo ($b < 3$) (Figura 4), lo cual indica que incrementa su talla de una forma más acelerada que su peso. Este tipo de crecimiento ha sido observado en otras especies de octópodos, como *O.hubbsorum* [25] [26], *O. briareus*, *O. joubini* y *O. digueti* [27]; y es el más comúnmente descrito en cefalópodos, debido a que presentan un crecimiento diferencial entre brazos y manto [28]. El coeficiente b puede variar dentro de poblaciones de la misma especie y de acuerdo a ciclos reproductivos [29]. El estudio de las relaciones longitud-peso brinda información de forma indirecta sobre crecimiento, madurez, desarrollo gonadal y nutrición, siendo útil además para estimar el cambio esperado para grupos de organismos marinos, logrando evaluar la biomasa y stock poblacional [30] [31].

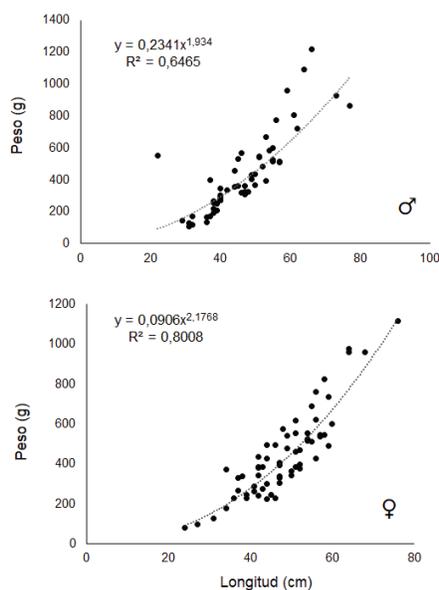


Figura 4. Relación talla – peso para *Octopus* sp, en Cuajiniquil, Guanacaste.

Descripción del Esfuerzo Pesquero y caracterización de la flota artesanal y pesquería

En la costa de Cuajiniquil la pesca de pulpo es artesanal de subsistencia, no existe una flota formalmente estructurada como en otras pesquerías, sino que la misma se dedica a diferentes pescas objetivo [32].

El método de pesca utilizado (gancho o bichero) (figura 5), ha sido criticado y prohibido en diferentes partes del mundo debido a su baja selectividad, sin embargo, aún es utilizado ya que en la actualidad no existe una reglamentación para la pesquería en el litoral Pacífico de Costa Rica [33] [20] [34] y sería improbable hacer extensivas las medidas de regulación establecidas en el Golfo de Nicoya, debido a la diferencia en las condiciones oceanográficas, geomorfológicas, ambientales y operativas con la zona de estudio.



Figura 5. “Bichero”, arte de pesca utilizado para la captura artesanal de pulpo.

Según datos del [35] se registran 17 licencias de pesca que permite la extracción de pulpo, sin embargo, existen aproximadamente 40 pescadores artesanales de pulpo en Cuajiniquil lo cual quiere decir que solo el 35% de estos realiza la actividad de una forma legal. Así por ejemplo, los pescadores de langosta y escama en Cuajiniquil incurren en la captura de pulpo de manera ilegal cuando las capturas de sus especies objetivo son bajas o reducidas y como lo han mencionado [36], ello puede tener un efecto negativo directo sobre las hembras desovantes y posteriormente sobre la progenie y el reclutamiento.

Según [17] los pulpos que se encuentran a profundidades menores a 50 metros tienden a hacer leves movimientos horizontales solamente para alimentarse lo que los hace más vulnerable, por ello este mismo autor recomienda las áreas protegidas para esta especie.

El mayor esfuerzo de pesca se presentó en setiembre posiblemente relacionado al método de muestreo, a las condiciones favorables para el pulpo de temperatura, salinidad y alimento [17] o a ciclos reproductivos y mayores cuidados parentales [20] lo que podría facilitar su captura; mientras que los meses de mayo y agosto correspondió al menor esfuerzo pesquero (Figura 6), y según información recolectada entre los mismos pescadores los meses de diciembre y enero es donde la pesca se centra en otros recursos de peces debido a la disminución de pulpo. Lo anterior coincide con [16] al señalar que en diciembre y enero hay una disminución de organismos (posiblemente por aumento de pesca no artesanal en otros puntos marinos) y a partir de febrero gradualmente aumentan las poblaciones.

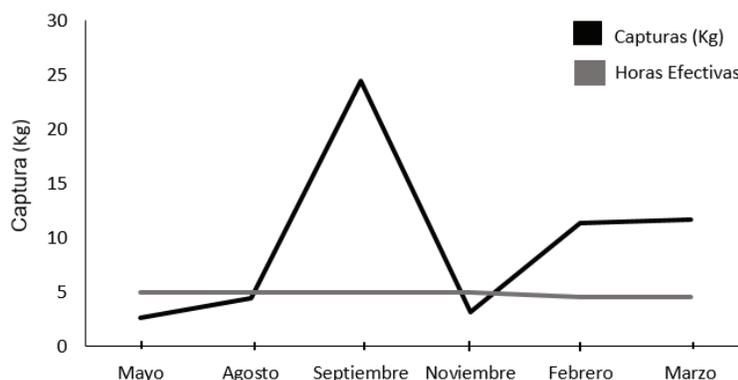


Figura 6. Esfuerzo de Pesca por mes de la flota artesanal de pulpo en Cuajiniquil según muestreos realizados.

Las observaciones de campo sugieren que existe un porcentaje de organismos que se extraen que posiblemente no hayan alcanzado tallas de comercialización adecuadas, de acuerdo a [37] la talla mínima de madurez sexual para *O. vulgaris* en el Golfo de México es de 248 g en machos y en hembras de 612 g, y para este estudio aproximadamente el 40% en los machos tienen pesos menores a 300 g y para hembras cerca del 80% tenían pesos menores a 540 g (46% menos de 300 g) ; según [21] en el caso de *O. vulgaris* alcanzan la zona de pesca alrededor de los 9 cm de longitud, sin embargo en la presente investigación 50% para ambos sexos tenían LDM menores a 9 cm (Figura 7), estos factores pueden estar asociados al tipo de flota, donde operan y el arte de pesca empleado si es o no selectivo, sin embargo existe un fuerte componente humano, y esto se traduce en la falta de normativas y de las buenas prácticas de pesca responsable, de las cuales Costa Rica se encuentra inscrito en el Código de Conducta de Pesca Responsable desde el año 1999 y las directrices voluntarias para lograr la sostenibilidad de la pesca en pequeña escala desde el año 2014, el buceo con “bichero” como método de pesca para la captura de pulpo es ilegal en muchas partes del mundo, ya que afecta directamente a organismos en periodo de reproducción o cuidado de sus huevos [38].

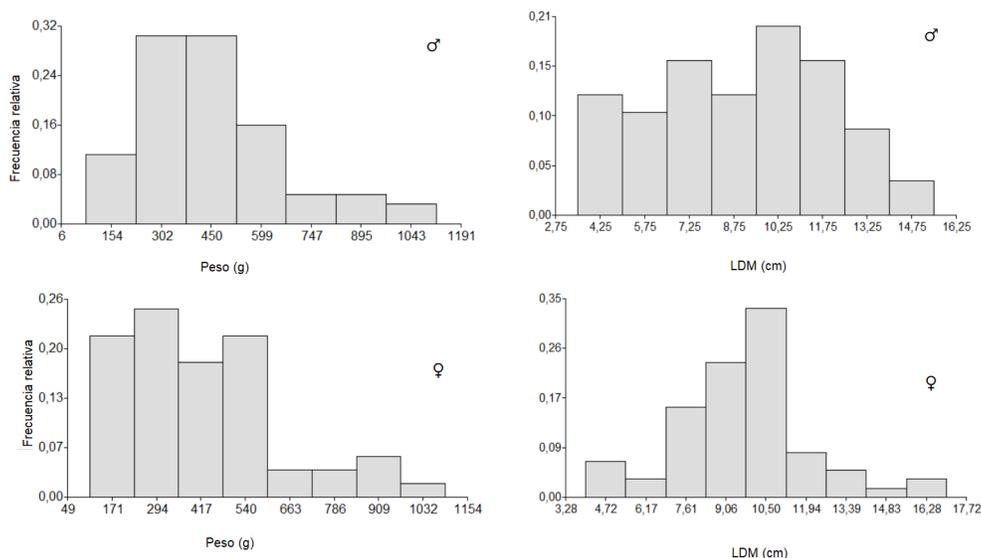


Figura 7. Frecuencia de pesos (g) y LDM (g) en los individuos capturados de acuerdo al sexo en la presente investigación.

La relevancia de considerar los aspectos de mercado en la pesca y el manejo de sus recursos ha sido planteada por [39], sin embargo, en el caso del pulpo esto no es una norma común. No obstante, no se debe descartar el efecto que el mercado tiene en la demanda de organismos sub-legales o con tallas por debajo de lo establecido en la literatura, dado que hay compradores dispuestos a consumir y comercializar organismos pequeños, igualmente al existir un mercado alternativo diferente al usual, los pescadores tienen mayores incentivos para pescar con la posibilidad de ganar un poco más con estos compradores (pacotilleros) que generalmente compran pulpo pequeño y que no son supervisados o penalizados por su actividad.

En la costa de Cuajiniquil, la pesca de pulpo es una alternativa para diversificar la producción de los pescadores artesanales, ocupando un lugar importante junto a otros recursos convencionales, por lo que es necesario regular su aprovechamiento para lograr una producción sostenida. Se sugiere adoptar algunas medidas de conservación y manejo del recurso, preferiblemente de manera voluntaria entre los pescadores, tales como limitar el esfuerzo pesquero (número de pescadores, permisos), establecer tallas mínimas de captura, cuotas de captura por pescador, proponer una época de veda, con la finalidad de proteger dentro de límites razonables tanto a las hembras maduras, como las que se encuentran incubando.

Conclusiones

La pesquería artesanal de pulpo en Cuajiniquil de Guanacaste, es una de las actividades principales para la activación de la economía local, sin embargo, ésta se realiza sin un manejo apropiado y la única medida de control consiste en el otorgamiento de la licencia de pesca, y se desconocen aspectos claves para una pesquería sostenible como son: el stock pesquero, tallas de captura, zonificación y el establecimiento de áreas marinas protegidas. Sumado a lo anterior, el arte de pesca utilizado para la captura de pulpo impide una selección de organismos, lo cual fue corroborado en la presente investigación en donde entre el 40 y 50% de los individuos muestreados no cumplían con el peso (g) o con la LDM (cm) recomendada en la literatura por otros autores para su extracción.

De acuerdo a los meses muestreados en el presente trabajo, noviembre es un mes con alta presencia de organismos juveniles por lo tanto septiembre y octubre podrían ser meses donde exista alta actividad de cuidado parental de huevos. A pesar, de que en el presente trabajo no se muestreó todo el año, con los datos obtenidos se podría recomendar no extraer organismos de *Octopus* sp. durante meses de la época lluviosa como setiembre, octubre y noviembre. Se hace necesario, realizar más muestreos ya que la literatura indica que para el pulpo común podría existir más de un pico reproductivo al año.

Referencias

- [1] Organización Mundial para la Alimentación y la Agricultura, *La ordenación pesquera: Las áreas marinas protegidas y la pesca*, FAO, Roma, Italia, 2012.
- [2] M. Mereu, B. Agus, P. Addis, S. Cabiddu, A. Cau, M. Follesa, and D. Cuccu, "Movement estimation of *Octopus vulgaris* Cuvier, 1797 from mark recapture experiment", *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, vol. 470, pp. 64-69, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2015.05.007>
- [3] M. Acosta-Jolré, R. Sahade, R. Jurgen, and M. Chiappero, "A contribution to the understanding of phylogenetic relationships among species of the genus *Octopus* (Octopodidae: Cephalopoda)", *Scientia Marina*, vol. 76, pp. 311-318, 2012. <https://doi.org/10.3989/scimar.03365.03B>
- [4] B. Seibel, "Cephalopod susceptibility to asphyxiation via ocean incalcescence, deoxygenation and acidification", *Physiology*, vol. 31, pp. 418-429, 2016. <https://doi.org/10.1152/physiol.00061.2015>
- [5] E. Grist, and G. Jackson, "Energy balance as a determinant two-phase growth in cephalopods", *Marine and Freshwater Research*, vol. 55, pp. 395-402, 2004. <https://doi.org/10.1071/MF03154>

- [6] D. De Luca, G. Catanese, G. Procaccini, and G. Fiorito, “*Octopus vulgaris* (Cuvier, 1797) in the Mediterranean Sea: Genetic Diversity and Population Structure”, *PloS one*, vol. 11, pp. 0149496, 2016. <https://doi.org/10.1371/journal.pone>.
- [7] G. Polese, C. Bertapelle, and A. Di Cosmo, “Role of olfaction in *Octopus vulgaris* reproduction”, *General and Comparative Endocrinology*, vol. 210, pp. 55–62, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2014.10.006>
- [8] T. Repolho *et al.* “Developmental and physiological challenges of octopus (*Octopus vulgaris*) early life stages under ocean warming”, *Journal of Comparative Physiology*, vol. 184, pp. 55–64, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00360-013-0783-y>
- [9] Mar Viva, Instituto Costarricense de Pesca y Acuicultura, y Ministerio de Comercio e Industria de Costa Rica, *Guía de identificación de filetes de pescado y mariscos*, San José, Costa Rica, 2012.
- [10] L. Rocha, “Estructura de tallas, talla de primera madurez y fecundidad de *Octopus hubbsorum* (Mollusca: Cephalopoda) de la costa de Oaxaca, México”, tesis de Licenciatura, Universidad de Mar, Oaxaca, México, 2013.
- [11] W. Ricker, “Computation and interpretation of biological statistics of fish population”, *B. Fish. Res. Board. Can.*, vol. 191, pp.1-382, 1975.
- [12] H. Andrade, “Age determination in the snapper *Lutjanus guttatus* (Pisces, Lutjanidae) and investigation of fishery management strategies in the Pacific Coast of Guatemala”, M.S. Thesis, Universidad de Tromsø, Noruega, 2003.
- [13] P. Sparre, and C. Venema, *Introducción a la evaluación de recursos pesqueros tropicales*. FAO, Roma, Italia, 1995.
- [14] J. Gulland, *Manual de métodos para la evaluación de las poblaciones de peces*. FAO, Zaragoza, España, 1971.
- [15] J. Di-Rienzo, F. Casanoves, M. Balzarini, L. González, M. Tablada, and Y. Robledo, “Programa estadístico *InfoStat*”, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 2018.
- [16] S. Lourenço, A. Moreno, L. Narciso, A. González, and J. Pereira, “Seasonal trends of the reproductive cycle of *Octopus vulgaris* in two environmentally distinct coastal areas”, *Fisheries Research*, vol. 127-128, pp. 116–124, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2012.04.006>
- [17] M. Mereu, B. Agus, P. Addis, S. Cabiddu, A. Cau, M. Follesa, and D. Cuccu, “Movement estimation of *Octopus vulgaris* Cuvier, 1797 from mark recapture experiment”, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, vol. 470, pp. 64–69, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2015.05.007>
- [18] V. Boletzky, “Recent studies on spawning, embryonic development and 71 hatching in the cephalopoda”, *Adv. Mar. Biol.*, vol. 25, pp. 85-115, 1989.
- [19] K. Mangold, “*Octopus vulgaris*”, in: *Cephalopod life cycles*, Londres, Inglaterra: Academic Press, 1983, pp. 335-364.
- [20] T. Cortez, “Biología y Ecología del pulpo común *Octopus mimus* Gould, 1852 (Mollusca: Cephalopoda) en aguas litorales del norte de Chile”, Ph.D. dissertation, Universidad de Vigo, España, 1995.
- [21] L. González, F. Guevara, and L. Troccoli, “Biología y pesquería del pulpo *Octopus vulgaris* (Octopoda: Octopodidae) en las costas del estado Nueva Esparta, Venezuela”, *Revista de Biología Tropical*, vol. 63, pp. 427-442, 2015.
- [22] B. García-García, y F. Aguado-Giménez, “Influence of diet on growing and nutrient utilization in the common octopus (*Octopus vulgaris*)”, *Aquaculture*, vol. 211, pp. 171-182, 2002.
- [23] A. Rodríguez, I. Pozuelo, M. Prado, J. Gómez, A. Bruzon, “The gametogenic cycle of *Octopus vulgaris* (Mollusca: Cephalopoda) as observed on the Atlantic coast of Andalusia (south of Spain)”, *Marine Biology*, vol. 147, pp. 927-933, 2005.
- [24] A. Quetglas, F. Alemany, A. Carbonell, P. Merella, and P. Sánchez, “Biology and fishery of *Octopus vulgaris* Cuvier, 1797, caught by trawlers in Mallorca (Balearic Sea, Western Mediterranean)” *Fisheries Research*, vol. 36, pp. 237–249, 1998.
- [25] J. Domínguez-Contreras, “Reproducción del pulpo *Octopus hubbsorum* Berry, 1953 en Bahía Magdalena, B.C.S., México”, thesis M.S, Universidad de Baja California, 2011.
- [26] L. Ibarra, “Análisis de edad y crecimiento de *Octopus hubbsorum* (Berry, 1953) y *Octopus bimaculoides* (Pickford y McConnaeghey, 1949) con lecturas de anillos en los estiletes”, thesis M.S, Universidad Nacional Autónoma de Baja California, México, 2011.
- [27] J. Forsythe, and R. Hanlon, “Effect of temperature on laboratory growth, reproduction and life span of *Octopus bimaculoides*”, *Marine Biology*, vol. 98, pp 369–379, 1988. <https://doi.org/10.1007/BF00391113>

- [28] P. Boyle, and P. Rodhouse, “*Cephalopods: Ecology and Fisheries*”, Blackwell: Oxford, 2005.
- [29] M. Sá, G. Barbieri, and J. Verani, “Análise do comportamento de *Cyprinus carpio*, *Prochilodus cearensis* e *Colossoma macropomum* em experimento de policultivo, embasado nos factores de condição”, *Bol. Inst. Pesca.*, vol. 26, pp.181-187, 2000.
- [30] T. Treer, N. Sprem, H. Torcu-Koc, Y. Sun, and M. Piria, “Length-weight relationships of freshwater fishes of Croatia”, *Journal of Application Ichthyology*, vol. 24, pp. 626-628, 2008.
- [31] J. Abboola, and M. Anetekhai, “Length-weight relationships of some fresh and brackish water fishes in Badagry Creek, Nigeria”, *Journal of application Ichthyology*, vol. 24, pp. 623-625, 2008.
- [32] J. Díaz-Uribe, D. Audelo-Ramos, y G. González-Medina, “Informe técnico final del proyecto: Caracterización de la pesca ribereña de la costa oaxaqueña: Río Copalita - Pinotepa Nacional”, Universidad del Mar: Pto. Angel, Oaxaca, México, 1999.
- [33] J. Gonçalves, “*Octopus vulgaris* Cuvier, 1797 (pulpo común): Sinopse da biología e exploração”, Ph.D. dissertation, , Universidad dos Açores, Horta, Portugal, 1991.
- [34] E. López-Uriarte, “Ciclo vital y pesca del pulpo *Octopus hubbsorum* Berry 1953 (Cephalopoda: Octopodidae) en la costa de Jalisco, México”, Ph.D. dissertation, Universidad de Guadalajara, Jalisco, México, 2006.
- [35] Instituto Costarricense de Pesca y Acuicultura, “*Sistema Integrado de Servicios Pesqueros y Acuícolas*”, consulta al SISPA, Puntarenas, Costa Rica, 2019.
- [36] S. Salas, M. Cabrera, L. Palomo, and E. Torres, “Uso de indicadores para evaluar medidas de regulación en la pesquería de pulpo en Yucatán, dada la interacción de flotas”, *Proceedings of the Gulf and Caribbean Fisheries Institute*, vol. 61, pp. 111-121, 2008.
- [37] M. Jiménez-Badillo, R. Río-Rodríguez, M. Gómez-Solano, A. Cu-Escamilla, y D. Méndez-Aguilar, “*Madurez gonádica del pulpo Octopus vulgaris en el Golfo de México: análisis macroscópico y microscópico*”, Universidad Autónoma de Campeche: México, 2008.
- [38] A. Sánchez, “Estudio Biológico – Pesquero de *Octopus* sp. En el complejo Lagunar Bahía Magdalena – Almejas, B.C.S. México”, Tesis para obtener título en Biología Marina, Universidad Autónoma de Baja California Sur, México, 2013.
- [39] C. Pedroza, and S. Salas, “Responses of the fishing sector to transitional constraints: From reactive to proactive change, Yucatan fisheries in Mexico”, *Marine Policy*, vol. 35, pp. 39-49, 2010.

Análisis de ciclo de vida de lechuga (*Lactuca sativa*) cultivada bajo un sistema orgánico y convencional, como insumo para toma de decisiones en dos fincas agrícolas costarricenses

Life cycle analysis of lettuce (*Lactuca sativa*) cultivated under an organic and conventional management system, as input for decision-making in two Costa Rican agricultural farms

Jonathan Rodrigo Castro-Granados¹, Laura Brenes-Peralta²,
María Fernanda Jiménez-Morales³, Roel Campos-Rodríguez⁴

Fecha de recepción: 11 de abril de 2020

Fecha de aprobación: 23 de agosto de 2020

Castro-Granados, J.R; Brenes-Peralta, L; Jiménez-Morales, M.F; Campos-Rodríguez, R. Análisis de ciclo de vida de lechuga (*Lactuca sativa*) cultivada bajo un sistema orgánico y convencional, como insumo para toma de decisiones en dos fincas agrícolas costarricenses. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-3 Julio-Setiembre 2021. Pág 108-119.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5108>

1 Ingeniero en Agronegocios. Investigador independiente. Costa Rica.

Correo electrónico: jonacg28@gmail.com

2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

Correo electrónico: labrenes@tec.ac.cr

3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

Correo electrónico: maria.jimenez@tec.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-9775-2545>

4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

Correo electrónico: rocampos@tec.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-3912-5092>



Palabras clave

Análisis de ciclo de vida; impacto ambiental; lechuga; agricultura orgánica; agricultura convencional.

Resumen

Por medio de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y un Costeo de Ciclo de Vida (CCV), se evaluó y comparó los impactos ambientales y económicos potenciales de un sistema de producción de lechuga orgánico y uno convencional. Se definió como unidad funcional el kilogramo de lechuga, para un proceso productivo con límites establecidos entre la adquisición de insumos (cuna) y el transporte a la comercialización (puerta). A partir de los hallazgos se aplicó un método de decisión multicriterio conocido como Proceso de Análisis Jerárquico para priorizar factores de interés y el sistema de preferencia en el contexto en estudio. Como principales resultados se detectó que el sistema convencional presentó los mayores impactos ambientales en comparación al sistema orgánico para los indicadores de potencial de calentamiento global en un 13%, eutrofización un 85%, gases acidificantes un 62% y deterioro de la capa de ozono un 96%. En cuanto al CCV los costos fueron mayores en el sistema orgánico para las etapas de preproducción en un 45%, producción un 13% y comercialización un 32% más. Mientras, en el acondicionamiento el costo fue mayor en un 9,1% para el sistema convencional. Se concluyó que las prácticas de manejo con potencial ambiental y económico deben orientarse a aspectos como el uso eficiente del transporte, utilización de bioinsumos, reciclaje, tratamiento de aguas residuales, manejo de residuos vegetales y participación en programas ambientales, y se deja recomendado que las prácticas de disminución se centren en las etapas donde se hallaron mayores impactos y costos.

Keywords

Life cycle analysis; environmental impact; lettuce; organic agriculture; conventional agriculture.

Abstract

The potential environmental and economic risks of an organic and a conventional lettuce production system were evaluated and compared through a Life Cycle Analysis (LCA) and Life Cycle Cost (LCC). The kilogram of lettuce was defined as a functional unit, for a productive process with established limits between the acquisition of inputs (cradle) and transport to the commercialization (gate). Based on the findings, a multicriteria decision method known as Analytic Hierarchy Process was applied to prioritize factors of interest and the system of preference in the context under study. The main results are that the conventional system presented increased environmental impact in comparison with the organic system for indicators of global warming potential in 13%, eutrophication in 85%, acidifying gases in 62% and deterioration of the ozone layer risk in 96%. As for the LCC, the costs were higher in the organic system for the pre-production stages by 45%, production by 13% and commercialization by 32%. While in conditioning, the cost was 9,1% greater for the conventional system. It is concluded that management practices with environmental and economic potential should be oriented to

aspects such as efficient use of transport, use of bio-inputs, recycling, wastewater treatment, plant waste management and participation in environmental programs and it is recommended that practices decrease focus on the stages where the greatest impacts and costs were found.

Introducción

La agricultura envuelve una de las principales necesidades del ser humano: no obstante, la huella ambiental que genera la actividad de producción de alimentos ocasiona grandes impactos negativos al medio ambiente según el manejo de la producción y de los recursos naturales a disposición [2]. Por medio de la presente investigación se busca garantizar modalidades de consumo y producción sostenible sustentados en los Objetivos de Desarrollo Sostenible, específicamente en el objetivo número 12 relacionado a la producción y consumos responsables, tomando en consideración además de que Costa Rica se comprometió a cumplir estos [4].

La producción agrícola actual en Costa Rica, en su mayoría se desarrolla en el marco de la agricultura convencional, que si bien no es la alternativa que conlleve los mejores resultados ambientales, es la práctica por tradición y facilidad en su ejecución resultando más atractiva para los productores. En el caso de la agricultura convencional se estima que cerca de 80987 productores se dedican a esta forma de producción, mientras para el caso de la actividad orgánica, cerca de 3769 productores realizan esta labor [3].

La provincia de Cartago representa la zona de mayor área sembrada (516,3 ha) y cosechada (490,8 ha) de lechuga en el país [7]. Adicionalmente según datos del Programa Integral de Mercadeo Agropecuario PIMA, esta hortaliza se coloca como parte de las 10 de mayor consumo en los hogares costarricenses [15]. Partiendo de lo anterior radica la importancia de la elección del lugar y el cultivo seleccionado para este estudio.

Una herramienta que ha probado ser útil e integral en la comprensión y búsqueda de sistemas alimentarios más sostenibles, como lo propuesto por el ODS 12 es el Pensamiento de Ciclo de vida (ACV). La ISO 14040 define el ACV como un conjunto sistemático de procedimientos para compilar y examinar las entradas y salidas de materiales, energía y los impactos ambientales asociados, directamente al funcionamiento de un producto en todo su ciclo de vida [8]. Mientras tanto el Costeo de Ciclo de Vida (CCV) busca costear los diferentes eslabones participantes del ACV.

Materiales y Métodos

La siguiente investigación se basó en un ACV y CCV en un sistema de producción orgánico y convencional. Para el ACV se siguió lo indicado por la norma internacional de INTECO específicamente la ISO 14040:2006 (principios y marco de referencia) y 14044:2006 (requisitos y directrices), así como las reglas de categoría de producto, en este caso el CPC O12: vegetales, con el posterior tratamiento estadístico y análisis de la información, utilizando herramientas como SIMAPRO 8,5 con la base de datos de Ecoinvent v3 LCI database, infoSTAT, Excel, entre otros. En el caso del CCV se siguieron los lineamientos descritos por Hunkeler en su libro referente al costeo de ciclo de vida ambiental [5]. Así mismo, se fundamentó el proceso de toma de decisiones a partir de la aplicación de un Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) según lo descrito por Hurtado [6].

La figura 1 muestra la secuencia de operaciones y los límites que se definieron para el estudio en cuestión, los cuales se centraron desde la preproducción con la adquisición y elaboración de los insumos necesarios para la plantación hasta la entrada al proceso de comercialización.

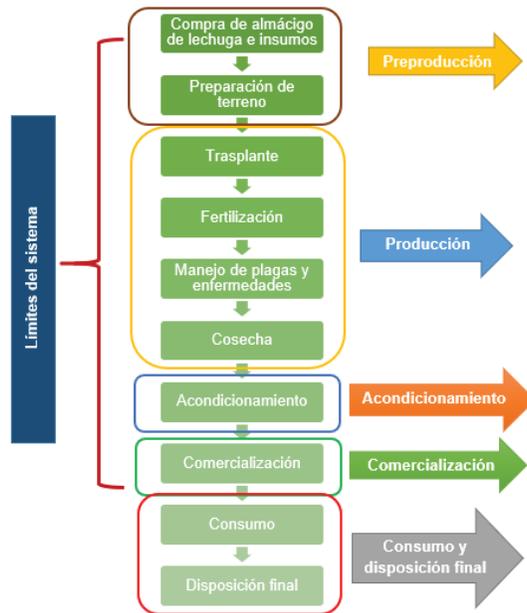


Figura 1. Diagrama de flujo y límites del sistema de lechuga en las fincas en estudio.

Al finalizar el ciclo de cultivo y al medir la masa de las lechugas con el objetivo de obtener la cantidad de masa en kilogramos (unidad declarada en RCP vegetales) se calcularon los impactos ambientales potenciales por unidad declarada, considerando para ellos las siguientes categorías de impacto ambiental para vegetales: potencial de calentamiento global en dióxido de carbono equivalentes (CO_2), emisión de gases acidificantes en dióxido de azufre (SO_2) equivalentes, deterioro de la capa de ozono en kg CFC-11 equivalentes, emisión de sustancias al agua que contribuyen al agotamiento del oxígeno en fosfato (PO_4^{3-}) equivalentes y el deterioro de recursos abióticos en MJ. En este caso, el análisis se realizó mediante el método Recipe Midpoint H.

Las diferentes entradas y salidas que se consideraron para los sistemas de producción en las distintas etapas se presentan en el cuadro 1.

Cuadro 1. Entradas y salidas para los sistemas de producción en las diferentes etapas productivas.

Etapa	Entradas	Salidas
Preproducción	Materias primas (insumos agropecuarios, agua) Energía (transporte)	Emisiones al aire y agua Residuos
Producción	Materias primas (insumos agrícolas, bandejas de lechuga, agua) Energía (transporte de maquinaria y vehículo)	Emisiones al aire, agua y suelo Residuos (envases contenedores)
Acondicionamiento	Materias primas (bolsas de empaque, detergentes, agua, lechugas)	Emisiones al aire y agua Residuos (lechuga, desinfectantes, agua)
Comercialización	Materias primas (lechuga) Energía (transporte)	Emisiones al aire (transportes)

Respecto al análisis del costo, se trabajó igualmente con los límites establecidos para el ACV, considerándose para cada uno de estos los principales rubros de costo, como mano de obra, agua, transportes e insumos, y expresados en función del costo entre la unidad funcional establecida (\$/kg y ¢/kg de lechuga).

Dentro del grupo de métodos de decisión multicriterio, se seleccionó y se empleó el proceso analítico jerárquico creado por Thomas L. Saaty el cual se basa en comparaciones pareadas para la toma de decisiones [12], para ello se definieron tres niveles de jerarquización el primero o la meta, respecto a las prácticas de manejo con mayor potencial ambiental y económico. El segundo nivel consistió en los criterios de interés obtenidos durante el estudio de ACV y CCV, dentro de los que se destacan la productividad, costos, ingresos, e impactos ambientales, como el caso del dióxido de carbono equivalentes (CO_2), emisión de gases acidificantes en dióxido de azufre (SO_2) equivalentes, deterioro de recursos abióticos, así como la emisión de sustancias al agua que contribuyen al agotamiento del oxígeno en fosfato (PO_4^{3-}) equivalentes. Finalmente se creó un tercer nivel donde se colocaron las alternativas a los criterios anteriores, siendo en este caso las alternativas, la producción orgánica y convencional.

Luego se procedió a seleccionar expertos relacionados con la cadena de valor de la lechuga, los cuales calificaron la preferencia entre la combinación de los diferentes criterios, empleándose para ello una escala de comparación pareada.

Una vez definidos y calificados los criterios se ponderaron entre sí, para conocer si los mismos influían de la misma forma en el interés de la alternativa o en porcentajes distintos. Seguidamente se construyó las matrices de comparación de las alternativas entre cada criterio, para lo cual se calculó el vector propio de cada matriz, indicándose la importancia de los diferentes criterios en referencia a las alternativas.

Finalmente se elaboró una matriz columna contemplando las anteriores la cual generó la ponderación o peso de las alternativas en función de todos los criterios y de su importancia. Siendo el vector columna final el que indicó el peso de cada alternativa y permitió elegir la mejor. Con base en lo anterior se realizó una selección de prácticas de manejo con potencial ambiental y económico, para que eventualmente esto de soporte a la toma de decisiones en las fincas, con aquellas que generarían los menores impactos negativos en función de los criterios de preferencia. Además, se realizó una prueba de consistencia para determinar la normalidad de los datos y la ponderación efectuada.

Resultados y discusión

Los diferentes impactos ambientales negativos encontrados para cada uno de los sistemas de producción en estudio se detallan a continuación:

Potencial de Calentamiento Global en CO_2 equivalentes

Se destaca un mayor impacto en el sistema convencional, con 0,18 kg de CO_2 equivalente, en comparación al sistema orgánico, con un 0,15 kg de CO_2 equivalente, siendo el principal impacto en estos sistemas la fase referente a la producción, tal como se puede observar en la figura 2.

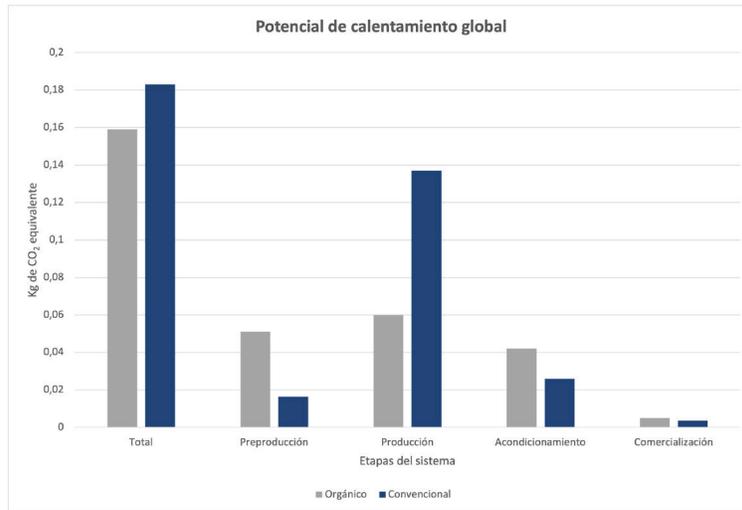


Figura 2. Potencial de calentamiento global para los sistemas de producción en estudio.

Los productos que más aportaron en la etapa de producción en la lechuga orgánica a este indicador ambiental son los residuos y los abonos nitrogenados. En el caso del sistema convencional los que más incidieron fueron los residuos y pesticidas, aportando en gran parte estos últimos al indicador, debido a un porcentaje más alto de concentración de nitrógeno en comparación a los abonos orgánicos.

Una evaluación de sostenibilidad para la obtención de cacao, mostró un comportamiento similar al presentado en este estudio, donde los fertilizantes y pesticidas fueron la mayor fuente del impacto ambiental negativo con aproximadamente un 90% de las emisiones [13].

Eutrofización en kg de PO₄³ equivalente

Al igual que en el anterior se destaca un mayor impacto en el sistema convencional en relación al orgánico, al presentarse un total de 0,14 kg de PO₄³ equivalente en el sistema convencional con respecto al orgánico con 0,02 kg de PO₄³ equivalente, destacándose principalmente la etapa de producción como el mayor generador de dicho impacto tal como se puede apreciar en la figura 3.

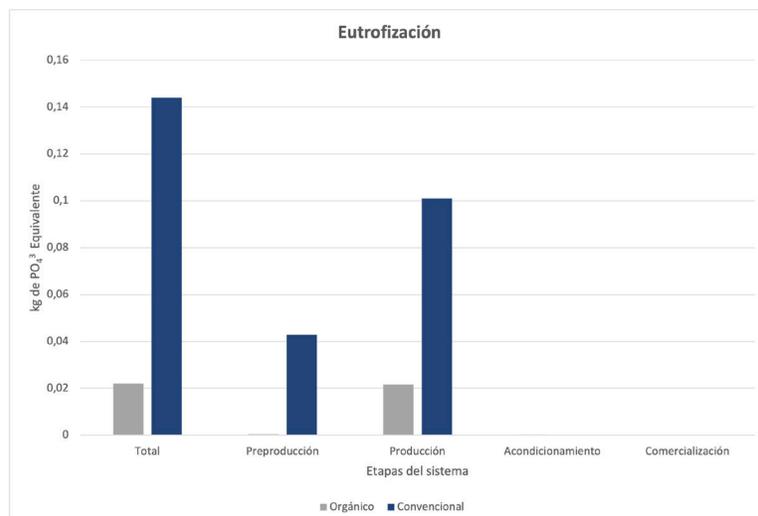


Figura 3. Eutrofización para los sistemas de producción en estudio.

Los productos orgánicos que más suman a este impacto son los microorganismos de montaña, Bio-tri y Serenade, mientras los convencionales a destacar son los residuos generados durante la etapa, así como los pesticidas como el Bayfolan y Orizal.

Autores como Lassaletta destacan que del nitrógeno aplicado en el campo solo es asimilado por los cultivos entre un 10 y 40%, siendo devuelto el resto a la atmósfera o exportado a los ecosistemas adyacentes generando un gran número de problemas ambientales como el caso del nitrógeno que llega a los cuerpos de agua y genera una alteración de los ecosistemas acuáticos (eutrofización), que no están adaptados a disponer de tales cantidades de un elemento que era limitante, desde este sentido la mayor cantidad de aporte del sistema convencional justamente se achaca a pesticidas con un porcentaje más alto de nitrógeno que los empleados en el sistema orgánico [9].

Gases acidificantes en dióxido de azufre (SO₂) equivalente

El sistema convencional mostró un mayor impacto en lo referente al potencial de acidificación expresado en dióxido de azufre (SO₂) equivalente, donde la producción convencional contribuyó con 0,0020 kg de SO₂, mientras la orgánica fue de 0,00078 kg de SO₂, destacándose la mayor contribución a este indicador a la etapa referente a preproducción para el sistema orgánico y la producción para el convencional, tal como se aprecia en la figura 4.

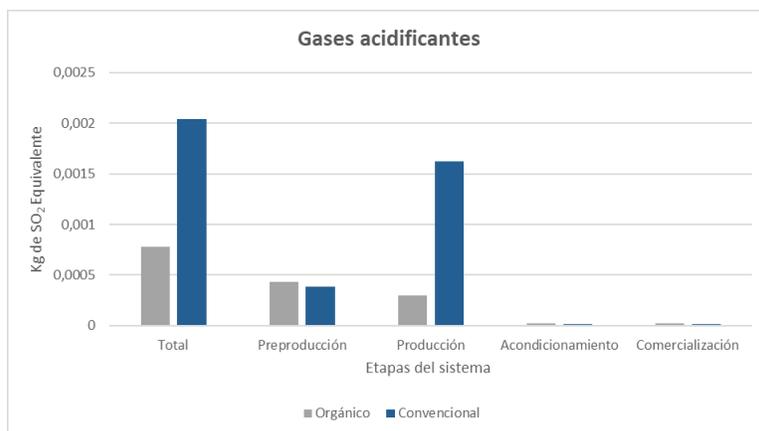


Figura 4. Gases acidificantes para los sistemas de producción en estudio.

En la etapa de preproducción, los productos orgánicos que más cooperaron a la producción de gases fueron el transporte para la compra de insumos agropecuarios, los residuos generados durante esta etapa y los fertilizantes fosfatados empleados en los almácigos, mientras en la etapa de producción para el sistema convencional son el Tricel, Magnesio y Bayfolan.

Según el Ministerio para la Transición Ecológica de España los contaminantes acidificantes más importantes a considerar son: el dióxido de azufre (SO₂), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el amoníaco (NH₃), los cuales poseen la característica de poder dispersarse y permanecer en el aire durante varios días y ser transportados a largas distancias, provocando efectos en zonas muy alejadas de su fuente de emisión, destacándose como principales emisores de estos contaminantes el transporte a partir de la generación de NO_x, tal como se reflejó este impacto como de los de mayor aporte en los sistemas productivos en estudio [11].

Deterioro de la capa de Ozono kg CFC-11 equivalente

En este se calculó la disminución de la capa de ozono debido a las emisiones antropogénicas de agotamiento, hallándose que el sistema convencional aportó un mayor impacto al presentar una cantidad de 0,0000000015 kg CFC-11 equivalente, mientras en el caso del sistema orgánico el deterioro de la capa de ozono fue de 0,0000000012 kg CFC-11 equivalente. Los principales contribuyentes, fueron la preproducción para el sistema orgánico mientras para el convencional la etapa de la producción, lo mismo se puede notar de mejor manera en la figura 5.

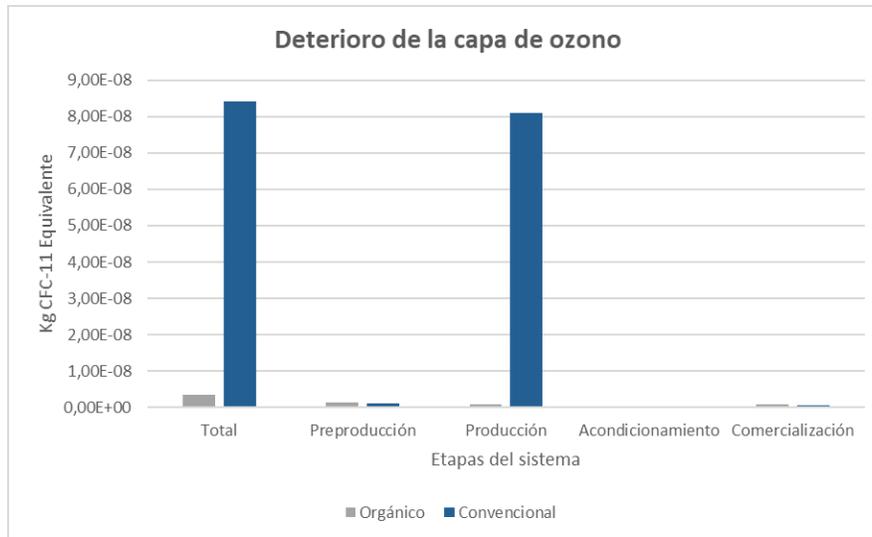


Figura 5. Deterioro de la capa de ozono para los sistemas de producción en estudio.

En la preproducción los impactos de mayor contribución a este indicador para el sistema orgánico fueron el transporte, urea y fertilizantes fosfatados. Para el sistema convencional el mayor aporte en la producción fue por parte de pesticidas.

Varios autores mencionan que los mayores aportadores al deterioro de la capa de ozono son los compuestos llamados halocarbonos y clorofluorocarbonos, los cuales son moléculas sintetizadas que al llegar a la estratósfera se pueden disociar por radiación ultravioleta liberando átomos de cloro que reaccionan con el ozono contribuyendo a la destrucción del mismo, en el caso del estudio mucho de los productos empleados en las etapas de preproducción y producción poseen compuestos de carbono, cloro y flúor que aportan a la generación de lo anteriormente descrito [1].

Agotamiento abiótico, de combustibles fósiles en MJ de combustibles fósiles

Se midió en este caso la disminución de la disponibilidad de recursos no biológicos (no renovables) como resultado de su uso insostenible, expresados en MJ de combustibles fósiles, siendo para el caso de la agricultura convencional un total de 1,36 MJ, mientras para el sistema orgánico el impacto total fue de 0,39 MJ. Relacionando el mayor impacto en el sistema orgánico a la preproducción y para el convencional la producción, tal como se observa en la figura 6.

Los productos que más impacto ocasionaron en la etapa de preproducción para el sistema orgánico fueron el transporte, la urea y fertilizantes fosfatados. En el caso de la etapa de producción para el sistema convencional los productos de mayor impacto fueron los pesticidas.

Autores como Marín y González describen que el proceso de extracción y utilización de los combustibles fósiles es más contaminante que el de las energías renovables, siendo relevantes las altas emisiones de CO₂ producidas en la combustión del carbón, así como los impactos de los vertidos de crudo, los cuales están directamente relacionados con el transporte de vehículos, de aquí del aporte mayoritario del transporte a este impacto en los sistemas en estudio[10].

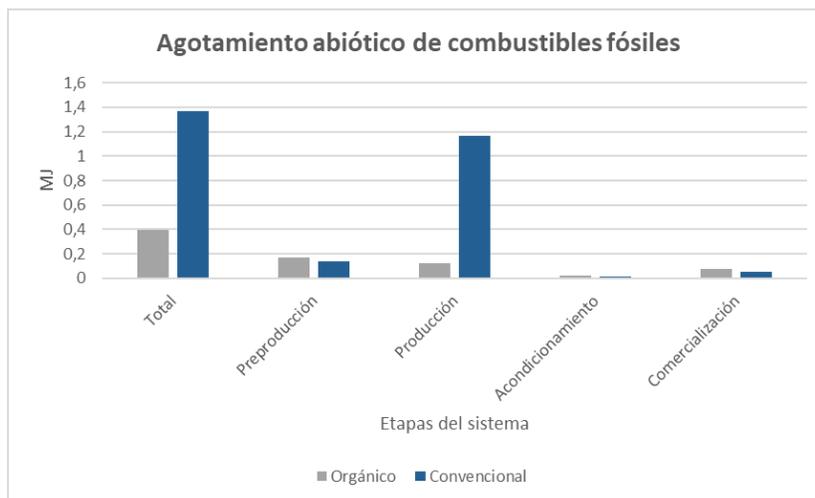


Figura 6. Agotamiento abiótico de combustibles fósiles para los sistemas de producción en estudio.

Costeo de Ciclo de Vida

El Costeo de Ciclo de Vida mostró que el sistema orgánico presenta mayoritariamente los costos más altos, durante las etapas de preproducción, producción y comercialización, debiéndose principalmente esto a una menor productividad, así como a un mayor uso de mano de obra para actividades tales como la elaboración de abonos, biofermentos y deshierbas. En el caso del acondicionamiento, el sistema convencional presentó el mayor costo, esto ante un mayor uso de mano de obra e insumos para el proceso de empaque que no se realiza en el sistema orgánico.

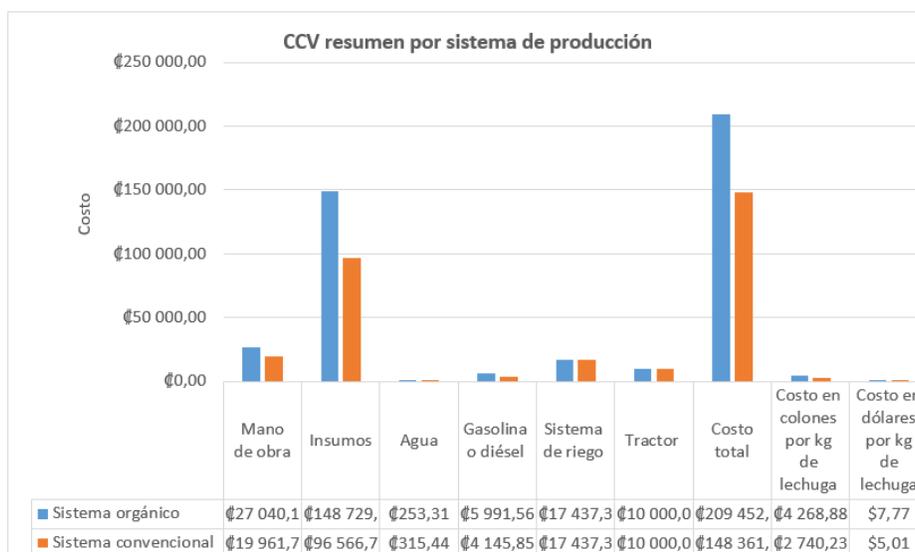


Figura 7. Resumen de costos para los sistemas de producción en estudio.

A partir de lo encontrado en la caracterización económica, según en una investigación referente a una comparación económica de un café orgánico y convencional, se encontró que el sistema de producción convencional obtuvo menores costos económicos ante la producción orgánica, además de mayores rendimientos en cuanto a productividad por hectárea [14].

Prácticas de manejo con potencial ambiental y económico

En cuanto al Proceso de Análisis Jerárquico los cálculos de la matriz normalizada y ponderación por cada criterio seleccionado se muestran en el cuadro 2.

Cuadro 2. Matriz normalizada y ponderación de los criterios seleccionados.

Criterios	Matriz normalizada							Ponderación
Productividad (kg)	0,07	0,11	0,18	0,09	0,04	0,03	0,03	0,08
Costo	0,10	0,16	0,26	0,09	0,14	0,15	0,23	0,16
Ingreso	0,07	0,11	0,18	0,39	0,21	0,15	0,19	0,19
Potencial de calentamiento Global (CO ₂)	0,14	0,33	0,09	0,19	0,21	0,18	0,33	0,21
Gases acidificantes (SO ₂)	0,17	0,11	0,09	0,09	0,10	0,15	0,05	0,11
Eutrofización	0,17	0,08	0,09	0,08	0,05	0,07	0,04	0,08
Deterioro de recursos abióticos	0,29	0,09	0,12	0,08	0,25	0,26	0,13	0,17

A partir de los datos resultantes de las evaluaciones se encontró que los criterios que obtuvieron mayor importancia respecto a los demás, se centran en el potencial de calentamiento global con una ponderación de 0,21, el ingreso con 0,19, así como el deterioro de recursos abióticos con 0,17, tal como se aprecia en el cuadro 2.

En lo que corresponde a la priorización de las alternativas, el sistema de producción orgánico fue el mejor evaluado (69%) sobre el convencional (31%), tal como se observa en el cuadro 3.

Cuadro 3. Matriz de priorización.

Criterio /alternativa	Productividad (kg)	Costo	Ingreso	Potencial de Calentamiento Global	Gases acidificantes	Eutrofización	Deterioro de recursos abióticos	Priorización
Sistema orgánico	0,19	0,32	0,86	0,83	0,78	0,83	0,78	0,69
Sistema convencional	0,81	0,68	0,14	0,17	0,22	0,17	0,22	0,31
Ponderación	0,08	0,16	0,19	0,21	0,11	0,08	0,17	

A partir de los hallazgos encontrados con la herramienta de análisis de procesos jerárquicos, se observa que las prácticas de manejo con potencial económico y ambiental deben estar dirigidas entorno a los ingresos, el deterioro de recursos abióticos, así como el potencial de calentamiento global, además de que el sistema de producción orgánico puede ser empleado

como base para la búsqueda de dichas alternativas de manejo con potencial económico y ambiental, lo anterior puede venir sustentado a que el desarrollo de una agricultura sostenible conlleva una innovación tecnológica más comprometida con el ambiente y la optimización de los agroecosistemas.

Las posibles prácticas de manejo con potencial ambiental y económico que se proponen se centran en la utilización de biofermentos y abonos en finca para la reducción del uso de fertilizantes sintéticos, el reciclaje para la disminución de productos en vertedero, mantenimiento de equipos y vehículos para el mejor rendimiento de los mismos, conservación de la cantidad y calidad del agua, tratamiento de aguas residuales, manejo de residuos vegetales por medio de compostaje y participación en programas ambientales.

Conclusiones

En cuanto a los impactos ambientales negativos el sistema convencional presentó niveles más altos en referencia al sistema orgánico, para los indicadores de potencial de calentamiento global, eutrofización, deterioro de la capa de ozono, agotamiento de recursos abióticos y gases acidificantes, aunándose lo anterior principalmente al uso de fertilizantes y abonos con porcentajes altos de elementos que aportan a dichos indicadores.

Las etapas para ambos sistemas de producción donde se presentan los mayores impactos son las referentes a la preproducción y producción, principalmente por el uso de fertilizantes con altos niveles de elementos como el nitrógeno de gran impacto ambiental.

A partir de la aplicación del análisis de procesos jerárquicos y la opinión de expertos se llega a la conclusión que las prácticas de manejo con potencial económico y ambiental se deben centrar en la disminución de los indicadores de potencial de calentamiento global y deterioro de recursos abióticos, buscando paralelamente aumentar los ingresos y tomando el sistema de producción orgánico como referencia para las posibles prácticas.

Recomendaciones

En el caso del uso de bases de datos se recomienda crear una nacional que integre aspectos tales como abonos, biofermentos e ingredientes o materias primas propias del país, para generar la mayor precisión de datos a la hora del estudio.

Centrar las prácticas de manejo con potencial ambiental y económico en las etapas que se encontraron los mayores impactos, en este caso la preproducción y producción, por medio de colaboración o capacitación de profesionales o instituciones inmersas en el proceso de disminución de impactos ambientales negativos, tal como el caso del INA, MAG, INDER u otro.

Se recomienda emplear una unidad funcional que se adapte a las condiciones de mercado o venta imperantes según el producto en cuestión, esto para que el estudio refleje lo más cercano a la realidad de los productores o comerciantes.

Referencias

- [1] BBC News Mundo . (23 de Mayo de 2019). Ozone layer: Banned CFCs traced to China say scientists. *BBC News Mundo* .
- [2] Contreras, E. (2014). *Aplicación del Análisis de ciclo de vida del producto (ACV) en la cadena productiva del cacao como estrategia de ventaja competitiva ambientalmente sostenible* . Obtenido de Universidad Piloto de Colombia : <http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00001232.pdf>

- [3] El Financiero . (22 de julio de 2016). ¿Cómo son los agricultores en cada provincia de Costa Rica? Obtenido de El financiero : https://www.elfinancierocr.com/gnfactory/ELF/GNF/2016/07/22/0001/agricultura-organiza-costa-rica-agricultores_19_998490142.html
- [4] Gobierno de la República de Costa Rica. (2017). *Objetivos de desarrollo sostenible*. Obtenido de Gobierno de la República de Costa Rica: <http://www.ods.cr/pacto-nacional>
- [5] Hunkeler , D., Lichtenvort, K., & Rebitzer, G. (2015). *Environmental life cycle costing* . New York: SETAC.
- [6] Hurtado, G. (2013). *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*. Obtenido de Proceso de análisis Jeárquico (AHP): http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Basic/toskano_hg/cap3.PDF
- [7] Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2014). *Censo Nacional Agropecuario*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Censos: <http://www.inec.go.cr/censos/censo-agropecuario-2014>
- [8] INTECO. (2007). *Análisis de ciclo de vida*: INTE/ISO 14040: 2007. Obtenido de INTECO.
- [9] Lassaletta, L., & Rovira, J. (2011). Influencia de la agricultura industrial en el cambio global. *El Ecologista*, 23-26.
- [10] Marín , J., & Gonzáles, E. (s.f.). El futuro de los combustibles fósiles. Obtenido de Universidad Nacional de Educación a Distancia: <https://canal.uned.es/uploads/materials/resources/pdf/4/1/1319025174814.pdf>
- [11] Ministerio Para la Transición Ecológica (MITECO). (2016). *Problemática ambiental y contaminantes*. Obtenido de MITECO: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/>
- [12] Moreno, J. M. (2002). Universidad de Zaragoza. . Obtenido de El Proceso Analítico Jerárquico (AHP), fundamentos, metodología y aplicaciones: <https://core.ac.uk/download/pdf/47280581.pdf>
- [13] Ortiz , O., Villamizar , R., & Rangel , J. (2014). *Applying life cycle management of colombian cocoa production*. Obtenido de Scielo : http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20612014000100009
- [14] Porras-Vanegas, C.; Soto, G.; De Melo, E.; Casanoves, .F; Tapia, A. Comparación de manejos orgánico y convencional de café dentro del Corredor Biológico Turrialba-Jimenez. VII Congreso SEAE Zaragoza 2006 No149. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/286451526_Comparacion_de_manejos_organico_y_convencional_de_cafe_dentro_del_Corredor_Biologico_Turrialba-Jimenez
- [15] Programa Integral de Mercadeo Agropecuario (PIMA) . (Noviembre de 2016). *Análisis del consumo de frutas, hortalizas, pescado y mariscos en los hogares costarricenses*. Obtenido de Programa Integral de Mercadeo Agropecuario (PIMA) : <https://mail.google.com/mail/u/0/#search/pima+analisisn/MfcgxmSfCnjdQRfsNQdgLjvjtQXRTDs?compose=CllgCJqVNfGJqXvqjRnjddtXpSPzmJclkXcVrLMfzChcJBnBzQqjBvsPrkHCQrbdftvtTBmjtlq&projector=1>

Characterization of sandy beaches of the Southern Caribbean of Costa Rica

Caracterización de las playas arenosas del Caribe Sur de Costa Rica

Lilliana Piedra-Castro¹, Maikol Castillo-Chinchilla²,
Vanessa Morales-Cerdas³

Fecha de recepción: 1 de junio de 2020

Fecha de aprobación: 6 de octubre de 2020

Piedra-Castro, L; Castillo-Chinchilla, M; Morales-Cerdas, V.
Characterization of sandy beaches of the southern caribbean of Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-3 Julio-Setiembre 2021. Pág 120-133.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5197>

- 1 Laboratorio de Recursos Naturales y Vida Silvestre, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: lilliana.piedra.castro@una.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-4878-1531>
- 2 Laboratorio de Recursos Naturales y Vida Silvestre, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: maikol.castillo.chinchilla@una.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-6823-0326>
- 3 Laboratorio de Recursos Naturales y Vida Silvestre, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: vanessa.morales.cerdas@una.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-4832-025X>



Keywords

Coast; vegetation; erosion; morphology; environmental management.

Abstract

Coastal zones are highly dynamic environments that provide a range of ecosystem services. They are influenced by natural and anthropogenic factors, leading to increasingly drastic changes which have negative impacts on biological diversity and human communities. The present study characterizes the beaches of the Southern Caribbean of Costa Rica (SC-CR) to provide a baseline for marine-coastal management. Eight beaches of the SC-CR were studied, and 47 transects were defined in which the following information was obtained: beach width, scarp width and height, average particle size in dunes, plant species, and vegetation cover and height. Puerto Viejo and Vizcaya were determined to have the greatest average width, while Manzanillo and Gandoca had the smallest. In 25.24% of the sampled points there were signs of erosion. The width of the scarp varied from 3.90 m to 43.70 m and the height between 15 cm and 70 cm. The sand particles in 87.5% of the beaches were medium-sized. A total of 283 trees or shrubs from 11 families and 11 species were counted. In conclusion, the characterization of the SC-CR beaches allowed generating baseline information on the state of the physical and biological aspects of these ecosystems, as well as showing that these beaches are exposed to change. However, it is necessary to establish whether these are related to the dynamics of the beaches themselves or due to the interactions of elements such as sea level rise, thermal expansion and changes in current patterns due to climate change or global change.

Palabras clave

Costa; vegetación; erosión; morfología; gestión ambiental.

Resumen

Las zonas costeras son ambientes dinámicos que brindan múltiples servicios ecosistémicos. La influencia de factores naturales y antrópicos conducen cambios cada vez más drásticos, que generan impactos negativos en la diversidad biológica y las comunidades humanas. El objetivo de este estudio fue caracterizar las playas del Caribe Sur (CS) de Costa Rica como línea base para la gestión marino-costera. Se trabajó en ocho playas del CS, se realizaron 47 transectos, en estos se obtuvo: ancho de la playa, ancho y alto del escarpe, tamaño medio de la partícula en la duna, especies y cobertura vegetal y altura de la vegetación. Puerto Viejo y Vizcaya presentaron el mayor ancho promedio y Manzanillo y Gandoca el menor; 25, 24% de los sitios mostraron indicios de erosión. El ancho del escarpe varió de 3,90 m hasta 43,70 m y el alto entre 15 cm y 70 cm. En 87.5% de las playas la arena de las dunas fue mediana y el restante fina. Se contabilizaron un total de 283 árboles o arbustos de 11 familias y 11 especies. La caracterización de las playas del CS permitió generar información base sobre el estado de aspectos físicos y biológicos de estos ecosistemas, así como evidenciar que estas playas están expuestas a procesos erosivos. Es necesario establecer si estos se relacionan con la dinámica propia de las playas o a la sinergia de elementos como el aumento del nivel del mar, la expansión térmica y cambios en los patrones de corrientes producto del cambio climático o cambio global.

Introduction

Coasts are classified in various ways, such as rocky and sandy. On rocky coasts, changes are slow, while on sandy coasts or beaches changes are constant, which is why they are classified as highly dynamic and complex ecosystems. They are affected by factors such as the quantity and intensity of waves, the type and size of sediment and the amplitude of tides, which give rise to a variety of beaches with different physical and topographic characteristics [1]. Additionally, human activities that take place on these beaches also determine part of their dynamics. The erosion processes are related to the development of physical infrastructure, and the processes of deposition and erosion of sand on the beach are determined by these factors [2].

In Costa Rica, the Caribbean coast is relatively short (212 km long) and straight. The southern section contains sandy beaches, made up of terrigenous sediments and marine carbonates, interrupted by rocky headlands which consist mainly of fossil coral reefs [3]. Three marine ecological units occur in this region – Estrella, Cahuita and Sixaola. Estrella is a coastal plain with high-energy barrier beaches; Cahuita has rocky cliffs and high-energy pocket beaches; and Sixaola is a coastal plain with exposed black sand beaches [4].

Likewise, human uses of coastal areas of the Southern Caribbean of Costa Rica are diverse, including recreation, basic sanitation, and growing industrial and port activity. It is one of the main tourist destinations in the country, due to its landscapes and the natural beauty of its beaches and reefs [5].

In general, these beaches are ecologically relevant, since they are the sites of various processes such as filtration and purification of water, storage and transport of sediments, mineralization and recycling of nutrients. They are also nesting sites for turtles and birds, favor the decomposition of organic materials and pollutants, and allow functional links between terrestrial and marine-coastal environments [6, 7, 8].

On the other hand, these coastal areas favor the concentration of human populations, due to the facilities they provide for the development of activities including fishing, industry, tourism, and transportation. This has led to the beaches being exposed to a wide range of stressors generated by anthropogenic threats, both at a local and a global level, such as trampling, pollution, coastal development and rising sea levels [9].

Due to the effects of climate change, these beaches are experiencing rapid variations which increase their vulnerability to floods, tsunamis, storms and extreme tides. This generates important economic, social and ecological impacts [10]. Despite the services they offer and their increasing vulnerability, these Caribbean coastal areas have not been studied frequently, partly because marine coastal research in the country has historically been concentrated on the Pacific coast, which has led to information gaps. Therefore, the present study is intended to characterize the beaches of the southern Caribbean of Costa Rica as a baseline for marine coastal management.

Materials and methods

Study area

In terms of the country's administrative divisions, the Southern Caribbean of Costa Rica (SC-CR) is located in the cantons of Talamanca and Limón in the province of Limón. For the purposes of this investigation, it extends from the Central Canton of the province of Limón to the Sixaola river, on the border with the Republic of Panama. It is part of the La Amistad Caribe Conservation

Area (ACLAC) of the National System of Conservation Areas (SINAC), which is controlled by the Ministry of Environment and Energy (MINAE). Work was carried out on eight beaches, which are described below:

Vizcaya (09° 54' 08.5" N and 82° 58' 44.7" W): A black sandy beach with an approximate length of 7 km, lying between the mouth of the Banano river and the mouth of the Bananito river. It has no coral systems and is influenced by the Banano River. It is surrounded by an agricultural landscape, mainly of musaceae, and has a low population density. There is little infrastructure on this beach, which is limited to small houses. Vegetation cover is scarce and is dominated by herbaceous plants (Figure 1).

Negra (09° 50' 50.8" N and 82° 56' 10.4" W): A black sandy beach with an approximate length of 7 km, lying between the mouth of the Banano river and the Vizcaya estuary. It has no coral systems. It is surrounded by an agricultural landscape, mainly of musaceae, and has a low population density. There is little infrastructure on this beach, but it includes small houses and lodge-type hotels. In the southern part of the beach, the sparse vegetation cover is dominated by herbaceous plants, and in the north there are flooded forests with raffia palms (*Raphia taedigera*) (figure 1).

Estrella (9° 47' 48.8" N and 82° 53' 39.8" W): A gray sandy beach with an approximate length of 5 km, lying between the mouth of the Vizcaya estuary and the Estrella river. It does not have coral systems. It is surrounded by an agricultural landscape mainly of musaceae and has a low population density. There is little infrastructure on this beach, limited to small houses. Vegetation cover is scarce, and is dominated by herbaceous plants (figure 1).

Residential houses and informal buildings located scattered within the maritime-land zone (200 m inland measured from the tide line) dominate the three beaches. Cultivated or natural Coconut (*Cocos Nucifera*) is abundant on these beaches and is used by local inhabitants. These beaches are not included within any management category. Ecosystems include secondary forests, raffia palm swamps, lagoons and herbaceous swamps, rivers, and estuaries (figure 1).

Cahuita (9° 44' 41.8" N and 82° 51' 13.8" W): Primarily a white sand beach, but includes rocky sectors and the presence of small patches of reef. It has an approximate length of 5 km, and lies between the mouth of the Tuba river and the entrance to the Cahuita National Park. It is an important tourist attraction, located in a moderately populated area with houses, hotels, restaurants, and is not included in any management category. Coconut and Beach almond (*Terminalia catappa*) dominate the coastal vegetation (figure 1).

Puerto Vargas (9° 42' 46.4" N and 82° 48' 45.2" W): A white sand beach with shell fragments, located within the Cahuita National Park. It has an approximate length of 7.5 km between Puerto Vargas and the Carbón river, and contains the most important coral reef patches and sea grasses in the Caribbean. On land, there are wetlands such as lagoons, mangroves and flooded forests. It is an important tourist attraction, but due to its management category, it can only be visited during the daytime. Infrastructure is scarce, but in the 1970s, a small port was established which is currently abandoned (figure 1).

Puerto Viejo (09° 39' 18.1" N and 82° 45' 23.4" W): It is a black sandy beach, with patches of reef and sea grass, which has a length of approximately 5 km from the mouth of the Carbón river to the entrance to the town of Puerto Viejo. It is an important tourist attraction, in a more populated area with houses, hotels, and restaurants. It is not included in any management category. The mainland has raffia palm swamps and flooded forests, lagoons, rivers, and estuaries (figure 1).

Manzanillo (9° 38' 07.2" N and 82° 39' 12.3" W): A grayish sandy beach with patches of reef and marine phanerogams. On the mainland there are areas of forest and coastal wetland, mainly raffia palm swamps. It has a length of approximately 5 km between Punta Uva and Punta Manzanillo, and is an important tourist attraction within the Gandoca-Manzanillo National Wildlife Refuge, with infrastructure that includes houses and small hotels (figure 1).

Gandoca (9° 34' 38.8" N and 82° 34' 30.9" W): A black sandy beach located in the sparsely populated locality of the same name, with a length of 12 km between Punta Mona and the Sixaola river. There are some reefs at Punta Mona, but they are infrequent. On the mainland, forests, flooded forests, raffia palm swamps, lagoons and mangroves dominate. It is a nesting area for sea turtles, and is located within the Gandoca-Manzanillo National Wildlife Refuge (figure 1).

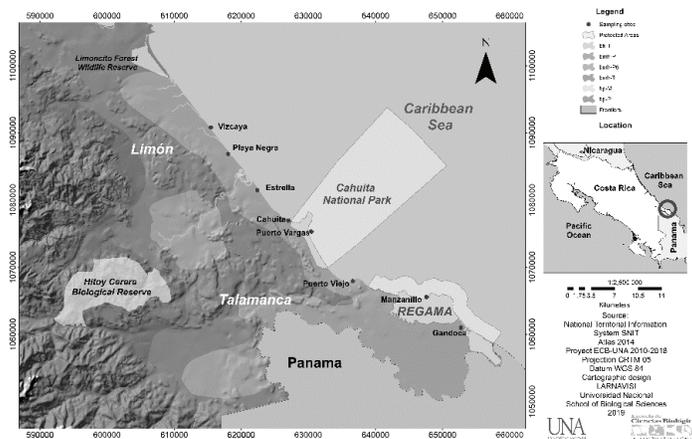


Figure 1. Study sites.

The SC-CR region is characterized as belonging to the Tropical Humid Forest (bh-T) life zone. It has two rainy seasons, the first from November to March and the second from June to August with rainfall of 4500 mm/year and high relative humidity; there is less rainfall at other times of the year, but there are no truly dry months. The tides are mixed; they are mainly diurnal and range from 30 to 50 cm. Waves come from the northeast between January and June and from the east between July and December, depending on the position of the Inter-Tropical Convergence Zone. Currents flow from northwest to southeast with small cyclonic eddies that transport terrestrial sediments from deforested riverine and coastal areas [11]

Methods

Definition of transects and sampling points

Transects 100 m long were systematically defined from the beginning to the end of each beach in a north-south direction, separated from each other by a distance of approximately 1 km. The number of transects on each beach (between 5 and 6) depended on the length of the beach. Transects were located parallel to the coast, in the first vegetation line located immediately after the dunes. Each transect contained 11 sampling points, separated from each other by a distance of 10 m (figure 2). Latitude and Longitude were recorded with a GPS receiver in geographic coordinates (WGS84, CRTM05).

Characterization of beaches

Measurements of beach width were made at all sampling points, and width and height were measured at points where erosive scarps existed. The variables recorded were the following: 1) Beach width: Distance from the line of vegetation after the dunes to the tide line (recorded in m). 2) Scarp width: Width of the vertical step formed on the beach due to coastal erosion. Measured at the point of origin, from the dunes towards the tide line (recorded in m). 3) Scarp height: Height of the vertical step formed on the beach due to coastal erosion (recorded in cm) (figure 2).

Granulometry of the dune sands

A sand sample was collected at a depth of 5 cm at each sampling point on the dunes. These samples were transferred to the Laboratory of Natural Resources and Wildlife of the Universidad Nacional, where they were dried for three days in an oven at 40 degrees Celsius. Once dried, the samples were sifted using overlapping sieves with the following mesh opening sizes: 1: 2000 μm , 2: 850 μm , 3: 425 μm , 4: 250 μm and 5: 220 μm .

Post-dune arboreal vegetation

At the sampling points where there was arboreal vegetation after the dunes, individual trees were counted, identified at the species level and their heights were measured. Likewise, at all points regardless of the presence or absence of arboreal vegetation, the percentage of cover was measured. The variables measured are described below:

1) Arboreal vegetation: Trees in the first line of vegetation, located immediately after the dune. Specialized flora guides were used for the identification [12, 13]. 2) Vegetation height: Height of the individuals of the tree species immediately after the dune (recorded in m); 3) Vegetation cover: Percentage of vegetation cover, measured immediately after the dune, at four cardinal points (North, South, East, West), using a Forestry Suppliers Model A spherical densitometer (figure 2).

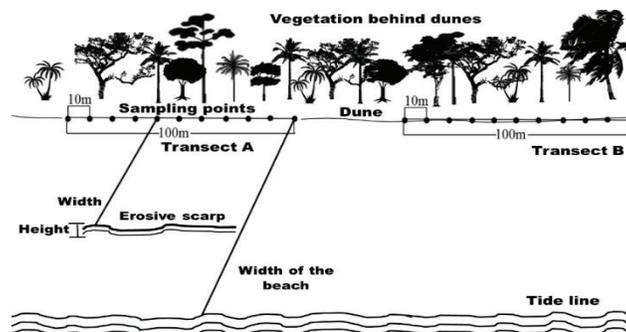


Figure 2. Diagram of transects location, measurement points and variables measured.

Data analysis

An analysis of variance (ANOVA) was performed to determine the difference in variance in beach width, and a Tukey HSD test was used to compare data from different beaches. A frequency analysis was applied to data on the species composition at different sites, and a chi-square test was used to observe relationships between the beaches and the composition of species

at each site. A non-parametric correlation test (Spearman's rho) was applied to determine the relationship between the width of beaches and the width and height of beach scarps. The software programs used were PSPP ©, R Commander ©, SPSS © and Excel © [14, 15, 16, 17].

The granulometric analysis of sand dunes was based on the average sample, which included all sampling points of every beach during the study period. The average particle diameter (M) was obtained in millimeters (mm) and Phi (Φ); standard deviation, degrees of freedom, skewness and kurtosis were obtained using the method of moments, and computed using Gradistat Version 8.0 software [18]. For sediment classification, the Wentworth scale was used [19, 20].

Results

During 2013, a total of 47 transects and 517 sampling points were established in the eight beaches.

Beach width

The site with the smallest beach width was Cahuita (4.8 m), while the one with the widest beach was Vizcaya (104.7 m). The beaches with the smallest average widths were Manzanillo and Gandoca, while Puerto Viejo and Vizcaya had the largest average widths. The Figures for Cahuita and Vizcaya showed high variances that could indicate intragroup variations. There are significant differences between the widths of the eight beaches studied (ANOVA, $p < 0.05$). These differences are found between three subgroups of beaches, which include Manzanillo and Gandoca, Estrella, Puerto Vargas, Cahuita and Negra, and lastly, Puerto Viejo and Vizcaya (Tukey HSD, $p < 0.05$) (figure 3).

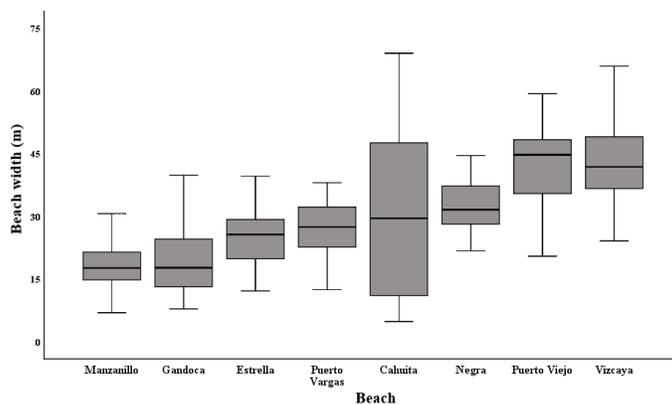


Figure 3. Box diagram of beach widths (m) on southern Caribbean beaches in Costa Rica, 2013. Lines in bold indicate medians, box diagrams indicate the 25th to 75th percentiles, and whiskers show minimum and maximum values.

Scarp width and Height

A total of 129 scarps were identified, representing 25.24% of the points sampled with signs of erosion. The widths of the scarps varied from 3.90 m to 43.70 m. Gandoca and Manzanillo had the smallest average scarp widths, followed by Estrella, Negra, Puerto Viejo and Puerto Vargas (Figure 4A). Finally, Vizcaya and Cahuita had the greatest average scarp widths (39 m and 34 m, respectively). There was a high positive correlation between beach width and scarp width (Spearman's rho = 0.705; $P < 0.05$).

The heights of scarps varied between 15 cm and 70 cm. Playa Negra had the lowest average value for this variable, while Gandoca had the highest (Figure 4B). A low negative correlation was evident between the width of the scarp and the height of the scarp (Spearman's rho = 0.14; P > 0.05).

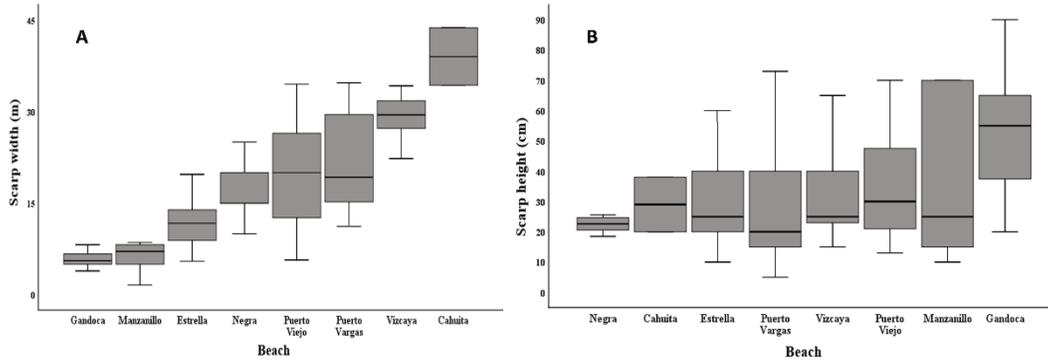


Figure 4. A) Box diagram of scarp widths (m), B) Box diagram of scarp height (cm). In southern Caribbean beaches in Costa Rica, 2013. Lines in bold indicate medians, box diagrams indicate the 25th to 75th percentiles, and whiskers show minimum and maximum values.

Dune sand granulometry

Eighty-seven point five per cent (87.5%) of the beaches had medium-sized dune sand and the other had fine dune sand. Gandoca and Cahuita had the highest mean particle diameter (M), 0.445 mm and 0.429 mm respectively, and Vizcaya had the smallest (0.270 mm). The only site that had fine sand was Cahuita, with an M of 0.159 mm (table 1).

In 50% of the beaches, the degree of selection was classified as moderately well selected, 25% well selected and 25% moderately well selected. All the beaches had negative skewness values: 50% of the beaches had very coarse skewness, 37.5% were symmetrical and 12.5% were coarse. Regarding kurtosis, 50% of the beaches were categorized as mesocurtic, 25% leptocurtic, 12.5% very leptocurtic, and 12.5% platycurtic (table 1).

Table 1. Granulometry of dune sand in southern Caribbean beaches in Costa Rica, 2013.

Beach	mm	Std. Dev.	Texture	Selection		Skewness		Kurtosis	
Gandoca	0.445	0.671	Medium	0.671	MWS	-0.232	S	2.585	Me
Manzanillo	0.429	0.769	Medium	0.769	MS	-0.387	S	2.306	Me
Cahuita	0.159	0.897	Fine	0.897	MS	-1.310	VT	2.965	Me
Puerto Viejo	0.333	0.634	Medium	0.634	MWS	-0.400	S	1.724	P
Vizcaya	0.270	0.379	Medium	0.379	WS	-2.053	VT	9.926	VL
Estrella	0.334	0.507	Medium	0.507	MWS	-0.789	G	2.833	Me
Negra	0.294	0.385	Medium	0.385	WS	-1.401	VT	6.290	L
Puerto Vargas	0.291	0.525	Medium	0.525	MWS	-1.837	VT	6.957	L

Where MWS: Moderately Well Selected; MS: moderately selected; WS: Well Selected; S: Symmetric; VT: Very Thick; G: Thick, Me: Mesocurtic, VL: Very Leptocurtic, P: Platycurtic; L: Leptocurtic.

Post-dune arboreal vegetation

No post-dune arboreal vegetation was found in 44.81% of the sampling sites, one tree species was found in 47.16% of the sites, and two species were found in 7.64% of the sites. A total of 283 trees or shrubs of 11 species and 11 families were recorded. The largest numbers of trees and species were found in Puerto Vargas, Manzanillo, Cahuita, Gandoca and Puerto Viejo, four of which are located within Protected Wild Areas, while Vizcaya, Estrella and Negra, which are not located within protected areas, had the least numbers of trees and species (table 2).

The species that presented the highest frequency of occurrence were: *Cocos nucifera* (Coconut), *Terminalia catappa* (Beach almond) and *Coccoloba uvifera* (Sea grape), while those that were less frequently observed were *Avicennia germinans* (Black mangrove, a threatened species), *Spondias mombin* (Hog plum), and *Ficus sp* (Table 2). Of the identified species 45.5% were native, 27.3% naturalized and 18.2% exotic. For example, the Coconut is naturalized; in some beaches it is cultivated and in others it grows naturally. The frequency analysis shows a significant relationship between the sites and the composition of plant species associated with each one (Chi-square = 126.95 p <0.05).

The highest average of trees per transect was found in Cahuita, Puerto Vargas and Gandoca, while Playa Estrella and Negra reported the lowest values. It should be emphasized that vegetation was evaluated in the coastal vegetation line.

Table 2. Absolute frequency of plant species recorded in dunes of southern Caribbean beaches in Costa Rica during 2013.

Species	Family	Common name	Condition	Beach								Total individuals
				Vizcaya	Negra	Estrella	Cahuita	Puerto Vargas	Puerto Viejo	Manzanillo	Gandoca	
<i>Terminalia catappa</i>	Combretaceae	Beach almond	Ntd	3	2	0	33	19	11	11	14	93
<i>Cocos nucifera</i>	Arecaceae	Coconut	Ntd	8	6	9	18	25	15	13	19	113
<i>Coccoloba uvifera</i>	Polygonaceae	Sea grape	N	3	1	0	7	3	11	2	7	34
<i>Hibiscus tiliaceus</i>	Malvaceae	Sea hibiscus	E	3	0	0	0	5	0	1	7	16
<i>Morinda citrifolia</i>	Rubiaceae	Noni	E	0	0	1	2	1	0	1	3	8
<i>Costus sp</i>	Costaceae	Sour cane	N	0	0	0	0	11	0	0	0	11
<i>Amphitecna latifolia</i>	Bignoniaceae	Black calabash	N	0	0	0	0	1	1	2	0	4
<i>Spondias mombin</i>	Anacardiaceae	Hog plum	N	0	0	0	0	0	1	0	0	1
<i>Avicennia germinans</i>	Acanthaceae	Black mangrove	N	0	0	0	1	0	0	0	0	1
<i>Musa sp</i>	Musaceae	Banana	Ntd	0	0	0	0	0	1	0	0	1
<i>Ficus sp</i>	Moraceae	Fig	-	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Total individuals				17	9	10	61	65	40	30	51	283
Total species				4	4	2	5	7	6	6	6	
Average number of trees per transect				2.8	1.5	1.7	12.2	10.8	6.7	5.0	8.5	

Where E: Exotic, N: Native, Ntd: Naturalized

Vegetation coverage

Vegetation coverage in Gandoca, Puerto Vargas and Cahuita was greater than 80%. The first two beaches are located within Protected Wild Areas, under two different management categories, Gandoca within a mixed-type Wildlife Refuge and Puerto Vargas within a National Park. In Playa Negra and Estrella, vegetation cover was less than 20%. In the case of Vizcaya, there was a great deal of variability in vegetation cover in the sampled sites (Figure 5). In Puerto Viejo, vegetation cover was high and highly variable with different levels of coverage by sectors. In the transects located to the Northwest of the town, there is more forest, dominated by Beach almond, Sea Hibiscus, and tall Sea grapes, while in the transects nearer to the town, where tourist activity and infrastructure dominate, coverage is scarce, and medium-sized coconuts and areas without vegetation dominate.

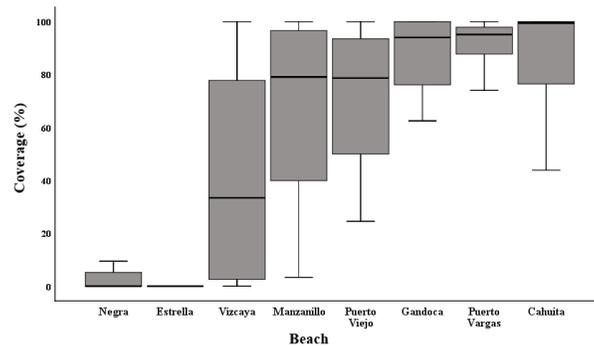


Figure 5. Box diagram of average vegetation cover (%) in southern Caribbean beaches in Costa Rica, 2013. Lines in bold indicate medians, box diagrams indicate the 25th to 75th percentiles, and whiskers show minimum and maximum values.

Vegetation height

Vegetation heights ranging from 0.5 m to 27 m were recorded on the beaches, with an average of 8.40 m. The greatest heights were registered in the Manzanillo, Puerto Vargas, Cahuita and Vizcaya beaches; the first two are located in Protected Wild Areas, and the second two are in areas with low urban development. In some beaches, such as Puerto Vargas and Gandoca, the vegetation is of natural growth and is typical of the coastline, while in other areas such as Vizcaya and Puerto Viejo, which are tourist attractions or sites of coconut harvesting, there is cultivated vegetation as well as natural growth.

Vegetation height was lower in the Gandoca, Puerto Viejo, Estrella and Negra beaches (Figure 6). Vizcaya, Estrella and Negra had the least variability in vegetation height and the smallest number of species, influenced by the elimination of undergrowth or secondary growth carried out to facilitate entry to sites, and fruit harvesting of species of commercial interest such as Coconut and Beach almonds.

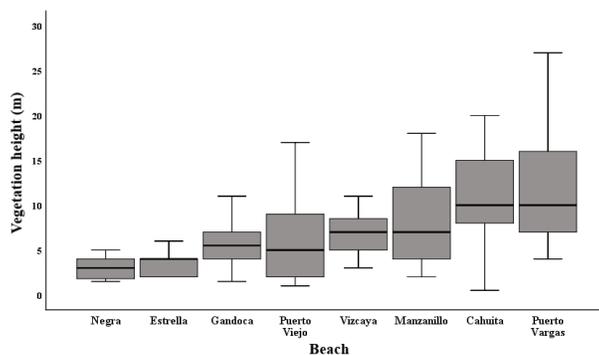


Figure 6. Box diagram of the height of vegetation on southern Caribbean beaches in Costa Rica, 2013. Lines in bold indicate medians, box diagrams indicate the 25th to 75th percentiles, and whiskers show minimum and maximum values.

Discussion and conclusions

Coasts are dynamic environments exposed to erosion processes, deposition and transport mechanisms. In the case of the southern Caribbean in Costa Rica, the width of sandy beaches does not remain constant, due to factors such as the time of year (dry and rainy season), waves, and wind. These factors cause a constant entry and exit of sediments. In periods of strong winds and waves, beaches decrease in size due to the loss of sand, while during the dry season, sand accumulates and the width of beaches grows [21].

However, the greater widths found in the beaches that are located in the northern part of the region being studied are also influenced by sediment deposited by rivers at their mouths. Benavente [22] has pointed out that while beaches are a sedimentary medium primarily controlled by marine dynamics, rivers have an influence on beaches as well. The continental contribution of materials to the coasts at river mouths can be important, especially in areas with rainfall throughout the year such as the southern Caribbean of Costa Rica, which can produce a constant contribution of sediments to beaches. It should be noted that the dates on which measurements were made for this study did not coincide with periods of extreme events.

The Vizcaya, San Andrés, Bananito, Estrella, Suarez, Perezoso, Tuba and Carbón rivers are found between Vizcaya beach and Puerto Viejo, all of which are characterized by being of second to fourth order [23]. The mouths of these rivers may be contributing significant amounts of sediment on the beaches being studied here. Likewise, these river mouths vary from one year to the next, which has an influence on the amount and places where sand deposition occurs.

In the cases of the beaches of Puerto Viejo, Salazar et al. [24] iron concentration was above 25% and the sand was dark and with a metallic shine, indicating the primarily terrestrial origin of the sediments. This was one of the beaches that presented one of the largest widths during the study period and it can be expected that the main source of sediments in Puerto Viejo and other beaches in the northern area of the region being studied is the mainland.

In the southern sector of the area of study, there are rivers of first or second order that are smaller in terms of length and flow than those to the north; this may contribute to the beaches in this area receiving less sediment input from the mainland and being narrower than the northern beaches. According to the analysis of coastal sediments reported by Salazar et al. [24], Manzanillo beach sand had a high concentration of calcium carbonate due to the presence of reefs in its surroundings.

In the case of Gandoca, the smaller width of the beach could be related to the fact that it is in a high energy area associated with a narrow continental shelf [25]; prevailing strong marine currents that move in a north-south direction, could lead, together with strong wave action, to the loss of sediment and narrower beaches.

The width of scarps was greater on wider beaches and less on narrower beaches, while the height of the scarp was slightly negatively correlated with beach width – the narrower the beach was, the higher the scarp. This is related to the fact that on narrower beaches waves enter the interior of the beach with greater energy, so that the constant action of the wave against the scarp undermines sediment and drags it away, increasing scarp height.

According to Vega de Seoane et al. [26], most coastal dunes are made up of fine to medium sands (with an average size 1.60 to 2.65 ϕ equivalent to 0.330 to 0.160 mm), values that coincide with what was reported in this study for southern Caribbean beaches in Costa Rica during 2013. Likewise, these authors state that the degree of sand selection in dunes ranged from moderately to very well selected, categories into which the beaches studied in this investigation were grouped.

This is because sand that is in direct contact with wave action has been deposited by different transport agents and/or with different energy, while the sand in dunes is carried by the wind. In this sense, wind and water have different densities that correlate with the grain selection of the load that can be transported, and sediments associated with water will therefore be less well selected than those in dunes. Negative skewness in the distribution of particle sizes is related to a preponderance of grains with a larger mean particle diameter (M) [27].

According to Benavente [22], kurtosis values are inversely proportional to the energy level of the waves or the energy level of the depositional environment. At higher wave energies, kurtosis values decrease, with a tendency to platykurtic distributions, while in periods of calm or low energy, a unidirectional flow is generated, creating leptokurtic distributions, which occurred in a lower percentage of the beaches studied. Meanwhile, mesokurtic distributions were found in the highest percentage of beaches, and Fuentes [28] points out that this distribution is interpreted as the absence of oscillations of average kinetic energy in the central region of the distribution, causing good classification in fine to medium sands.

In the beaches studied, the most frequent species of arboreal vegetation found were Coconut and Beach almond, which are both naturalized species that have managed to adapt and reproduce around the world. Their success is based on characteristics such as the ability to grow in sandy soils subject to flooding, extensive root systems that provide efficient anchorage to withstand strong winds, and physiological resistance that includes toleration of soil salinity and alkaline conditions [29].

Another of the species identified was *C. uvifera*, which is found in large groups of shrubs due to constant exposure to wind blowing in from the sea. *Hibiscus tiliaceus* is a common tree on the coasts, due to its tolerance to high levels of salt, and is commonly observed to grow in a prostrate and extended form on the beaches included in this investigation [30, 31].

These and other species that are part of the coastal vegetation stabilize sand and help maintain the coastline. Their roots and branches are a protection against the erosion produced by waves and winds, and provide protection, refuge and food for animals from invertebrates such as crabs to birds and mammals [21].

However, despite the protection provided by the coastal vegetation line, it is common to find trees with exposed roots on beaches in the study area, the product of the entrance of strong waves that produce erosion and undermine the substrate of individuals of species such as Coconut, Beach almond, Sea Hibiscus and Black Calabash. Likewise, areas without vegetation

are not exempt from erosion. Therefore, the erosion observed is not necessarily associated with vegetation cover but is more likely to be caused by the currents, sea level rise and thermal expansion, which are possible effects of global climate changes, according to the IPCC [32].

Vizcaya, Negra and Estrella were found to have lower levels of plant species diversity than other beaches. They are located closer to the major seaport of Limón and have been strongly affected by human activities, in addition to lying outside any Protected Wilderness Area. Sierra et al. [33], point out that the most important direct factors of deforestation and the loss of native vegetation on the southern Caribbean coast have been livestock and substitution of introduced or cultivated species such as Coconut.

In contrast, the beaches from Cahuita to Gandoca showed a greater number of plant individuals and species, which may be attributable to the presence of Protected Wild Areas which reduce human intervention, as well as to lower population density and the economic importance of ecological tourism in these areas.

In conclusion, the study of sandy beaches of the southern Caribbean region of Costa Rica generated baseline information on the state of physical and biological aspects of these ecosystems, and showed that these beaches are exposed to erosion. However, it is necessary to establish whether this erosion is related to the dynamics of the beaches themselves, or is due to the interaction of factors such as sea level rise, thermal expansion and changes in current patterns due to climate change.

Referencias

- [1] S. Lucrezi, M. Saayman and P. Van der Merwe, "An assessment tool for sandy beaches: A case study for integrating beach description, human dimension, and economic factors to identify priority management issues", *Ocean & Coastal Management*, vol. 121, pp. 1-22, 2016.
- [2] N. Rangel-Buitrago, G. Anfuso and A. Williams, "Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: Magnitudes, causes and management", *Ocean & Coastal Management*, vol. 114, pp. 129-144.
- [3] J. Cortés, "The Caribbean Coastal and marine ecosystems", in *Costa Rican Ecosystems*, M. Kappelle, Ed. Chicago and London, USA and UK: Chicago Press, 2016, pp. 591-616.
- [4] Sistema Nacional de Áreas de Conservación, "GRUAS II: Propuesta de Ordenamiento Territorial para la conservación de la biodiversidad de Costa Rica. Análisis de Vacíos en la Representatividad e Integridad de la biodiversidad marina y costera", Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET), Costa Rica, 2008.
- [5] C. Brenes-Rodríguez and R. Benavides-Morera, "Características termohalinas de las aguas costeras del Caribe sur de Costa Ric". *Rev. Mar. Cost.*, vol. 7, pp. 27-41, 2015.
- [6] F. Jonah, N. Agbo, W. Agbeti, D. Adjei-Boateng and M. Shimba, "The ecological effects of beach sand mining in Ghana using ghost crabs (*Ocypode* species) as biological indicator". *Ocean & Coastal Management*, vol. 112, pp. 18-24, 2015.
- [7] J. Calvo-Villalobos, L. Piedra-Castro and J. González-Villalobos, "Aves acuáticas en ecosistemas playeros del Parque Nacional Cahuita, Limón, Costa Rica". *Zeledonia*, vol. 19, pp. 11-25, 2015.
- [8] L. Piedra-Castro and V. Morales-Cerdas, "Preferencias en la anidación de tortugas carey (*Eretmochelys imbricata*) y baulas (*Dermochelys coriacea*) en el Refugio Nacional de Vida Silvestre Gandoca Manzanillo, Limón, Costa Rica". *Tecnología en Marcha*, vol. 28, pp. 86-98, 2015.
- [9] J. Barragán, and M. De Andrés, "Analysis and trends of the world's coastal cities and agglomerations". *Ocean & Coastal Management*, vol. 114, pp. 11-20, 2015.
- [10] A. Cashman and M. Nagdee, "Impacts of climate change on settlements and infrastructure in the coastal and marine environments of Caribbean small island developing states (SIDS)". *Sci Rev*, pp. 155-173, 2017.
- [11] L. Piedra, "Estrategia de manejo de recursos ecosistémicos marinos costeros del Caribe Sur de Costa Rica orientada a la adaptación a la variabilidad climática de las comunidades costeras" Ph.D. dissertation, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica, 2017.
- [12] L. Gonzales, *Flora de Costa Rica I. Guía Práctica*. San José, Costa Rica: UNED, 2011.

- [13] P. Sánchez, *Flórula arborescente del Parque Nacional Cahuita*. San José, Costa Rica: UNED, 2001.
- [14] Free Software Foundation, PSPP (Version 3) [Software], 2007.
- [15] J. Fox, and M. Bouchet-Vala, R Commander © (Version 2.3-0) [Software], 2016.
- [16] IBM. SPSS (Version 23) [Software], 2017.
- [17] Microsoft Office, Excel (Versión 2016) [Software], 2016.
- [18] S. Blott and K. Pye, "GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments". *Eth Surf. Processes and forms*, vol. 26, pp. 12-37, 2001.
- [19] Coastal Engineering Research Center, *Shore Protection Manual. Coastal material*, Washington: Department of the Army, pp. 4-12, 1984.
- [20] R. Guerra, M. Sosa and L. Rivas, "Evolución texturo-composicional de la arena de playas del Este de la Habana, Cuba". *Serie Oceanológica*, vol. 6, pp. 39-50, 2009.
- [21] P. Moreno-Casasola and A. Travieso-Bello, "Las playas y dunas, in *Entornos Veracruzanos: la costa de La Mancha*, P. Moreno-Casasola, Ed., Xalapa, México: Instituto de Ecología, 2006, pp 205-220.
- [22] E. Benavente, "Relaciones dinámicas asociadas al litoral-playa-dunas anteriores del campo de dunas de los Choros, región de Coquimbo" Bachelor's degree, Universidad de Chile, Chile, 2015.
- [23] E. Ortiz, "Atlas Digital de Costa Rica 2014". [CD-ROOM.]. Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2014.
- [24] A. Salazar, O. Lizano and E. Alfaro, "Composición de sedimentos en las zonas costeras de Costa Rica utilizando Fluorescencia de Rayos-X (FRX)", *Rev. Bio. Trop.*, vol 52 (2), pp. 61-75, 2004.
- [25] D. Chacón, "Anidación de la tortuga Dermochelys coriacea (Testudines: Dermochelyidae) en playa Gandoca, Costa Rica (1990 a 1997)". *Rev. Biol. Trop.*, vol 47(1-2), pp. 225-236, 1999.
- [26] C. Vega de Seoane, J. Gallego Fernández and C. Vidal Pascual, *Manual de restauración de dunas Costeras*, España: Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Costas. pp. 258, 2007.
- [27] R. Camacho, S. Salazar, L. González, H. Pacheco and C. Suárez, "Caracterización geomorfológica de las dunas longitudinales del Istmo de Médanos, estado Falcón, Venezuela". *Investigaciones geográficas*, vol 76, pp. 7-19, 2011.
- [28] M. Fuentes, "Algunas características sedimentológicas del puerto pesquero internacional de Güiría y sus alrededores, Estado Sucre, Venezuela". *Saber*, vol. 18 (2), pp. 197-206, 2006.
- [29] D. Granados-Sánchez and G. López-Ríos, "Manejo de la palma de coco (*Cocos nucifera* L.) en México". *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, vol. 8(1), pp. 39-48, 2002.
- [30] R. Madriz and N. Ramírez, "Biología reproductiva de *Coccoloba uvifera* (Polygonaceae) una especie polígamo-dioica". *Rev. Biol. Trop.*, Vol 44(3), pp. 106-115, 1996.
- [31] C. Elevitch and L. Thomson, "*Hibiscus tiliaceus* (Beach hibiscus). Species Profiles for Pacific Island". *Agroforestry*, vol 1.2, pp. 1-14, 2006.
- [32] Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, *Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resúmenes, preguntas frecuentes y recuadros multicapítulos*. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial, pp. 200, 2014.
- [33] R. Sierra, A. Cambronero and E. Vega, E., Patrones y factores de cambio de la cobertura forestal natural de Costa Rica, 1987-2013, Costa Rica: Fondo Cooperativo para el Carbono de los Bosques (FCPF), 2016.

Priorización de intervenciones en puentes utilizando indicadores

Indicators for Bridge Actions Prioritization

Giannina Ortiz-Quesada¹, César Garita-Rodríguez²,
Angel Navarro-Mora³, Gerardo Paez⁴

Fecha de recepción: 22 de abril de 2020

Fecha de aprobación: 17 de agosto de 2020

Ortiz-Quesada, G; Garita-Rodríguez, C; Navarro-Mora, A; Paez, G. Priorización de intervenciones en puentes utilizando indicadores. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-3 Julio-Setiembre 2021. Pág 134-142.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5120>

1 M.Sc. Ingeniera en Construcción. Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción. Escuela de Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: gortiz@tec.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-7639-1499>

2 PhD. Ingeniero en Computación. Centro de Investigaciones en Computación. Escuela de Ingeniería en Computación. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: cgarita@tec.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0003-4592-3266>

3 M.Sc. Ingeniero en Construcción. Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción. Escuela de Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: ahnavarro@tec.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-0539-7014>

4 M.Sc. Ingeniero Civil. Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción. Escuela de Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: bpaez@tec.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-3961-2157>



Palabras clave

Evaluación puentes; priorización de puentes; indicadores en puentes; gestión de puentes.

Resumen

El artículo presenta algunos de los resultados generales del Proyecto de Extensión: Priorización de Estructuras de Puentes Utilizando Indicadores de Desempeño: Plan Piloto Municipalidad de El Guarco, este proyecto se ejecutó entre enero 2018 a diciembre 2019, por parte del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Se muestra en el artículo la importancia de contar con herramientas para priorizar las intervenciones a realizar sobre un grupo de puentes y se describe la metodología utilizada para dicha priorización.

La metodología propuesta se basa en el uso de 3 indicadores estratégicos: BCI, VAM y USO, definidos como indicadores técnicos, complementando este cálculo con un indicador socioeconómico, para tener finalmente una lista de intervenciones priorizada de forma integral.

Keywords

Bridge evaluation; bridge prioritization; bridge indicators; bridge management.

Abstract

This article present some of the general results of the Extension Project: Prioritization of Bridge Structures Using Performance Indicators: Pilot Plan Municipality of El Guarco, this project was executed between January 2018 to December 2019, by the Instituto Tecnológico de Costa Rica. The importance of having tools to prioritize the interventions to be carried out on a group of bridges is shown in the article and the methodology used for such prioritization is described.

The proposed methodology is based on the use of 3 strategic indicators: BCI, VAM and USO, defined as technical indicators, complementing this calculation with a socioeconomic indicator, to finally have a list of interventions prioritized in a comprehensive way.

Introducción

La Red Vial de Costa Rica se compone de aproximadamente 47 905 Km, de los cuales el 82% corresponde a la Red Vial Cantonal. Esta última cuenta con un número importante de puentes, de los cuales no se conoce el número total, por ejemplo, en el Inventario de Puentes de Rutas Nacionales, realizado por el Instituto Tecnológico de Costa Rica, para el 2018 se contaba con 1670 puentes, sin embargo, estos números no incluyen los puentes de rutas cantonales [1].

Los principales datos que arrojan este inventario indican que de los puentes inventariados en rutas nacionales: el 37% de los puentes se encuentra en estado deficiente, el 60% en estado regular y solamente el 3% en estado satisfactorio [1]. Esta situación se espera no sea muy diferente en los puentes de las rutas cantonales, lamentablemente muy pocas municipalidades cuentan con datos actualizados de sus puentes.

Las municipalidades financian las inversiones en su infraestructura vial, principalmente, por medio de dos leyes: Ley 8114 – Ley de Simplificación y Eficiencia Tributaria y Ley Especial para Transferencia de Competencias: Atención Plena y Exclusiva de la Red Vial Cantonal, N.º 9329. Los recursos que recibe cada Municipalidad dependen de la extensión y características de su

red vial. Por otra parte, la Contraloría General de la República de Costa Rica ha expresado su preocupación debido a que los Índices de Gestión Municipal no han sido los adecuados, presentando algunas municipalidades sub-ejecución en dichas partidas presupuestarias.

Como en muchas instituciones, las municipalidades no tienen suficientes recursos para atender todas sus necesidades de una vez y, por lo tanto, se hace de vital importancia contar con herramientas que permitan una adecuada priorización de las intervenciones que se deban realizar en la infraestructura vial y, específicamente el tema de puentes, debido a que los costos de intervención son más elevados que otros componentes de la red vial.

Actualmente, el país cuenta con herramientas para la inspección y mantenimiento de puentes, como lo son: el Manual de Inspección de Puentes y los Lineamientos para el Mantenimiento de Puentes; ambos emitidos por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) y confeccionados con apoyo de la cooperación japonesa JICA. Estos documentos son una importante guía para la realización de los inventarios, evaluación visual de daños e inspecciones detalladas de puentes, pero, tienen un enfoque hacia una evaluación básicamente de la condición estructural, quedando fuera algunos otros elementos como el entorno, la seguridad vial y la importancia socioeconómica. Es por ello que en este artículo se resumirá la experiencia y los principales resultados de un proyecto de extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), realizado en la Municipalidad de El Guarco, durante los años 2018 y 2019, denominado "Priorización de estructuras de puentes utilizando indicadores de desempeño. Plan piloto Municipalidad de El Guarco".

Metodología de trabajo

El primer punto que se abordó fue la revisión del modelo de evaluación propuesto por el grupo de investigación eBridge, el cual consiste en realizar una evaluación con tres enfoques: i) Condición Estructural, ii) Variables Ambientales y iii) Uso. Estos enfoques se explican en las siguientes subsecciones.

Evaluación de condición estructural

Para evaluar la condición estructural, se tomó como base el Manual de Inspección de Puentes del MOPT [2], modificando en la evaluación de la superestructura el término de viga principal de acero y arriostre por elementos principales y secundarios, de igual forma se utilizó para las vigas de concreto, esto con el fin de ampliar el uso a otro tipo de estructuras. En la subestructura se modificó la tabla de evaluación de apoyos, de forma tal que se amplió la evaluación a otros tipos de apoyo. La escala de valoración utilizada es de 1 a 5, donde 1 es una condición satisfactoria y 5 una condición deficiente.

En resumen, la condición estructural se evaluó mediante tres componentes principales del puente: i) Accesorios, ii) Superestructura y iii) Subestructura. En la evaluación de los accesorios se incluyó el pavimento, barandas y juntas; para la superestructura se evaluó la losa, los elementos principales y secundarios de acero, así como los elementos principales y secundarios de concreto (de acuerdo al material de cada puente); mientras que, en la subestructura, se evaluaron los apoyos, bastiones y pilas.

Finalmente, para obtener una calificación de la condición estructural, se propuso un Índice de Condición Estructural que se denominó Índice de Condición Estructural (BCI, por sus siglas en inglés), este indicador muestra la condición general del puente considerando los daños principales en sus accesorios, superestructura y subestructura. Para su cálculo se ponderaron las calificaciones de los daños obtenidos en cada uno de los elementos evaluados (Ver cuadro 1).

La fórmula para el cálculo del BCI se muestra a continuación:

$$BCI = 5\% BCI_{Accesorios} + 45\% BCI_{Superestructura} + 50\% BCI_{Subestructura}$$

Donde $BCI_{Accesorios}$, $BCI_{Superestructura}$ y $BCI_{Subestructura}$ es la peor de las calificaciones obtenidas en los accesorios, superestructura y subestructura, respectivamente. Los porcentajes asignados a cada componente se obtuvieron en talleres con expertos aplicando la metodología Delphi.

Finalmente, el índice BCI será un valor de 1 a 5, el cual se mostrará acompañado de una escala de colores de acuerdo a su valor, tal y como se muestra en la figura 1.



Figura 1. Escala de valoración para los indicadores.

Evaluación de variables ambientales

La evaluación de las variables ambientales, debe entenderse como la evaluación del entorno en el cual se encuentra el puente, llega a convertirse en una valoración del posible riesgo al que se encuentra expuesta la estructura.

Para definir este indicador, adicional a la información tomada de acuerdo al Manual de Inspección de Puentes del MOPT, se generaron formularios de campo que permitieron evaluar el cauce del río (dimensiones, contaminación), las condiciones de los márgenes del río, el ángulo de ataque del agua a los bastiones, el uso del suelo en la zona cercana al puente, entre otros.

Estos datos se complementaron con información existente, por ejemplo, la definición de riesgos de acuerdo a la Comisión Nacional de Emergencias y Prevención (CNE), Plan GAM 13-30, Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes [7] y capas de información nacional existentes en el Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT).

Para el cálculo del Índice de Variables Ambientales, denominado VAM, se utilizaron 3 componentes o variables: i) Amenaza sísmica, ii) Riesgo hidrológico y iii) Fragilidad ambiental.

La selección de estas variables se realizó analizando las amenazas presentes en la zona, para ello durante las inspecciones se recopilaban datos que ayudarán con esta labor y se consultó la información disponible de la CNE. En el siguiente enlace puede observarse el mapa de amenazas para el cantón de El Guarco: https://www.cne.go.cr/reduccion_riesgo/mapas_amenzas/cartago.aspx. [4]

La fórmula para el cálculo del VAM se muestra a continuación:

$$VAM = 30\% \textit{ Amenaza sísmica} + 30\% \textit{ Riesgo hidrológico} \\ + 40\% \textit{ Índice de fragilidad ambiental integrado}$$

Donde, para determinar el nivel de **Amenaza Sísmica**, se tomaron datos existentes en otras fuentes de información, tales como el Código de Cimentaciones de Costa Rica, Lineamientos para el diseño sismorresistente de puentes [7] y mapas de la comisión Nacional de Emergencias. En el caso del **Riesgo hidrológico**, se utilizaron 4 elementos de decisión: riesgo de inundación, estrechamiento del cauce, altura libre inferior y ángulo de ataque. Para el cálculo del indicador de riesgo hidrológico se toma el más crítico. Finalmente, para el índice de fragilidad ambiental (IFA), se utiliza la definición dada por la Secretaría Técnica Nacional del Ambiente (SETENA) y los datos disponibles en el Plan GAM 13-30 [3] (ver cuadro 1).

El IFA utiliza 4 ejes de información básicos como base para su desarrollo. Para cada uno de esos ejes de información ambiental fundamental, se establece una categoría de IFA en función de los datos específicos y estandarizados por la SETENA. La combinación de los IFA específicos para cada uno de los ejes, posibilita el establecimiento del IFA integrado, y por tanto, de las limitantes técnicas, restricciones y condicionantes para el desarrollo de actividades, obras o proyectos. Los ejes de información ambiental fundamental a tomar en cuenta son: la geoaptitud del terreno, los aspectos biológicos (bioaptitud), los aspectos edafológicos (edafoaptitud) y los aspectos de uso del suelo antrópico (antroaptitud). [5]

Finalmente, el índice VAM será un valor de 1 a 5, el cual se mostrará acompañado de una escala de colores de acuerdo a su valor, tal y como se muestra en la figura 1.

Par el caso de municipalidades fuera de la GAM, que no cuenten con un valor de IFA, se puede utilizar alguna de la valoraciones que utilice la municipalidad en su planes reguladores.

Evaluación de uso

El análisis de la condición de uso nos permitirá valorar la funcionalidad y operatividad de un puente, además de su importancia dentro de un entorno socioeconómico.

La funcionalidad se refiere a la capacidad que tiene el puente para cumplir su función, en cuanto a su geometría, cargas y la operatividad se refiere a la posibilidad de la interrupción del servicio.

Para valorar estos aspectos se propone un indicador denominado USO. Los componentes se observan en la figura 4.

Este indicador se calculará de la siguiente forma:

$$USO = 60\% \textit{ Seguridad vial} + 40\% \textit{ Operatividad} - \textit{ Funcionalidad}$$

Donde el componente de **Seguridad Vial** se evalúa con base en la información recopilada en el campo y el formulario generado para tal fin. En el caso de la **Funcionalidad y Operatividad** se analizaron: la reducción de carriles, la existencia de ruta alterna y la restricción de carga (Ver cuadro 1).

De igual forma, el índice USO será un valor de 1 a 5, el cual se mostrará acompañado de una escala de colores de acuerdo a su valor, tal y como se muestra en la figura 2.

Adicionalmente, dadas las condiciones de los puentes municipales, en el uso de materiales o tipologías constructivas inadecuadas para un puente vehicular, se definieron alertas para cada puente por no uso de elementos adecuados, las alertas se pueden presentar en: apoyos, superestructura y subestructura.

La unión de estos tres indicadores estratégicos permite hacer una **valoración técnica** a la estructura de puente y darle una valoración integral, para ello se propone:

$$\text{Valoración técnica} = 50\% \text{ BCI} + 40\% \text{ VAM} + 10\% \text{ USO}$$

Evaluación Socioeconómica

La decisión de intervenir una estructura, su plazo y orden de prioridad no depende sólo de su valoración técnica, sino, que se hace mandatorio analizar la importancia de esa estructura en cuanto a condiciones socioeconómicas, para ello se propone el uso de otro indicador que hemos denominado índice socioeconómico (SoEc).

Para este cálculo se dispondrá de información ya existente en las municipalidades, como lo son los inventarios viales (Requisito de la Ley 8114), utilizando el índice de viabilidad técnico social (IVTS) y la importancia de la ruta (asignada por el municipio).

El cálculo de este indicador se realizará de la siguiente forma:

$$\text{SoEc} = 50\% \text{ Importancia socioeconómica} + 50\% \text{ Importancia ruta}$$

Donde la Importancia Socioeconómica se calcula con base en el IVTS este índice es calculado por cada municipalidad de acuerdo con lo establecido en Manual de especificaciones técnicas para realizar el inventario y evaluación de la Red Vial Cantonal. (Decreto No. 38578-MOPT-21-10-2014). El IVTS sirve para determinar la importancia relativa de una calle o camino dentro de un cantón, distrito o región, de condiciones similares. El IVTS se calcula con base en la información recopilada mediante el inventario socioeconómico. La cuantificación de cada uno de los criterios ahí considerados permite la obtención de un índice relativo entre 0 y 100, que indica el grado de importancia de la vía. Entre mayor es el índice, mayor importancia revisten el camino o calle en estudio.

La importancia de la ruta fue un elemento de gran interés para la Municipalidad de El Guarco, debido a que la municipalidad desarrolló una metodología para asignar ese nivel de importancia, basada en las actividades principales de la municipalidad y su importancia. [6]

Finalmente, este indicador se muestra no sólo en una escala de 1 a 5, sino que se utiliza un esquema de colores de acuerdo a la figura 2.



Figura 2. Escala de valoración para los indicadores socioeconómicos.

En el cuadro 1 se muestra el resumen de los indicadores propuestos

Cuadro 1. Resumen de los indicadores propuestos.

Indicador	Componente	Peso porcentual	Elementos	Fuente
Condición estructural (BCI)	Accesorios	5	Pavimento, barandas y juntas	Manual de Inspección de Puentes del MOPT
	Superestructura	45	Los, elementos principales y secundarios de acero y concreto	
	Subestructura	50	Apoyos, bastiones y pilas	
Evaluación de variables ambientales (VAM)	Amenaza sísmica	30	Zona Sísmica, cercanía de fallas y suelo predominante	Código de cimentaciones de Costa Rica 2010, Lineamientos para el diseño sismorresistente de puentes y mapas de la Comisión Nacional de Emergencias
	Riesgo hidrológico	30	Más crítico: amenaza por inundación, estrechamiento del cauce, altura libre inferior y ángulo de ataque	Formularios de campo
	Fragilidad ambiental	40	Índice de fragilidad ambiental de SETENA	Plan GAM 2030 (solo disponible para la GAM)
Evaluación de uso del puente (USO)	Seguridad vial	60	Elementos de seguridad vial existentes en el puente	Información recopilada en el campo
	Funcionalidad / Operatividad	40	Reducción de carriles, existencia de ruta alterna y restricción de carga	Información recopilada en el campo
Evaluación socioeconómica (SoEc)	Importancia socioeconómica	50	Inventarios viales, índice de viabilidad técnico social (IVTS) e importancia de ruta (asignada por el municipio)	Manual de Especificaciones Técnicas para realizar el inventario y evaluación de la Red Vial Cantonal
	Importancia de la ruta	50		

Resultados

El proceso de priorización de las intervenciones de los puentes podemos visualizarlo den la figura 3.

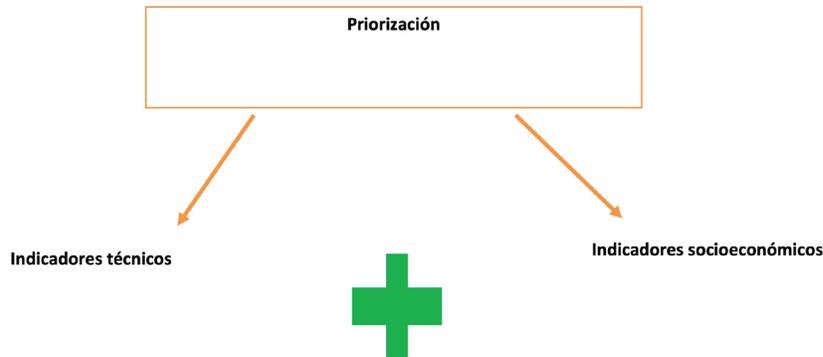


Figura 3. Esquema de priorización.

Esa valoración integral que nos permitirá priorizar se puede calcular de la siguiente forma:

Valoración integral = 70% Indicadores técnicos + 30% Indicadores socioeconómicos

Los porcentajes se han definido con base en criterios de expertos y los intereses de la municipalidad, es importante indicar que esta valoración puede ir cambiando con el tiempo, dependiendo del nivel en que se encuentre la infraestructura. Por ejemplo, para el caso de la Municipalidad del Guarco, no contaba con un inventario ni una evaluación visual de daños, por lo tanto, esta es la primera vez que se realizan los cálculos, de allí que la ponderación de los factores técnicos y especial la condición estructural debe ser la de mayor valor, pensando en resguardar la seguridad de los usuarios de la infraestructura.

El hecho de unir ambos tipos de indicadores permite hacer una valoración integral de estas estructuras y con esa valoración se puede tener un listado de las estructuras donde las que tengan un valor cercano a 5 serán las que se deben intervenir de primero. Esto permitirá generar rangos en los cuales se deba intervenir la estructura, por ejemplo podemos tener que puentes con valores mayores o iguales a 4 se deban intervenir a corto plazo, puentes con valores entre 2 y 4 a mediano plazo y puentes menores a 2 a más largo plazo.

El tipo de intervención dependerá de un análisis específico de cada uno, considerando los valores obtenidos en el índice de condición estructural.

Conclusiones y trabajo futuro

La evaluación integral de las variables condición estructural, ambientales y de uso, permite priorizar y planear de forma estratégica de administración de los activos viales, permitiendo a las municipalidades tener los insumos para una mejor gestión de los recursos económicos que le permita implementar programas de atención a las estructuras.

La metodología de evaluación ha permitido saber la condición actual y el entorno de las estructuras, para la toma de decisiones de los entes encargados para su administración estableciendo sus intereses e importancias, y normativas técnicas nacionales.

La metodología es versátil y libre al poder adoptar herramientas y sistemas técnicos establecidos según las condiciones, necesidades y realidades en las que se encuentre las municipalidades. Al acoger insumos, información, variables, capas, datos, y parámetros que satisfacen las necesidades del usuario.

A futuro queda el reto para esta y otras municipalidades, el poner en práctica estos indicadores en la gestión de activos de puentes, fomentando la evaluación de los trabajos que se realicen con estos mismos indicadores, incluso incursionando en la contratación del mantenimiento y conservación bajo estos mismos parámetros.

Referencias

- [1] Programa de Evaluación de Estructuras de Puentes. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Inventario de puentes rutas nacionales de Costa Rica. 2014-2018.
- [2] Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Manual de Inspección de Puentes MOPT. 2007.
- [3] Plan de la Gran Área Metropolitana - conocido como Plan GAM 2013 – 2030
- [4] Comisión Nacional de Emergencias. Mapas de Amenazas Cantón del Guarco. 2019.
- [5] Manual de Instrumentos Técnicos para el Proceso de Evaluación del Impacto Ambiental (Manual de EIA) Parte III. N° 32967 – SETENA
- [6] Municipalidad del Guarco. Inventario vial. 2017.
- [7] Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes. 2013.

Food loss assessment in micro, small and medium-sized agro-industrial enterprises

Evaluación de pérdida de alimentos en una micro, pequeña y mediana empresa agroindustrial

Rooel Campos-Rodríguez¹, Laura Brenes-Peralta²,
Arlyn Garcia-Salas³, María Fernanda Jiménez-Morales⁴

Fecha de recepción: 23 de abril de 2020
Fecha de aprobación: 6 de agosto de 2020

Campos-Rodríguez, R; Brenes-Peralta, L;
Garcia-Salas, A; Jiménez-Morales, M.F. Food loss assessment in micro, small and medium-sized agro-industrial enterprises. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-3 Julio-Setiembre 2021. Pág 143-155.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5122>



- 1 Doctor in Natural Sciences for Development. Professor and Researcher of the Agribusiness School. Coordinator of the Agroforestry Academic Area. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Email address: rocampos@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-4460-2313>
- 2 Agricultural Administrative Engineer and Master in Environmental Management. Research Professor. Agribusiness School. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Email address: labrenes@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5169-9961>
- 3 Master in Natural Resources Management and Production Technologies. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Email address: arggsa@gmail.com
- 4 Agricultural-Administrative Engineer and Master in Modern Manufacturing Systems. Research Professor. Agribusiness School. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Email address: maria.jimenez@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-9775-2545>

Keywords

Agro-industry; critical points; food loss; waste.

Abstract

This research emerges from a growing concern to face the problem owing to food loss (FL), with the purpose to evaluate processes in agro-industrial product elaboration, focusing on the determination of food loss critical points (FLCP) to promote their further reduction. The research was carried out in a Costa Rican MSME (micro, small and medium-sized enterprise), dedicated to the processing of tropical fruits. The FL assessment proposed methodology enabled the establishment of a food loss valorization team (FLVT) for a multidisciplinary approach throughout the study, as well as a flowchart construction for the selected process (soursop pulping) and the identification and quantification of losses. The assessment of the food loss points (FLP) was performed using a matrix and a criticality index based on severity and probability of occurrence; which led to the identification of the critical points. As a result, four FLCP were detected; regarding the raw materials input, the pulping operation and the transference of processed pulps into containers. The case study shows that the applied methodology allows to determine FLCP in an MSME such as the studied, as a first action to identify and reduce food loss, improve efficiency and consider further waste management strategies.

Palabras clave

Agroindustria; puntos críticos; pérdida de alimentos; residuos.

Resumen

Esta investigación surge en un contexto de creciente preocupación por enfrentar la problemática de la pérdida de alimentos (PA), con el objetivo de evaluar los procesos de elaboración de productos agroindustriales centrándose en la determinación de puntos críticos de pérdida de alimentos (PCPA) para promover su reducción.

La investigación se realizó en una MiPyme (micro, pequeña y mediana empresa) costarricense, dedicada al procesamiento de frutas tropicales. La metodología propuesta para la evaluación de PA permitió la conformación de un Equipo de Valorización de Pérdida de Alimentos (EVPA) para un enfoque multidisciplinario a lo largo del estudio, así como la construcción de un diagrama de flujo para el proceso seleccionado (pulpa de guanábana) y la identificación y cuantificación de las pérdidas. La evaluación de los puntos de pérdida de alimentos (PPA) se realizó utilizando una matriz y un índice de criticidad basados en la severidad y probabilidad de ocurrencia; lo que condujo a la identificación de los puntos críticos. Como resultado, se detectaron cuatro PCPA; relacionados con el ingreso de materias primas, la operación despulpado y la transferencia de las pulpas procesadas a los contenedores. El estudio de caso muestra que la metodología aplicada permite determinar los PCPA en una MiPyme como la estudiada; como una primer medida para identificar y reducir la pérdida de alimentos, mejorar la eficiencia y valorar nuevas estrategias de gestión de alimentos.

Introduction

Sustainable Development Goals (SDG) seek to raise awareness and improve the people's habits towards sustainable production and consumption [1]. Therefore, the regard of food losses and waste (FLW) can have a positive impact on SDG 12, specifically on target 12.3, which seeks to reduce FLW in production chains [2]. At international and local levels, efforts have been brewing to identify, quantify, reduce and prevent FLW. In 2015, the UN Member States [3] approved the goal of reducing, by 2030, food losses in production and distribution chains, for which a Global Food Loss Index must be foreseen [1], even when methodological considerations for quantification are still in development.

The Food and Agriculture Organization of the United Nations –FAO, estimated that one third of the world's food production is wasted or lost along the food supply chain. Food loss (FL) refers to the decrease in the available mass of food for human consumption in the production, post-harvest, storage and transport phases [2].

Globally, the economic cost of losses amounts 1 billion dollars (USD) per year; about 700 billion dollars (USD) must be added for environmental costs and another 900 billion dollars (USD) of social costs, for a total of 2.6 trillion dollars (USD) per year [2]. Consequently, there is a growing interest to work on FL, due to the economic implications from a cost-benefit perspective.

In addition to FL in production processes, and the given complex links between producers, suppliers, and consumers [4], food security, also challenged by FL, is becoming transcendental due to climate change [5] and to changes in production factors. If the current pattern of food use is maintained, coupled with population growth, by 2050 there should be a 60% increase in world agricultural production to meet the demand [6], [7].

Similarly, possible benefits for the environment could be present as well if FL is addressed [8], since more efficient processes will not only have economic and food security implications, [9], but will entail a better use of resources. The lost food is linked to inappropriate use of energy, water and greenhouse gas emissions generated by operations during their production [10].

FLW can occur in almost any link in the production chain, from harvesting, processing and final consumption, for various reasons from bad planning and expiration of food-products, to human failures or equipment in poor condition in the processing phase [11]. FL, in particular, are identified in the earlier stages of the food supply chains, caused by technical, management, storage and processing constraints, inappropriate equipment and packaging problems, among others [2]. Accordingly, it is essential to guarantee the efficiency of agro-industrial processes and to have sufficient information about factors that can lead to waste generation as result of FL at this level, in order to promote science-based interventions.

Agro-industrial-type processing is a common alternative to link primary production with consumers through processing and value adding techniques and, reducing FL in this section of the food supply chain can represent an opportunity for management of surpluses and preventing or reducing waste generation whenever possible through proper administration of the operations. [12].

In fact, there are empirical studies that show that a reduction in discarded waste can lead to significant savings for companies [12]. This idea introduces the opportunity of making the business case for reducing FLW, arguing it can generate a triple win: (1) it can save money for farmers, companies and households; (2) it can help feed more people; and (3) it can alleviate pressure on water, land and climate [13]. The analysis of historical data shows there is a robust business case for countries, cities and companies to reduce FLW [13]. An example of the adoption of this idea is given by the United Kingdom (UK), where a nationwide initiative was launched in 2007 to reduce household food waste, and by 2012 a reduction of 21% of FLW

was achieved compared to the country's baseline. The ratio of purely financial cost/benefit attributable to the UK initiative was over 250:1, meaning a substantial return on £1 investment resulted in savings of £250. Similarly, Garrone *et al.* [12] emphasize that cities can also achieve high returns on their investment in FLW reduction. Finally, the return on investment in FLW reduction for companies can also be significant.

In countries with developing economies such as Costa Rica and those in the Latin American and Caribbean Region, there are still imprecise estimates on FL and its effects. However, the processing stage is suggested to entail 6% of FL [14], given that deficiencies in the used technologies following the post-harvest and transformation processes, are often recognized as FL hotspots.

The Costa Rican agri-food sector is not exempt from the aforementioned problems, in addition to its need to compliance with the Integral Waste Management Law no.8839 [16], which highlights the need to create comprehensive and dynamic solutions including first the prevention of waste generation, and following disciplines linked to circular economy and hierarchy of waste management to address this issue [17].

Subject to this, the analysis of critical points can work as a methodology for addressing waste in the production process. This system known as HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Points) applied for Food Safety management, could be emphasized and adapted in other possible points that would be generating problems throughout the production process [15]. This would translate into considering the flowchart analysis of the agro-industrial process, identifying food loss critical points (FLCP) by obtaining a criticality index, which depends on the severity and probability of occurrence of the losses found in the evaluated processes, and once the significance is determined, proper interventions can begin to be considered.

Therefore, the objective of this research was to propose an adapted methodology based on HACCP and apply it in a case study of a small fruit processing agroindustry, to allow in a future, a more effective and environmentally friendly production.

Methodology

Process Flow Diagrams

The research was carried out in Cartago, Costa Rica, in a small company dedicated to the processing of fruits to produce pulps and beverages. A working group called the Food Loss Valorization Team (FLVT) was formed by academics in FL and biowaste valorization, and company representatives dedicated to quality control, management, and production.

The FLVT was responsible for prioritizing the production processes to be assessed, according to criteria such as cost, sales volume, production, profit margin and product leadership in the market. In this sense, the team selected to study the pulp processing of soursop (a tropical fruit known as guanabana in Costa Rica, *Annona muricata*). The FLVT team also met to review existing documents in the company and consider the criteria of the members and personnel to construct the production flowchart from the reception of the raw materials to the processed product storage. From the aforementioned, process flows were schematized, incorporating the unit operations sequence, process conditions, ingredients and additives, reprocessing, final products, intermediate products, by-products and discards. The definition of process flows, observations and unstructured communications within the FLVT with the personnel, allowed the pre- identification of potential food loss points (FLP), which allowed to later move towards the next phase of FL quantification and FLCP determination.

Due to resources and time availability, the team defined to conduct a minimum of five repetitions to collect the necessary data using collection tools designed for the study and aided by Microsoft Excel ® spreadsheets. The FLVT planned for the data collection chronogram, executed the FL measurement, analyzed the information and validated the results through *in situ* verifications.

Quantification of FL

Based on five observations of production batches, and the unit operations described in the schematized flow charts, the researchers measured the amount of inputs and outputs, as well as the discards, spilled mass and waste on each unit operation (when possible) where FLP were identified. This allowed to conduct a mass balance for each considered unit operation and calculate the FL along the process flow, both in absolute (kg) and relative (%) units.

Evaluation of food losses and definition of food loss critical points (FLCP)

The hazard assessment matrices already used by other authors [15 and 18] in food safety were taken as a base tool, adjusting the definition of parameters to assess critical control points with respect to FL. This assessment considered the severity (S) and the probability of occurrence (O) of FL at each waste generation point, using a rating scale from 1 to 5 (Table 1), which allowed the calculation of a criticality index defined by the equation 1. Considering that FL in the processing stage of food supply chains in Latin America and the Caribbean is estimated at 6% [14], and these estimates are intended to provide a baseline for optimizing production yields, the severity (S) scale in this case study used that as the maximum value of FL, and then categories were calculated. The probability of occurrence (O) scale, undertook frequency descriptors, such as rarely, occasionally, often, usually and always, based on the amount of times a FL was observed during the five repetitions.

$$CI = S \times O \quad (1)$$

Where:

CI: Criticality Index

S: Severity

O: Probability of Occurrence

After applying equation 1, the significance of the FL generation was evaluated using the values in table 2 as a reference. The FL points where the losses have a medium or high significance are considered FLCP.

The obtained significance results were included in an evaluation matrix with the unit operation, the identified FL points (FLP), the severity rating (S), the probability of occurrence rating (O), the calculated the criticality index (CI) and the significance of such FLP.

Table 1. Parameters and values in the assessment of FL.

Severity		Probability of Occurrence	
Criteria	Rating value	Criteria	Rating value
Scarce: Weight of the FL < 1.2 of the weight of the raw material input within the evaluated operation, if generated	1	Rarely: The FL was presented within the evaluated operation in 1 of the 5 repetitions	1
Mild: $1.2 \leq$ Weight of FL < 2.4 of the weight of the raw material input within the evaluated operation, if generated	2	Occasionally: The FL was presented within the evaluated operation in 2 of the 5 repetitions	2
Moderate: $2.4 \leq$ Weight of the FL < 3.6 of the weight of the raw material input within the evaluated operation, if generated	3	Often: The FL was presented within the evaluated operation in 3 of the 5 repetitions	3
High: $3.6 \leq$ Weight of the FL < 4.8 of the weight of the raw material input within the evaluated operation, if generated	4	Frequently: The LF was presented the evaluated operation in 4 of the 5 repetitions	4
Very high: Weight of the FL \geq 4.8 of the weight of the raw material input within the evaluated operation, if generated d	5	Always: The LF was presented within the evaluated operation in 5 of the 5 repetitions	5

Source: Author creation from Cartín *et al.* [15]

Table 2. Significance of losses according to the criticality index.

Significance	Significance Value
Low	< 10
Medium	$10 < X < 15$
High	> 15

Results and discussion

Process Flow Diagrams

According to the selection made by FLVT and observations, figure 1 presents the flow chart of the soursop pulp process.

Through the individual review of the unit operations within the overall soursop process, six FLP were identified, such as the raw material input, pulping, resting, pasteurization, sieving and packaging and sealing.

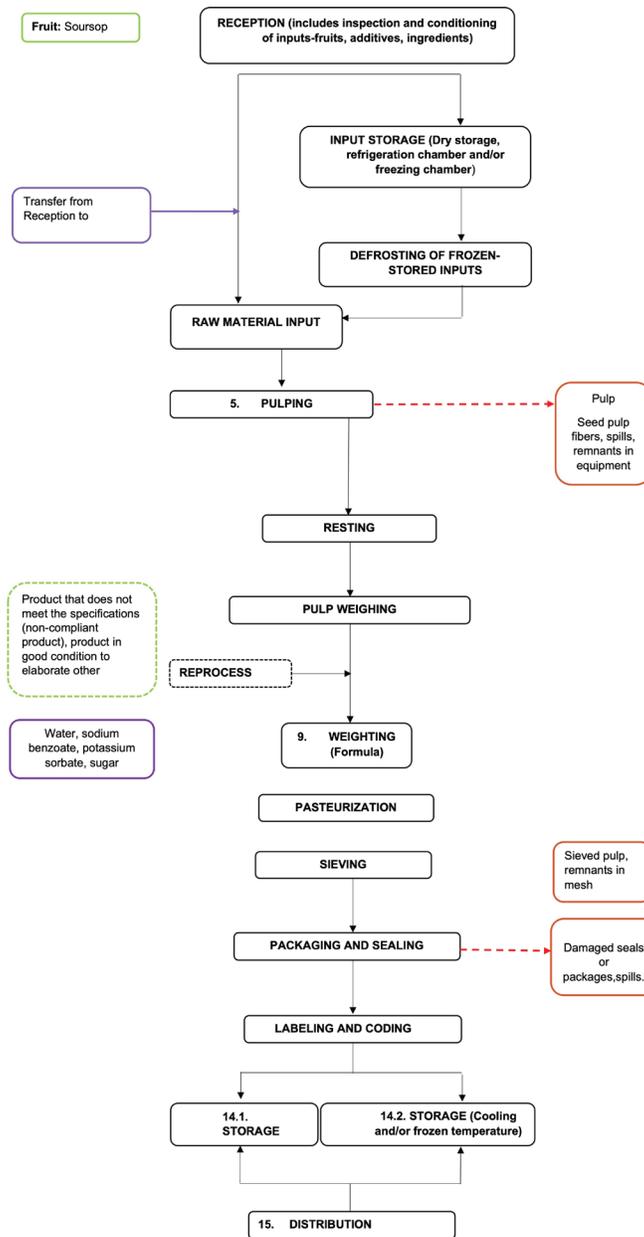


Figure.1. Flowchart processing for soursop pulp.

FL quantification in identified FLP in the soursop pulp production process

The six-unit operations where FLP were identified occur throughout the production process as indicated by the FLVT and plant personnel. Therefore, the mean FL is presented in table 3, as a result of the FL quantification in the five repetitions from this study.

Table 3. Quantification of the FL in the soursop concentrate production process.

Unit operation	Food loss point	FL average	
		(kg)	(%)
Raw material input	Spill of soursop juice when package is cut to place in equipment	2,05	1,84
	Soursop remnants inside the packages	3,37	3,08
Pulping	Soursop juice leaks when opening pulping equipment gate	1,58	1,55
	Pulp splashing at the pulping equipment outlet	0,35	0,32
	Pulp drop on the floor during container transference	1,03	0,97
	Overflow of pulp deposited in the type1-containers	0,83	0,80
	Pulp adhered to the type1-container walls	1,17	1,17
	Pulp spills in the transfer from the type1-containers to bins	1,38	1,42
Resting	Pulp attached to the utensils used to from bins to type2-container	0,43	0,47
	Spills in the transfer from bins to type2-container	0,87	1,02
Pasteurization	Pulp spilled in the transfers to the pasteurization equipment	0,55	0,50
	Concentrate overflow from one of the pasteurization equipment	10,42	0,97
	Leakage of concentrate when decoupling the suction equipment to move it from one pasteurization equipment to the other	4,08	0,39
Sieving	Residue retained in the sieve mesh	4,92	0,48
Packaging and sealing	Spill of the product into a holding tank prior to packaging	0,73	0,07
	Disposal of product deposited in the tray when the process is finished	1,05	0,11
	Product overflow during automatic packaging	1,00	0,09
	Product overflow during manual packaging	0,65	0,06
	Spill during the collection of samples of the processed product	0,07	0,01

Evaluation of food loss points (FL)

Considering the obtained data from table 3, as well as its assessment regarding the parameters presented in table 1 for S and O, the FLVT applied equation 1 to calculate the CI. The obtained results were categorized according to table 2. A summary of these data is presented in table 4, where it is seen that, from the six-unit operations where FLP were identified, the Raw Materials Input and the Pulping unit processes are the ones that present four FLCP, since they ranked as medium and high criticality rates.

Table 4. Evaluation of FL points in the production process of soursop concentrate.

Unit operation	Food loss description	Severity (S)	Probability of occurrence (O)	Criticality index (CI)	Significance
Raw material input	Spill of soursop juice when package is cut to place in equipment	2	5	10	Medium
	Soursop remnants inside the packages	3	5	15	High
Pulping	Soursop juice leaks when opening pulping equipment gate	2	5	10	Medium
	Pulp splashing at the pulping equipment outlet	1	5	5	Low
	Pulp drop on the floor during container transference	1	5	5	Low
	Overflow of pulp deposited in the type1-containers	1	5	5	Low
	Pulp adhered to the type1-container walls	1	5	5	Low
	Pulp spills in the transfer from the type1-containers to bins	2	5	10	Medium
Resting	Pulp attached to the utensils used to from bins to type2-container	1	5	5	Low
	Spills in the transfer from bins to type2-container	1	5	5	Low
Pasteurization	Pulp spilled in the transfers to the pasteurization equipment	1	3	3	Low
	Concentrate overflow from one of the pasteurization equipment	1	5	5	Low
	Leakage of concentrate when decoupling the suction equipment to move it from one pasteurization equipment to the other	1	5	5	Low
Sieving	Residue retained in the sieve mesh	1	5	5	Low
Packaging and sealing	Spill of the product into a holding tank prior to packaging	1	3	3	Low
	Disposal of product deposited in the tray when the process is finished	1	5	5	Low
	Product overflow during automatic packaging	1	3	3	Low
	Product overflow during manual packaging	1	4	4	Low
	Spill during the collection of samples of the processed product	1	4	4	Low

Brainstorming within the FLVT and personnel considered that this FLP are mainly due to human error, deficiencies in the packaging material or aspects related to preventive maintenance and characteristics of the equipment. The nature of the processes and the design of the equipment were factors that hinder of a standard to measure inputs and outputs in the different unit operations, including the direct measurement of losses, so it was necessary to proceed by weighing all the inputs, outputs and waste that the process would allowed, and the joint processing of such information allowed estimating the generation at the FLP identified. In other cases, direct mass measurements of the waste can be executed, if the process allows for it. It is also observed, that one operation unit can have two or more FLP, and such situation required that each of these points were to be quantified and assessed separately, since the origin of FL generation is different.

According to the information in tables 3 and 4, most average losses in FLP are below 1,2% of the weight of the raw material used in each production batch; however, certain unit operations presented losses above that value due to manual transfer of inputs into equipment, or from equipment to containers, which led to spills, leaks, pulp that remains adhered to packaging or walls of the bins and equipment during pulping, or juice that leaked when the hopper door of the pulping machine was opened or presented excessive movement or vibration.

The raw material input operation entailed two FLCP. In this operation, the collaborator extracted the raw soursop contained in plastic bags, cut them at the top and deposited the soursop in the hopper of the hammer mill for the pulping operation. Part of the content of the bags was the soursop juice, which spilled when the bags were opened, causing the loss of raw material. In addition, small quantities of soursop remained attached to these packages. The pulping operation also presented a FLCP when the equipment gate was opened, and juice leaks or splashes were detected. Finally, the fourth FLCP was observed at the end of the pulping operation, when the product could spill while being transferred due to human error or overloading of the container. It is relevant to indicate that most of the severity parameter (S) was qualified in 1, 2 or 3 values; however, the probability of occurrence was valued at 5, due to the fact that it always occurred during this case study repetitions.

Observations and expert criteria of the FLVP regarding the soursop concentrate production process, also suggested that potential damages in the equipment could result in FL if not addressed in a timely manner. This is the case of the failures in the automatic filling nozzles of the containers and the pulping machine; however, this were not observed at the moment of the study.

In general, the observations made on the production processes showed opportunities for improvement in relation to the weighing of raw materials and inputs of each operation, as this could be both a diagnostic and a control measure to achieve the FL reduction target. The quantification will allow for strategic interventions, the planning for FW valorization alternatives and validation of the interventions after a new application of the FLP evaluation.

In summary, the case study allowed to apply this proposed adapted FLCP methodology, as observed in figure 2.

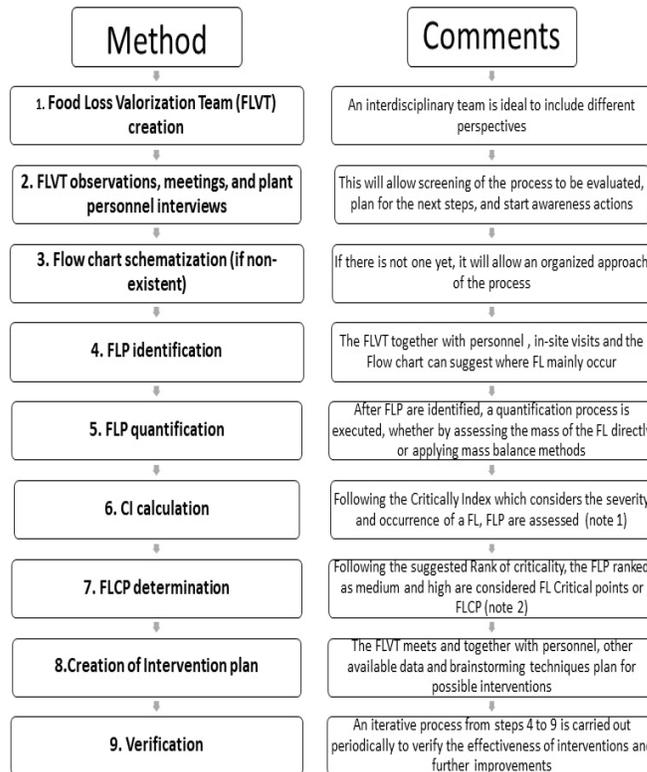


Figure 2. FLCP proposed methodology for FL assessment in MSME agro-industries

Note 1: The severity (S) can be modified according to the company's goals and acceptable thresholds, if not the estimate of 6% based on available literature for the FL case in Latin America and the Caribbean is suggested. The occurrence (O) can also be modified depending on the amount of possible repetitions, suggested at a minimum of three.

Note 2: the significance is calculated after applying equation 1 of this document and the significance value in table 2 of this document.

Conclusions

The quantification of food losses at the agro-industry processing level is a topic for further study to establish practical guidelines for data collection and assessment, such as procedures and use of technological tools, which must be based on rigorous knowledge of the architecture of production processes.

This investigation demonstrates that it is possible to adapt an existing methodology, used from the food safety approach, to determine in a simple way the losses of food in an agro-industry process, through the evidence of the FLCP. Then, they can evaluate the criticality of losses within the production process.

The applied tool to the studied agro-industrial company, shows few losses suggesting the efficiency of the process, but still opportunities for improvement are detected. It also demonstrates that its application is simple and practical in this context; it allows to have more control over the productive process and aids to determine critical points of FL which must be regarded to avoid its increase. It also enables evidence-based potential interventions. Once they are planned, this tool could be the start for reducing the potential negative impact on the environment triggered

by FLW or unutilized by-products that are not treated properly, or simply sent to final disposal. These latter could be incorporated into other productive processes that would generate added value, and would contribute significantly to the bioeconomy from a circular economy approach.

Acknowledgements

The authors would like to recognize the support from students who contributed to different stages of this study, Fiorella Ramírez, Jonathan Castro, Mariajosé Esquivel and Arlyn García. We would also like to give a special thank you to Esteban Rojas y Federico Vargas & team, for their willingness to participate in the study, while we recognize their commitment for a truly sustainable approach in their agro-industrial activity.

References

- [1] UNDP (United Nations Development Program). "Agenda de desarrollo post-2015". In: <https://www.cr.undp.org/content/costarica/es/home/post-2015/sdg-overview/>, 2019.
- [2] FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). "The State of Food and Agriculture 2019. Moving forward on food loss and waste reduction". Rome. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO, 2019.
- [3] UN (United Nations). "Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. Obtenido de United Nations". In: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>, 2015.
- [4] J. Gustavsson, J.C. Cederberg & U. Sonesson. "Global Food Losses and Food Waste: Extent, Causes and Prevention", Study Conducted for the International Congress Save Food At Interpack 2011, [16–17 May], Düsseldorf, Germany Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2015.
- [5] P.C. Nelson & E.D. Young. "Enhancement in the Marmoset Inferior Colliculus: Neural Correlates of Perceptual "Pop-Out". In: E. Lopez-Poveda, A. Palmer, R. Meddis, Eds. *The Neurophysiological Bases of Auditory Perception*. Springer, New York, NY, 2010.
- [6] FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). "Costa Rica mantiene tendencia a la disminución del hambre y la desnutrición". Retrieved from: <http://www.fao.org/costarica/noticias/detail-events/en/c/463756/>. 2017.
- [7] J. Aschemann, N. Raak, H. Rohm, C. Symmank & S. Zahn. "Processing- and product-related causes for food waste and implications for the food supply chain". V 61. *Waste Management*, 2017, pp 461-472.
- [8] B. Ellison, M.K. Muth & E. Golan. "Opportunities and Challenges in Conducting Economic Research on Food Loss and Waste". *Applied Economic Perspectives and Policy* 42 (1), 2019, pp 1-19.
- [9] C.E. Landry & T.A. Smith. "Demand for household food waste". *Applied Economic Perspectives and Policy* 41 (1), 2019, pp 20–36.
- [10] R. Lozano, E. Papargyropoulou, J. Steinberger, Z. Ujang & N. Wright, N.. "The food waste hierarchy as a framework for the management of food surplus and food waste". V 76. *Journal of Cleaner Production*, 2014, pp 106-115.
- [11] N. Wilson, R. Miao & C. Weis. "Seeing is not believing: perceptions of date labels over food and attributes". *Journal Food Products Marketing* 24:5, 2018, pp 611-631.
- [12] P. Garrone, M. Melacini, A. Perego & S. Sert. "Reducing food waste in food manufacturing companies". V 137. *Journal of Cleaner Production*, 2016, pp 1076-1085.
- [13] C. Hanson & P. Mitchell. "The business case for reducing food loss and waste". A report on behalf of Champions 12.3. Retrieved from: http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Champions123_BusinessCase_Catering_0.pdf (accessed on 21 February, 2019).
- [14] FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). "Boletín Pérdidas y Desperdicio de Alimentos en América Latina y el Caribe". In: <http://www.fao.org/3/a-i3942s.pdf>. 2014.
- [15] A. Cartín, A. Villarreal & A. Morera. "Implementación del análisis de riesgo en la industria alimentaria mediante la metodología AMEF: enfoque práctico y conceptual". *Rev. Med. Vet.* (27), 2014, pp 133-148.
- [16] Health Ministry. "Plan Nacional para la gestión integral de residuos 2016-2021". San José, Costa Rica, 2016.

- [17] G. Wehenpohl, & C. Hernández. "Guía en la Elaboración de Planes Maestros para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Municipales". México: Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México, 2006, pp 78.
- [18] R. Govender. "A hazard analysis methodology for the South African abattoir hygiene". British Food Journal, 116(12), 2014, pp 2026- 2047.

Construcción del Índice de Riesgo para determinar la Sostenibilidad del Servicio de Agua y Saneamiento (IRSSAS) en distritos rurales de Costa Rica atendidos por ASADAs

Construction of Risk-Index for assessment of water and sanitation sector (IRSSAS) in Costa Rica

Macario Pino-Gómez¹, Silvia M. Soto-Córdoba²,
Lilliana Gaviria-Montoya³

Fecha de recepción: 1 de junio de 2020

Fecha de aprobación: 29 de setiembre de 2020

Pino-Gómez, M; Soto-Córdoba, S.M; Gaviria-Montoya, L.
Construcción del Índice de Riesgo para determinar la Sostenibilidad del Servicio de Agua y Saneamiento (IRSSAS) en distritos rurales de Costa Rica atendidos por ASADAs.
Tecnología en Marcha. Vol. 34-3 Julio-Setiembre 2021. Pág 156-176.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5198>

- 1 Centro de investigación y Protección Ambiental (CIPA), School of Environmental Engineering, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
Correo electrónico: mpino@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-8446-4723>
- 2 Centro de investigación y Protección Ambiental (CIPA), School of Chemistry, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica.
Correo electrónico: ssoto@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-3550-1505>
- 3 Centro de investigación y Protección Ambiental (CIPA), School of Chemistry, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica.
Correo electrónico: lgaviria@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-6637-5081>



Palabras clave

Agua potable; cambio climático; gobernanza del agua; índice riesgo; acueductos rurales.

Resumen

Las amenazas del recurso hídrico son multifactoriales, incluyen la degradación y contaminación de acuíferos y suelos, gestión de los acueductos, aspectos financieros, educativos y características propias del territorio. La presión de uso del agua y la variabilidad en su oferta debido al cambio de clima, justifican la urgente necesidad de contar con herramientas predictivas del riesgo. Costa Rica carece de un índice que prediga el riesgo en la prestación sostenible de los servicios de agua potable y saneamiento. Por estas razones se desarrolló y se estimó a través de una investigación de varios años, lo que se denomina el IRSSAS, Índice de Riesgo en la Sostenibilidad de la prestación del Servicio de agua potable y Saneamiento. Dicho índice se construyó considerando la Gestión del Recurso Hídrico (GRH), el Saneamiento Ambiental (SA), la Educación Ambiental (EA), el Índice de Desarrollo Socioeconómico (IDS) y el impacto de los Eventos Naturales (EN). En total se diseñaron, validaron y calcularon, 30 indicadores que componen el índice. Los indicadores se evaluaron considerando su aporte a la vulnerabilidad, mitigación, pertinencia, funcionalidad, disponibilidad, confiabilidad y utilidad. El índice se aplicó en una muestra de 97 acueductos rurales ubicados en las provincias de Puntarenas, Guanacaste y Cartago. Los resultados de la evaluación del riesgo mostraron que el 81 % de esos acueductos presentaban niveles de riesgo superior al intermedio, lo cual evidencia la poca sustentabilidad en la prestación del servicio de agua y saneamiento por parte de dichos entes operadores. Este índice podrá ser utilizado para evaluar el riesgo y tomar acciones correctivas y preventivas colaborando así con el desarrollo sostenible del país.

Keywords

Drinking water; climate change; water governance; risk index; rural water suppliers.

Abstract

The threats to water resources are multifactorial, including the degradation and contamination of aquifers and soils, management of aqueducts, financial aspects, education and the characteristics of the territory. The pressure of water use and the variability in its supply due to climate change, justify the urgent need for risk prediction tools. Costa Rica lacks an index that predicts risk in the sustainable provision of drinking water and sanitation services. For these reasons, the research study developed during 2014 to 2019 to estimate an index named Risk Index in the Sustainability of Drinking Water and Sanitation Service Provision (IRSSAS). This index was constructed by considering Water Resource Management (WRM), Environmental Sanitation (ES), Environmental Education (EA), Socioeconomic Development Index (SDI) and the impact of Natural Events (NE). A total of 30 indicators were designed, validated and calculated to make up the index. The indicators were evaluated considering their contribution to vulnerability, mitigation, relevance, functionality, availability, reliability and usefulness. The index was applied to a sample of 97 rural aqueducts located in the provinces of Puntarenas, Guanacaste and Cartago. The results of the risk assessment showed that 81% of these aqueducts presented higher than intermediate risk levels, which shows the lack of sustainability in the provision of water and sanitation services by these operators. This index can be used to evaluate risk and take corrective and preventive actions, thus collaborating with the country's sustainable development.

Lista de acrónimos

ASADA: Asociaciones Administradoras de Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Comunes

ARESEP: Autoridad reguladora de los servicios públicos.

AyA: Acueductos y alcantarillados

IRSSAS: Índice de Riesgo en la Sostenibilidad de la prestación del Servicio de agua potable y Saneamiento

MINAE: Ministerio de Ambiente y Energía

CGR: Contraloría General de la República

MIDEPLAN: Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica

MinSalud: Ministerio de Salud

INEC: Instituto Nacional de Estadística y Censos

IMN: Instituto Meteorológico Nacional

SERSA: Sistema Estandarizado de Regulación de la Salud

EA: Educación Ambiental

SA: Saneamiento Ambiental

GRH: Gestión de Recurso Hídrico

EN: Eventos Naturales

IDS: Índice de Desarrollo Social

IGN: Instituto Geográfico Nacional

Introducción

En las zonas rurales de Costa Rica, la distribución del agua es brindada por Asociaciones Administradoras de Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Comunes (ASADAs), [1] [2]. Las ASADAs atienden un 29 % de la población del país, siendo que el 73,2 % brindan el agua en comunidades de menos de 300 abonados [3]. En el cuadro 1 se muestra la distribución de ASADAs en el país y la cantidad de abonados atendidos.

Cuadro 1. Distribución de las ASADAs según provincia y cantidad de abonados y población atendida en Costa Rica.

Aspecto	Provincias							Total País
	San José	Heredia	Cartago	Alajuela	Puntarenas	Guanacaste	Limón	
#abonados	53 206	27 204	46 997	151 238	55 312	47 455	34 771	416 183
# ASADAs	225	41	131	323	181	276	98	1 275
#abonados promedio/ ASADA	236	664	359	468	306	172	355	N.A.
Población atendida*	239427	12 418	211487	680 571	248 904	213 548	156470	1 872 824

* El cálculo se realiza considerando un promedio de 4,5 habitantes por abonado.

Fuente: Elaboración propia con datos provenientes del sitio Web de Acueductos y Alcantarillados [4]

Las ASADAs presentan deficiencias asociadas a la inadecuada gestión de las infraestructuras de captación, conducción y distribución [5], administrativas y financieras [6], deterioro o contaminación de sus fuentes primarias por actividades agrícolas-ganaderas y por el uso de sustancias químicas [7], ausencia, dificultades y falta de capacitación asociadas a los sistemas de desinfección [8], contaminación del agua con coliformes fecales [9], insuficientes tratamientos de las aguas residuales [10], daños a las infraestructuras derivadas de los eventos naturales como inundaciones por tormentas tropicales, huracanes o lluvias torrenciales [11], sismos [12], vulnerabilidad en las zonas de protección inmediata por brechas volcánicas [13] y deslizamientos derivados de las condiciones del terreno y lluvias [14].

La infraestructura del suministro de agua por medio de las ASADAs se ha comenzado a deteriorar y al menos, la mitad de los acueductos ya requieren reparaciones y rehabilitación, sin disponer de recursos para tal fin, los préstamos no son una opción viable, pues la mayoría de población de las zonas son pobres. La relación de las ASADAs con AyA es de subordinación, pero este último no cuenta con capacidad para promover y regular a las ASADAs, existe ambigüedad en el papel dual de rector y actor, lo que dificulta la gestión de estas [15].

Los instrumentos de control y monitoreo que se aplican a las ASADAs incluyen los denominados planes de seguridad del agua [16], formulario unificado [9], Sistema Estandarizado de Regulación de la Salud (SERSA) [17], herramienta de la gestión integral del riesgo (GIRA) [18], los cuales se enfocan en regulación, monitoreo y no brindan una retroalimentación a los funcionarios de las ASADAs, tampoco están concebidos para mitigar los efectos del cambio climático.

El cambio climático tendrá un impacto directo en la distribución del agua en todo el país, se prevén afectaciones por escases en las zonas de Guanacaste [19], donde se proyectan déficits del orden del 15 %, así mismo, se proyectan aumentos de precipitación en la zona del caribe, lluvias torrenciales acompañadas de periodos de sequías [20].

Los escenarios propuestos para mitigar el impacto del cambio climático asociados al recurso hídrico incluyen, la consolidación del sistema boscoso, el aumento de alcantarillados, la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales, el manejo adecuado de los residuos sólidos, una economía baja en emisiones, disminución del consumo de agua por habitante y el aumento en el IDS [21] [22].

A la fecha, la principal acción gubernamental ante el cambio climático consiste en el programa nacional de descarbonización, orientado principalmente a disminuir las emisiones de gases con efecto invernadero provenientes de los sectores de transporte, tratamiento de residuos sólidos y empresas [23].

En Costa Rica, el INEC realiza periódicamente estadísticas ambientales en seis componentes: Condiciones y calidad ambiental, recursos ambientales y su utilización, emisiones, residuos y desechos, eventos extremos y desastres, hábitat humano y salud ambiental y protección ambiental, gestión y participación/acción ciudadana [24]. El Ministerio de Ambiente y Energía también dispone del SINIA [25] [26], portal que incluye un anuario estadístico del Centro Nacional de Información Geo-ambiental (CENIGA), Estadísticas del estado del ambiente, indicadores ambientales de la Iniciativa Latinoamericana y Caribeña, estadísticas respecto a los objetivos del desarrollo sostenible y estadísticas del agua, estas últimas administradas por la dirección de agua [27]. Los sistemas nacionales de información se enfocan en atmósfera, recurso hídrico, tierra, residuos, biodiversidad, bosque, recurso marino y pesquería, energía, vulnerabilidad y asentamientos humanos y compromiso y protección ambiental, brindando más de 1748 datos en 300 variables [28]. Adicionalmente CONARE [29] publica anualmente el documento denominado Estado de la Nación, donde investigadores expertos analizan las estadísticas ambientales. El gobierno de la República también genera su propio informe del

estado del ambiente [30] y hasta el Banco Central de Costa Rica (BCCR) tiene un sistema de contabilidad ambiental y económica (SCAE) para agua, bosques y energía con el objetivo de conocer la oferta y utilización de dichos recursos [31]. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) ha reconocido la calidad de los datos que se recopilan y las estadísticas nacionales en materia ambiental [32]

La capacidad de respuesta ante el cambio de clima asociada al sector hídrico requiere diversas acciones estructurales, dentro de las que se incluyen la construcción de infraestructura, planificación, políticas, acciones culturales, educación ambiental, financiamiento para proyectos, entre otros.

Con el fin de ejecutar acciones para contrarrestar los efectos del cambio en los patrones de lluvia, resulta necesario conocer los factores de riesgo que afectarán la sustentabilidad del servicio de prestación del agua y la presión sobre los sistemas de saneamiento. Por tanto, se propone la construcción de un índice de sustentabilidad para el sector.

Los índices deben construirse de forma que provean suficientes bases para medir, pero a la vez, deben ser simples y fáciles de aplicar, de forma que no se conviertan en una acción compleja de realizar. Existen diversos tipos de índices de sustentabilidad aplicables a el manejo de aguas residuales [33], eficiencia del manejo de los recursos en los países [34], uso del agua [35] [36], calidad del agua [37], entre otros, estos son complejos y requieren de información que no se recolecta en el país.

El MIDEPLAN administra el Índice de Desarrollo Social que tiene como objetivo ordenar los distritos y cantones según su nivel de desarrollo social, y se calcula a partir de 14 índices socioeconómicos [38], así mismo, la Contraloría General de la República en el sistema integrado de información municipal (SIIM) administra un índice de gestión municipal donde uno de los componentes es la gestión de residuos sólidos [39], ambos tienen relación directa con la sustentabilidad en la prestación del servicio de agua y saneamiento. Los indicadores que ha desarrollado el país y en Latinoamérica, corresponden a indicadores ambientales que ocupan describir y mostrar las dinámicas ambientales, a la fecha no se disponen de indicadores de desarrollo sostenible, que muestren las dinámicas socioeconómicas - [40]

La construcción de los índices debe estar apegados a los objetivos de la medición, y en este caso, los investigadores, proponen la construcción de un índice cuantitativo para determinar el riesgo en la sostenibilidad de la prestación del servicio de agua potable y saneamiento, cuyo acrónimo es IRSSAS. El índice formulado hace uso de la información oficial disponible que actualmente se recolecta en forma rutinaria en el país; está formulado para ser aplicado en cada operador de agua y los resultados se grafican sobre mapas usando como unidad el distrito. El IRSSAS se focaliza en el servicio prestado por entes operadores de agua y saneamiento. El mismo fue diseñado para ser accesible, aplicable, confiable, disponible, observable, relevante, representativo, válido, y verificable. El IRSSAS es un indicador de impacto, cuyo fin es medir el riesgo de la sostenibilidad de la prestación del servicio de agua y saneamiento en las comunidades atendidas por ASADAs. La sustentabilidad en la dotación del agua potable en las zonas rurales, requiere la debida atención de aquellas variables que afectan los ecosistemas, tales como contaminación, extracción excesiva del agua, uso inadecuado del recurso y también, depende de la capacidad de las poblaciones para acceder al agua, mediante infraestructura apropiada de captura y conducción, así como, tratamientos de desinfección y controles de calidad del agua, todo lo anterior de vital relevancia ante el panorama del cambio climático y el crecimiento de la población.

Materiales y métodos

Identificación de los objetivos del índice

Para construir el índice del riesgo en la prestación del servicio sostenible de agua y saneamiento, los investigadores plantearon que dicho índice, debía cumplir con los siguientes objetivos:

- Colaborar con los entes operadores de agua y saneamiento y los gobiernos locales, en los procesos de planificación y gestión ambiental.
- Ofrecer información sistematizada y comparativa del riesgo sostenible en la prestación del servicio de agua y saneamiento de los entes operadores.
- Servir de guía a las instituciones rectoras del sector agua y saneamiento a fin de priorizar la intervención en los acueductos que presenten mayor riesgo.
- Servir de referencia con información actualizada para consulta de las instituciones rectoras, ASADAs, Municipalidades y público en general.
- Contribuir con la planificación del recurso hídrico como estrategia de mitigación ante el cambio climático.
- Contribuir con información sistematizada para enfocar las inversiones en áreas estratégicas.
- Colaborar con los entes operadores en el cumplimiento de la legislación ambiental nacional.
- Ofrecer herramientas a las Municipalidades para la gestión territorial de los distritos.

Proceso de recopilación de la información

El levantamiento de la información referente a la cantidad de ASADAs, ubicación, tamaño, contactos, la forma en que gestionan su administración y operación, se realizó durante los años 2014 hasta el 2017, para tal fin, se utilizaron las siguientes fuentes secundarias:

- Registros Administrativos (MINAE [26], MIDEPLAN [41], MinSalud [42], IFAM [43], CGR [44], IMN [19], AyA [4] [1] [45]), CNE [46]
- Censos de población, vivienda, distrito y cantones (INEC) [24] [47]
- Revisión de información técnica recopilada por academia y ONGs
- Revisión de artículos científicos que detallan los diferentes índices que se utilizan a nivel internacional. [33] [35] [48]
- Mapas oficiales provenientes del Instituto Geográfico Nacional (SNIT) [49]

Oficiales de la Regional de Salud del Ministerio de Salud en Cartago facilitaron una base de datos con información actualizada de las ASADAs ubicadas en la provincia, número de abonados, sistemas de desinfección, contactos y otras particularidades. Con esta base de datos se procedió en el año 2014, a seleccionar una muestra representativa de estudio para establecer la línea base de los indicadores iniciales [50].

Posteriormente, durante los años 2015 al 2016, se levantó información primaria a partir de talleres de trabajo con los encargados y fontaneros de las ASADAs seleccionadas, visitando las nacientes, sistemas de desinfección y oficinas centrales [51]. Se aplicaron los documentos del sistema estandarizado de regulación de la salud SERSA [52] y el formulario unificado de información sobre organizaciones comunales prestadoras de servicios de agua potable y saneamiento del AyA [53]. Con esta información se identificaron las principales vulnerabilidades asociadas a los acueductos comunales. Esto permitió la integración de datos y microdatos en una estructura que dio origen a la propuesta preliminar de matriz de riesgo.

Construcción de la matriz de riesgo

La muestra de estudio correspondió a 97 Asadas, que representan más de un 7,6 % del total de ASADAs del país.

La matriz preliminar es una serie de datos estadísticos que requieren validarse y organizarse, con el objetivo que el conjunto de datos sea robusto, descriptor y fácil de completar. Por esta razón, la matriz preliminar se optimizó mediante el uso de herramientas estadísticas con el fin de eliminar aquellos indicadores no predictoras o cuyo impacto fuera poco o insignificante en el resultado final de la ecuación del riesgo [34], el detalle de las herramientas estadísticas esta fuera del objetivo de este artículo.

Cada indicador de la matriz fue sometida al análisis indicado en la figura 1, donde se evaluó su capacidad de predecir el riesgo considerando los componentes de amenaza, vulnerabilidad, mitigación, relevancia, funcionalidad, datos, rigurosidad y utilidad, según lo descrito en las diversas metodologías para evaluar amenazas y riesgos [40], [54], [55]. Los indicadores que pasaron la prueba de pertinencia fueron agregadas a la matriz final.

El proceso realizado se sintetiza en la figura 1. El resultado del proceso generó los indicadores finales.



Figura 1. Infograma del análisis a cada una de los indicadores.

La selección de componentes y subcomponentes y los pesos, se realizó mediante cuestionarios a expertos institucionales, personal de las ASADAs y consulta de académicos, utilizando para ello, una adaptación de la metodología DELPHI que se describe en la figura 2.

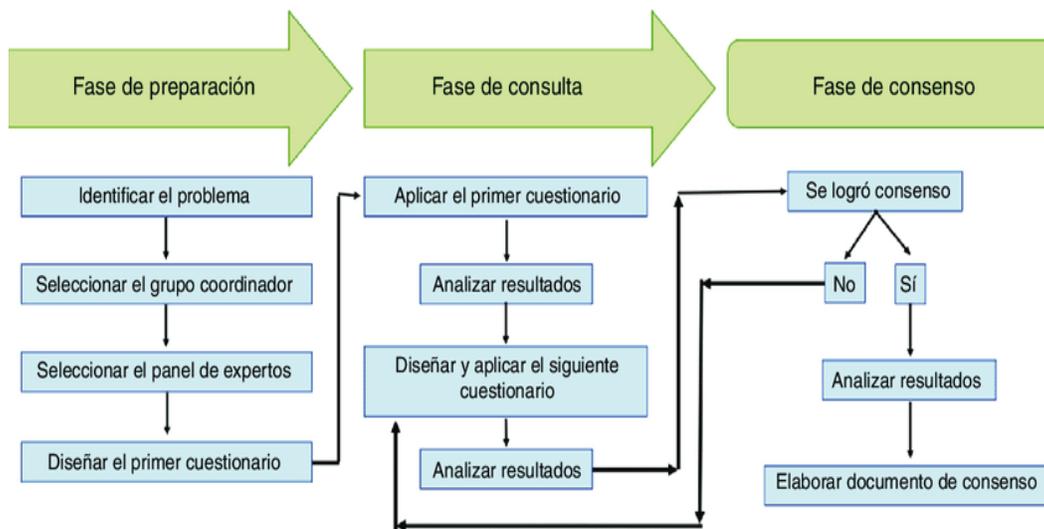


Figura 2. Pasos seguidos para selección de componentes y subcomponentes, adaptación de la metodología Delphi. [56]

En los cuestionarios aplicados se consideraron los siguientes aspectos:

- El impacto de la contaminación en el recurso hídrico
- La gestión del recurso hídrico
- Las inversiones en infraestructura (captación, conducción, tratamiento, almacenamiento, desinfección y distribución)
- Las condiciones socioeconómicas como predictores para responder al desarrollo sostenible.
- El aporte de las poblaciones concientizadas ambientalmente.
- Los riesgos asociados a la vulnerabilidad del territorio.

Para realizar los cálculos sobre esta nueva matriz, se utilizaron los datos suministrados por AyA, que correspondían a una muestra de 76 ASADAs ubicadas en las provincias de Guanacaste y Puntarenas. La construcción de la ecuación y de las escalas de riesgo para cada indicador de cada componente y subcomponente, se definieron con el aporte de un profesional en matemática aplicada, la forma en que se realizó este proceso se publicará en otro artículo. Una vez optimizada la ecuación se validó mediante comparación de resultados con datos de campo, para lo cual se realizaron visitas a 21 ASADAs en la provincia de Cartago y con esto se revisó nuevamente los resultados, para ajustar las escalas y optimizar los ajustes de la ecuación.

Una vez concluida la etapa de validación se procedió a establecer las fichas descriptivas (metadatos) para cada indicador, en las fichas se incorporaron los datos necesarios para normalizar la información, a saber: nombre del indicador, fuente, unidades, codificación, frecuencia de medición, ecuación, límite superior e inferior.

En la figura 3 se muestra un infograma que resume la metodología para la construcción del Índice.

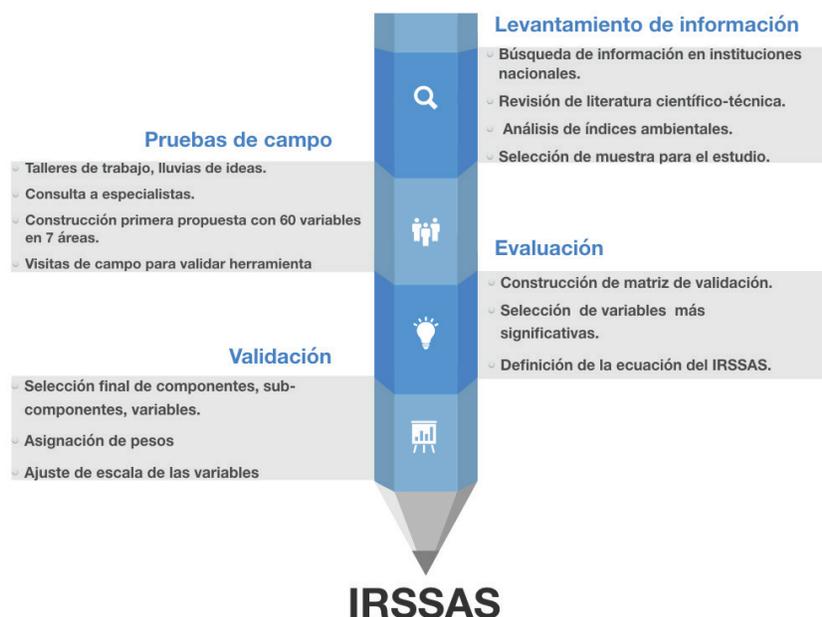


Figura 3. Infograma de la conceptualización del índice IRSSAS.

El re-escalamiento se realizó empleando los valores entre los máximos y mínimos como indica [55].

Construcción de mapas

Para automatizar el cálculo del índice se diseñó un software con la ayuda de estudiantes de la carrera de Ingeniería en Computación del ITCR. El detalle de la construcción del software esta fuera de los objetivos de esta publicación. En el software se programó la base de datos de los resultados con los indicadores validados en la muestra de estudio. Se utilizaron los mapas que pone a disposición el IGN para mostrar la ubicación de las ASADAs así como el valor del IRSSAS obtenido en cada caso. Con el fin de visualizar el riesgo en el mapa, se utilizó la unidad geográfica del distrito. En los distritos con solo una ASADA, se les asignó un valor de IRSSAS idéntico al valor de la ASADA. En los distritos que contaban con más de una ASADA, para calcular el valor del IRSSAS se calculó el promedio ponderado del valor de los IRSSAS de cada ASADA y su población servida.

Resultados

Determinación de vulnerabilidades

Durante los años 2014 hasta el 2016 se recolectó información primaria proveniente de 21 ASADAs de la provincia de Cartago: Cooperosales [57], Quebradilla [58], Guatuso [59], Higuito [60], San Isidro [61], Macho Gaff [62], Cot [63], Paso Ancho y Boquerón [64], Potrero Cerrado [65], San Pablo [66], Santa Rosa [67], El Yas [68], Palomo [69], Río Macho [70], San Jerónimo [71], Santiago [72], San Vicente [73], Alto Varas [74], Jicotea [75], Santa Cristina [76] y Santa Cruz [77], en el cuadro 2 se resumen las principales vulnerabilidades encontradas en las ASADAS de la muestra de estudio.

Cuadro 2. Resumen de vulnerabilidades de la muestra de estudio de ASADAs.

Saneamiento Ambiental	Gestión Recurso Hídrico	Educación Ambiental	Eventos Naturales	Gestión administrativa y de operación de las ASADAs
<p>Recolección de residuos sólidos en las zonas rurales deficiente.</p> <p>Presupuesto insuficiente para la limpieza de áreas comunes.</p> <p>El 78 % de los hogares utilizan tanques sépticos para el tratamiento de aguas residuales, éstos no son eficientes.</p> <p>No se le da tratamiento a las aguas grises.</p> <p>No hay presupuesto ni planes para la pronta instalación de plantas de tratamiento de aguas residuales.</p> <p>Contaminación de las aguas superficiales con residuos sólidos.</p> <p>Contaminación de mantos acuíferos por actividades agrícolas.</p> <p>Contaminación de fuentes por actividades humanas.</p>	<p>Las captaciones presentan diversas amenazas.</p> <p>Sistemas de desinfección operan con deficiencias.</p> <p>Inexistente cultura de aforos de las fuentes.</p> <p>Inexistencia de estudios de balance hídrico.</p> <p>Los encargados de las ASADAs indican que han observado una disminución de la oferta de agua en las fuentes.</p> <p>Variabilidad en los regímenes de lluvia.</p> <p>No se aplican acciones para regular los consumos promedio de agua de la población.</p>	<p>No existen planes permanentes de educación ambiental dirigidos a las comunidades.</p> <p>Poblaciones rurales con baja escolaridad y poco acceso a información.</p> <p>No existen presupuestos para realizar campañas de educación ambiental.</p> <p>Las escasas capacitaciones que se han ofrecido a las comunidades se realizan mediante los programas de Bandera Azul Ecológica.</p>	<p>Captaciones ubicadas en zonas de inundación.</p> <p>Problemas por cercanías al volcán Turrialba.</p> <p>Fallas geológicas en Guatuso.</p> <p>Deslizamientos.</p> <p>Tuberías aéreas sobre el cauce</p> <p>El análisis de vulnerabilidades de la Comisión Nacional de Emergencias [46], muestra el riesgo asociado a deslizamientos, inundaciones, volcanes y fallas que afectan directamente las infraestructuras de los acueductos, además de poner en riesgo a las poblaciones de menores condiciones sociales.</p>	<p>La mayoría de las ASADAs atienden a menos de 400 abonados.</p> <p>Muchas de las ASADAs estudiadas no alcanzan sus puntos de equilibrio económico.</p> <p>Problemas de morosidad.</p> <p>Falta de capacitación técnica.</p> <p>Exceso de actividades administrativas.</p> <p>Exceso de controles por parte de las instituciones del estado.</p> <p>El personal no cuenta con capacitación necesaria para enfrentar las responsabilidades que le asigna la legislación.</p> <p>Carencia de estudios, diseños y de planos de los sistemas de los acueductos.</p> <p>No existe planificación de acciones a largo o mediano plazo.</p> <p>Inexistencia de indicadores de operación, mantenimiento, administrativos y financieros.</p>

Matriz de riesgo

Se construyó la primera matriz de riesgo compuesta por 60 indicadores distribuidos en 7 componentes que componían el índice IRSSAS.

Luego del análisis de pertinencia de los indicadores según la metodología mostrada en la figura 1, éstos se redujeron hasta 30 indicadores que se enlistan en el cuadro 3. Se definieron cinco componentes: Recurso Hídrico, Saneamiento Ambiental, Educación Ambiental, Desarrollo Económico y Social de la región y Eventos Naturales asociados al territorio. Adicionalmente, éstos a su vez, se subdividieron en ocho subcomponentes: Gestión de Aguas Residuales, Gestión Integral de Residuos Sólidos, Calidad del agua potable, Gestión Administrativa financiera, índice de desarrollo social, educación ambiental y eventos naturales, los mismos se detallan en la figura 4.

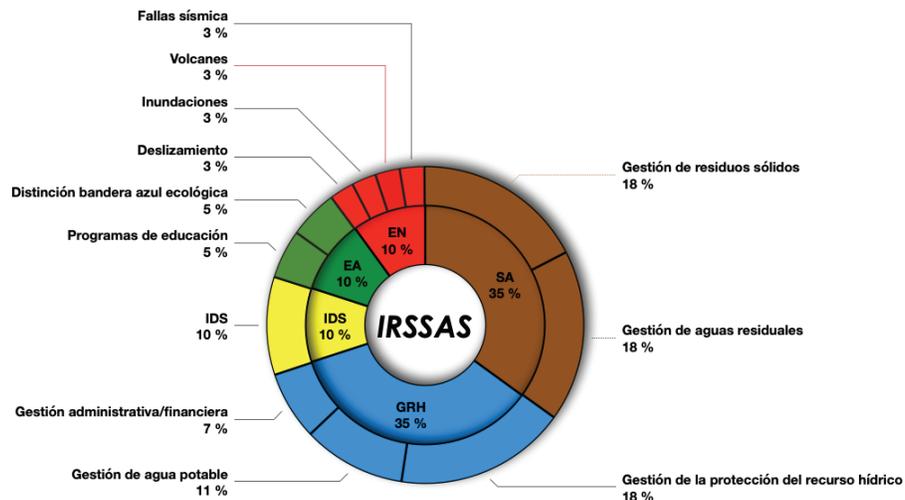


Figura 4. Composición del índice IRSSAS. SA: Saneamiento Ambiental, GRH: Gestión del recurso hídrico, IDS: Índice de Desarrollo Social, EA: Educación Ambiental, EN: Eventos naturales.

Con base en lo anterior se construyó la ecuación 1, esta muestra el análisis lógico de la composición del IRSSAS, donde se asignan pesos a cada uno de los componentes:

$$\begin{aligned}
 \text{IRSSAS} = & \Sigma [\text{Gestión del Recurso Hídrico (GRH)} \times 35\% \\
 & + \text{Saneamiento Ambiental (SA)} \times 35\% + \text{Educación Ambiental (EA)} \times 10\% \\
 & + \text{Índice de Desarrollo Socioeconómico (IDS)} \times 10\% \\
 & + \text{Eventos Naturales (EN)} \times 10\%]
 \end{aligned}$$

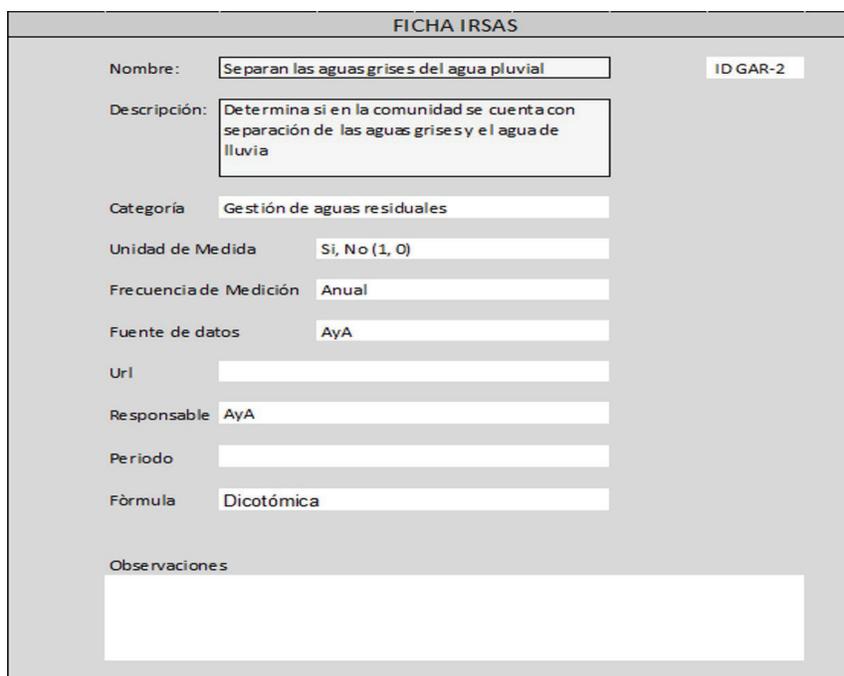
(Ecuación 1)

En el cuadro 3 se muestran indicadores seleccionados a partir de los cuales se calcula el IRSSAS, estos responden a los objetivos planteados.

Cuadro 3. Matriz utilizada para el cálculo del IRSSAS.

Componente	Subcomponente	Indicador
Saneamiento	Gestión AR	¿Existen sistemas de tratamiento individual de aguas negras en la comunidad?
		¿Existe presencia de aguas grises en los caños de recolección de agua lluvia?
		La población cuenta con alcantarillado pluvial?
		¿La población tiene planta de tratamiento de aguas residuales?
		Porcentaje (%) de liquidez para invertir en mejoras del acueducto
	Gestión de RS	% Cobertura de recolección de residuos sólidos no valorizables
		¿Existe recolección de residuos sólidos valorizables?
		Producción per capita de residuos sólidos (Kg/Persona/día)
		Inversión anual en Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS) por persona por año en el cantón (\$/persona/año)
		Inversión en la limpieza de vías y áreas comunes por persona en cada cantón (\$/persona/año)
Gestión Recurso Hídrico	Gestión Protección Recurso Hídrico	¿La ubicación de la captación está en área protegida o en zona de conservación?
		¿Está demarcada la zona de protección legalmente?
		¿Se cuenta con información del balance hídrico?
		Consumo promedio de agua de la comunidad expresado en unidades de litros por persona por día (l/persona/día)
		¿La ASADA posee plan de atención integral de riesgos?
		¿Cuentan con programas para adaptación al cambio climático?
		¿Posee registros de aforos de las fuentes de abastecimiento?
	Calidad Agua Potable	¿Se diagnostica el riesgo en los componentes del acueducto mediante la herramienta SERSA?
		¿La ASADA posee sistema de desinfección?
		¿Posee planta potabilizadora?
	Gestión Administrativo / Financiero	¿Posee la ASADA sello de calidad sanitaria?
		% de morosidad en el pago del servicio de agua
	Desarrollo Social	Índice de Desarrollo Social
Índice de Desarrollo Social (IDS) en MIDEPLAN		
Educación	Capacitaciones	¿Posee distinción de bandera azul ecológica (en la comunidad, microcuencas y municipalidades)?
		¿Los operadores han desarrollado programas de educación ambiental para la comunidad y los imparten regularmente (una vez al año)? Si / No
Riesgo por Eventos Naturales	Eventos Naturales	¿Posee su acueducto riesgo de inundación?
		¿Posee su acueducto riesgo de deslizamientos?
		¿Posee su acueducto riesgos volcánicos?
		¿Su acueducto está ubicado zonas sísmicas?

La figura 5 muestra las fichas de metadatos que se construyeron para cada uno de los indicadores.



FICHA IRSAS		
Nombre:	Separan las aguas grises del agua pluvial	ID GAR-2
Descripción:	Determina si en la comunidad se cuenta con separación de las aguas grises y el agua de lluvia	
Categoría	Gestión de aguas residuales	
Unidad de Medida	Si, No (1, 0)	
Frecuencia de Medición	Anual	
Fuente de datos	AyA	
Url		
Responsable	AyA	
Periodo		
Fórmula	Dicotómica	
Observaciones		

Figura 5. Ejemplo de ficha por indicador.

Adicionalmente, se acordó realizar la medición de los indicadores anualmente para obtener un IRSSAS por distrito.

Identificación del riesgo en las ASADAs seleccionadas

Con los resultados de la ecuación 1 aplicados a la muestra de estudio de 97 ASADAs, y mediante análisis estadísticos y visitas de campo, se definieron los ámbitos de clasificación del riesgo que se muestran en el cuadro 4, estas clasificaciones se asignaron geográficamente por distrito. Adicionalmente, los investigadores con base en las corroboración de la información en el campo, definieron el significado para cada nivel de riesgo, de esta forma los encargados de las ASADAs, funcionarios públicos de instituciones rectoras, público en general, pueden obtener retroalimentación útil, concisa para mejorar su gestión o informarse.

La unidad geográfica es el distrito, la forma que se representa el índice calculado, es asignándole un color según lo indicado en el cuadro 4.

A continuación, se muestra un ejemplo del mapa generado al aplicar el cálculo para obtener los IRSSAS (figura 6) por distrito, en el mismo se puede observar el riesgo asociado, cada ASADA está georreferenciada y se muestra como una gota de color azul.

Cuadro 4. Descripción de la categoría del riesgo asociado al IRSSAS.

Clasificación de riesgo	IRSSAS %	Color	Significado
Muy bajo	<47	Azul 	La gestión del servicio de agua y del saneamiento es sostenible. Es necesario para mantener el valor del indicador, que se continúen implementando mejoras para disminuir aún más el riesgo.
Bajo	[47-57]	Celeste 	La vigilancia estricta en el sistema debe aplicarse con el fin de mantener la sostenibilidad en la prestación del servicio de agua y saneamiento. Es importante implementar mejoras en los subcomponentes que sobrepasen el 47%.
Medio	[58-67]	Verde 	La gestión de la prestación del servicio de agua y saneamiento es regular. Debe prestarse especial atención a los subcomponentes con mayor porcentaje de riesgo e implementar medidas correctivas a la brevedad.
Alto	[68-77]	Amarillo 	El riesgo alto muestra una fragilidad del sistema servicio de agua y saneamiento, es muy importante que se revisen con detalle cada componente y subcomponente del sistema para llevar a cabo las medidas correctivas de forma inmediata de manera tal que se reduzca el riesgo.
Muy alto	> 77	Rojo 	La prestación del servicio de agua y saneamiento es insostenible en el tiempo. Presenta un grave riesgo de no poder brindarlo en un corto plazo. Se deben revisar cada uno de los componentes y subcomponentes, para tomar las medidas necesarias urgentes y reducir el riesgo.

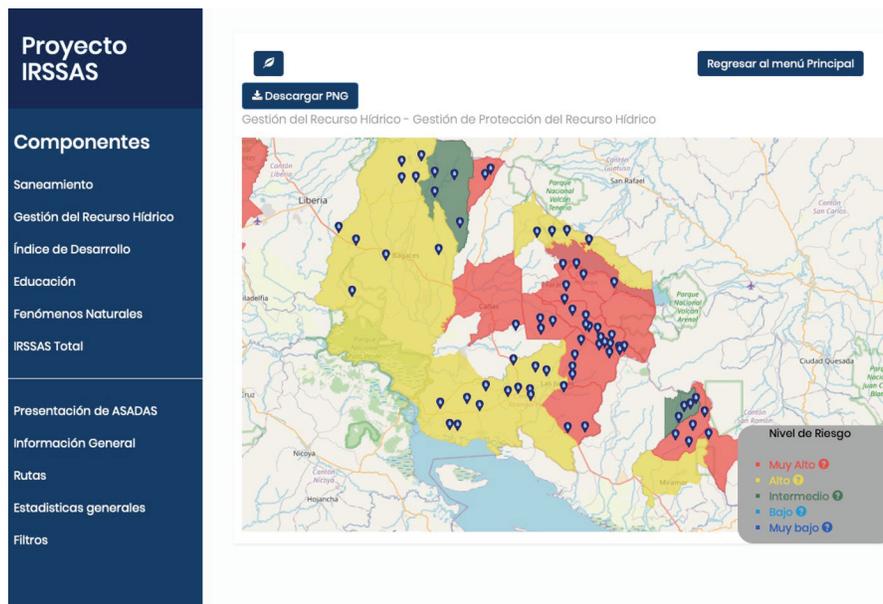


Figura 6. Fotografía del mapa generado por el software que calcula el IRSSAS.

Los resultados del IRSSAS para la muestra de 97 ASADAs, se muestran en el cuadro 5 .

Cuadro 5. Clasificación del riesgo en la muestra seleccionada.

Clasificación riesgo según IRSSAS	Cantidad de ASADAs	Porcentaje%
Muy alto	4	4
Alto	30	31
Intermedio	45	46
Bajo	15	15
Muy bajo	3	3
TOTALES	97	100

Fuente: Resultados numéricos generados por la aplicación de la ecuación 1. Muestra de 97 ASADAs ubicadas en Guanacaste, Puntarenas y Cartago.

Discusión y conclusiones

El modelo de administración de agua mediante ASADAs presenta graves vulnerabilidades y es insostenible en el tiempo. Las amenazas sobre las ASADAs ya habían sido evidenciadas desde el 2004 [15], a la fecha aún se mantienen y se han profundizado con los años, como se mostró en el cuadro 2.

Los investigadores analizaron las vulnerabilidades y amenazas que mayormente inciden en la prestación del servicio y saneamiento y las clasificaron en cinco grandes bloques, denominados componentes.

El primero es el saneamiento ambiental, las ASADAs que podrán continuar prestando sus servicios en el tiempo, deben poner especial énfasis en controlar aquellas variables que afecten la calidad del agua, dentro de las cuales está la contaminación por aguas servidas, residuales, provenientes de actividades agroindustriales y residuos sólidos.

El segundo componente que afecta la prestación del servicio de agua y saneamiento es la gestión del recurso hídrico, y muy especialmente la gestión del agua potable en el acueducto (calidad, continuidad, cantidad) y la gestión administrativa y financiera (recursos para su funcionamiento e inversión en mejoras). Algunas de las fuentes que abastecen los acueductos están en manos privadas. Resulta de vital importancia garantizar la protección de las fuentes, con delimitación física para el acceso de personas y animales. Los acueductos rurales en el país capturan el agua desde manantiales, pozos y agua superficiales provenientes de la parte alta de la cuenca, la calidad del agua generalmente es muy buena, razón por la cual, el mayor riesgo se presenta en la capacidad de las ASADAs para evitar la contaminación en la fuente y el tratamiento de desinfección que realicen antes de su distribución.

Las ASADAs que no tienen la capacidad técnica ni tampoco los recursos para garantizar el proceso eficiente de desinfección presentan altos riesgos. Esto se suma a las dificultades inherentes de la escases del agua. Las ASADAs muy pequeñas, que administran menos de 300 abonados (76 % de las ASADAs del país), facturan en promedio montos inferiores a 1,200,000 [4], un equivalente a 2100 dólares mensuales, con lo cual es imposible contar con disponibilidad financiera para invertir en operación mucho menos en mejoras de los acueductos.

Ante este panorama, es comprensible que las ASADAs no logren contratar sus propios estudios hidrogeológicos, los que existen a la fecha han sido el resultado de contrataciones directas por medio de AyA [12], igual situación ocurre con los planes de riesgo, educación ambiental y

adaptación al cambio climático. Las ASADAs en el país sobreviven el día a día, experimentando grandes riesgos asociados a situaciones de emergencia como desastres naturales, o alguna epidemia, como es el caso del COVID19, donde se ha observado una importante disminución de ingresos por aumento de morosidad. Es importante indicar que la existencia de muchas ASADAs, ha sido posible, gracias a las donaciones por parte del gobierno o ayudas externas, con las cuales se construyó el acueducto, sin embargo, muchas ASADAs, principalmente las más pequeñas, no son autosostenibles en el tiempo, por lo cual el riesgo en la prestación del servicio es muy alto.

El tercer componente que debe considerarse para garantizar la sostenibilidad de las ASADAs, es la capacidad de los habitantes para contribuir con el desarrollo del acueducto, por esta razón, los investigadores incorporaron el indicador desarrollado por MIDEPLAN [41] [38], que es compuesto, e integra factores socioeconómicos.

La educación ambiental está ligada con el uso sostenible del recurso, la conciencia para el manejo adecuado de los residuos sólidos y la responsabilidad social de evitar contaminación por aguas servidas, por tal razón, se incorporó este componente dentro de los aspectos a evaluar para la construcción del índice.

Finalmente, el quinto componente del IRSSAS, se relaciona con los eventos naturales, como inundaciones, deslizamientos, fallas sísmicas y volcanes, aspectos incontrolables pero que deben tenerse planes de contingencia ante tales.

En Costa Rica existen muchas estadísticas ambientales, que brindan una visión general del país, también se disponen de índices de primera y segunda generación de carácter descriptivo de la situación ambiental. Para lograr la sustentabilidad es necesario diseñar índices de tercera generación.

La construcción de un índice de tercera generación permite la planificación entre diversos sectores socio productivos. Esta investigación ha priorizado el sector de agua y saneamiento, debido a su elevada vulnerabilidad ante un escenario del cambio climático y el aumento de población.

El IRSSAS está concebido como un indicador sistémico que combina la dimensión física-biológica, social, económica y política, fue construido utilizando la lógica usada en la construcción de la huella ecológica [78], las guías metodológicas en la construcción de indicadores [55], la construcción de indicadores del uso de agua [35] y aplicando los parámetros usados por el MIDEPLAN para el manejo del territorio.

Su función es monitorear la calidad sin necesidad de realizar continuamente análisis físicoquímicos, continuidad y cantidad del agua potable para las poblaciones rurales, además, garantizar el mantenimiento de un ecosistema saludable para poder ofrecer disponibilidad de agua para la población actual y futura.

La distribución de agua potable y el saneamiento en Costa Rica presenta serios riesgos a mediano y largo plazo, debido a las diferentes debilidades del sector. La falta de herramientas de planificación orientadas a priorizar la inversión en infraestructura de recolección-distribución de agua potable, tratamiento de aguas negras residuos sólidos, protección de las fuentes de agua, prevención ante el cambio climático y medidas de mitigación ante las condiciones de vulnerabilidad asociadas al territorio.

Del análisis de los resultados obtenidos mediante la aplicación del índice IRSSAS se evidencia una situación negativa relacionada con la sustentabilidad en la prestación del servicio de agua y saneamiento, pues el 92 % de las ASADAs se clasifican en riesgos de intermedio hacia arriba.

Ante el cambio de los patrones de lluvia, que aumentan los desastres naturales y la oferta del agua, sumando al aumento de población, resulta necesario enfocar los esfuerzos en apoyar a los prestadores de agua en las zonas rurales, ya que los mismos presentan amenazas y vulnerabilidades multifactoriales, éstas no han sido subsanadas en las últimas décadas.

La aplicación de este indicador evidencia nuevamente el riesgo inminente y puede servir como herramienta de planificación para priorizar inversiones y apoyar efectivamente a las ASADAs.

Referencias

- [1] Acueductos y Alcantarillados, «La Gaceta, N 150, viernes 5 de agosto 2012. Reglamento de las Asociaciones Administradoras de Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Comunales,» 2005. [En línea]. Available: <https://www.aya.go.cr/ASADAS/Leyes%20y%20reglamentos/REGLAMENTO%20DE%20ASADAS.pdf>.
- [2] Gobierno de Costa Rica, *Ley 2726*, San José: La Gaceta, 1961.
- [3] ARESEP, «Cobertura del servicio de acueducto por operador, zona y tipo de tubería 2017,» 2017. [En línea]. Available: https://aresep.go.cr/agua-potable/index.php?option=com_content&view=article&id=2471&catid=106.
- [4] Acueductos y Alcantarillados, «Diagnostico Nacional de Entes Operadores de Agua en Zonas Rurales,» 2020. [En línea]. Available: [https://www.aya.go.cr/ASADAS/Documents/Diagnóstico%20Nacional%20de%20Entes%20Operadores%20\(Levantamiento%202017-2020\).pdf](https://www.aya.go.cr/ASADAS/Documents/Diagnóstico%20Nacional%20de%20Entes%20Operadores%20(Levantamiento%202017-2020).pdf).
- [5] A. Navarro-Garro, F. Araya-Rodriguez, D. Pérez-Murillo, C. Moreira-Segura y M. Estrada-Ugalde, «Vulnerabilidad de los sistemas de acueductos rurales: cómo identificarla,» *Tecnología en marcha*, vol. 26, n° 3, pp. 63-74, 2013.
- [6] M. González-Pérez y F. Jimenez, «Gestión del agua para consumo humano de las asociaciones administradoras de acueductos y alcantarillados (ASADAs) de Buenos Aires y de Suerre, Área de conservación Tortuguero, Costa Rica,» *Aqua-Lac*, vol. 5, n° 1, pp. 1-21, 2013.
- [7] Repositorio Universidad Nacional de Costa Rica, «Elaboración de un plan de seguridad del agua para la ASADA Rincón de Zaragoza,» 2018. [En línea]. Available: https://repositorio.una.ac.cr/bitstream/handle/11056/15115/TFG_Ana%20Gabriela%20Chac%c3%b3n%20Herrera.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [8] Repositorio Universidad Nacional de Costa Rica, «Herramienta para la mejora de la gestión físico-sanitaria de 10 Asadas de la región Pacífico Central de Costa Rica,» 2017. [En línea]. Available: <https://repositorio.una.ac.cr/bitstream/handle/11056/13659/PROYECTO%20DE%20GRADUACI%c3%93N.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [9] A. Suárez-Serrano, A. Baldioceda-Garro, G. Durán-Sanabria, J. Rojas-Conejo, D. Rojas-Cantillano y A. Guillén-Watson, «Seguridad hídrica: Gestión del agua en comunidades rurales del Pacífico Norte de Costa Rica,» *Revista de Ciencias Ambientales. Tropical Journal of Environmental Sciences*, vol. 53, n° 2, 2019.
- [10] Repositorio Institucional TEC, «Evaluación general del sistema de agua potable y aspectos básicos de saneamiento de la ASADA Agrimagá, ubicada en el cantón de Guácimo, en Limón, influenciado por el Acuífero Guácimo-Pococi,» 2018. [En línea]. Available: https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10092/evaluacion_general_sistema_agua_potable_aspectos_basicos_saneamiento_asada.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [11] Repositorio Universidad Nacional, «Plan de seguridad del agua de la ASADA las Vueltas, Parrita, Puntarenas,» 2019. [En línea]. Available: <http://repositorio.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/80372/TFG%2c%20Natalia%20Garcia%20Campos..pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [12] Repositorio institucional de Acueductos y Alcantarillados, «Estudio hidrogeológico para la determinación de la zona de protección absoluta y zona de recarga de las nacientes de Desamparaditos, Puriscal, Costa Rica,» 2018. [En línea]. Available: <http://dspace-aya.eastus.cloudapp.azure.com:8080/xmlui/handle/aya/164>.
- [13] Repositorio Institucional Acueductos y Alcantarillados, «Estudio hidrogeológico, Determinación de la zona de protección de la naciente Asada San Martín de León Cortes.,» 2015. [En línea]. Available: <http://dspace-aya.eastus.cloudapp.azure.com:8080/xmlui/bitstream/handle/aya/185/CEDO%20AyA%20AD%205200.pdf?sequence=1>.
- [14] Kerwa, Universidad de Costa Rica, «Análisis de vulnerabilidad ambiental por deslizamiento en la microcuenca del río Tarbacia, canton de Mora, República de Costa Rica,» 2019. [En línea]. Available: http://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/80292/Tesis_Carbajal_Vald%c3%a9s.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

- [15] Repositorio institucional AyA, «Estudio de Aspectos Institucionales de desarrollo de los acueductos Rurales en Costa Rica, Lockwood, H.» 2004. [En línea]. Available: <http://dspace-aya.eastus.cloudapp.azure.com:8080/xmlui/bitstream/handle/aya/335/CEDO%20AyA%201900.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [16] Repositorio Acueductos y Alcantarillados, «Lo intangible de los planes de seguridad del agua,» 2011. [En línea]. Available: <https://www.aya.go.cr/centroDocumetacion/catalogoGeneral/Lo%20intangible%20de%20los%20planes%20de%20seguridad%20del%20agua.pdf>.
- [17] C. R. Diagnóstico técnico y administrativo de cinco ASADAs localizadas dentro del corredor biológico Garcimuñiz. Provincia Alajuela, «Repositorio Universidad Tecnica Nacional, UTN,» 2016. [En línea]. Available: <http://repositorio.utn.ac.cr/handle/123456789/128>.
- [18] Repositorio Universidad Técnica Nacional, (UTN), «IV Encuentro Nacional de Asociatividad en la Gestión Comunitaria del Agua,» 2019. [En línea]. Available: <http://repositorio.utn.ac.cr/handle/123456789/356>.
- [19] Instituto Meteorológico Nacional, «Mejoramiento de las capacidades nacionales para la evaluación de la vulnerabilidad y adaptación del sistema hídrico al cambio climático en Costa Rica, como mecanismo para disminuir el riesgo al cambio climático y aumentar el índice de desarrollo humano,» 2012. [En línea]. Available: <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/publicaciones/AdaReHiCRCC/offline/download.pdf>.
- [20] Climate Expert ORG, «Riesgo futuro del sector hídrico ante el cambio climático,» 2012. [En línea]. Available: https://www.climate-expert.org/fileadmin/user_upload/PDF/Costa_Rica/riesgo_futuro.pdf.
- [21] Repositorio Universidad Estatal a Distancia (UNED), «Plan de Acción de la estrategia Nacional de Cambio Climático,» 2009. [En línea]. Available: <https://www.uned.ac.cr/extencion/images/ifcmdl/amas/recursos/cambio-climatico/plan-de-accion-estrategia-nacional-cambio-climatico.pdf>.
- [22] Gobierno de Costa Rica, «Política Nacional de adaptación al cambio climático de Costa,» 2018. [En línea]. Available: http://www.pgrweb.go.cr/DocsDescargar/Normas/No%20DE-41091/Version1/Politica_ADAPTACION_24_abril.pdf.
- [23] Ministerio de Ambiente y Energía, «Plan Nacional de Descarbonización,» 2018. [En línea]. Available: http://www.pgrweb.go.cr/DocsDescargar/Normas/No%20DE-41091/Version1/Politica_ADAPTACION_24_abril.pdf.
- [24] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), «Indicadores ambientales INEC,» 2010-2016. [En línea]. Available: <https://www.inec.cr/medio-ambiente/indicadores-ambientales>.
- [25] Universidad de Costa Rica, «Costa Rica salda una deuda pendiente: indicadores ambientales ya son de acceso público,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2019/07/04/costa-rica-salda-una-deuda-pendiente-indicadores-ambientales-ya-son-de-acceso-publico.html>.
- [26] Ministerio de Ambiente y Energía, «Sistema de Consulta de indicadores para el SINIA,» [En línea]. Available: <http://sinia.go.cr/estadistica/>. [Último acceso: 2020].
- [27] Dirección de Aguas del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), «Estadísticas de agua Costa Rica,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.da.go.cr/estadisticas-e-indicadores-del-agua/>.
- [28] CEPAL, «Avance de estadísticas ambientales en Costa Rica,» 2020. [En línea]. Available: https://www.cepal.org/sites/default/files/courses/files/2_2-avance-ea-costa-rica_miniae.pdf.
- [29] CONARE, «Programa Estado de la Nación,» Sistema Universitario Estatal de Costa Rica, 2020. [En línea]. Available: <https://estadonacion.or.cr>.
- [30] Gobierno de Costa Rica, «Estado del Ambiente en Costa Rica,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.presidencia.go.cr/comunicados/2018/02/costa-rica-presenta-el-primer-informe-oficial-del-estado-del-ambiente/>.
- [31] Banco Central de Costa Rica, «Sistema de Contabilidad Ambiental,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.bccr.fi.cr/seccion-cuentas-ambientales/cuentas-ambientales>.
- [32] Ministerio de Salud, «Costa Rica recibe aval de la OCDE en materia ambiental,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/noticias/noticias-2019/1465-costa-rica-recibe-aval-de-la-ocde-en-materia-ambiental>.
- [33] K. Lezzaik, A. Milewski y J. Mullen, «The groundwater risk index: Development and application in the Middle East and North Africa Region,» *Science of the Total Environment*, Vols. 1 de 2628-629, pp. 1149-1164, 2018.
- [34] B. R, A survey of composite indices measuring country performance 2008, New York: United Nations Development Programme, 2008.
- [35] S. Sandoval-Solis y C. McKinney, «Sustainability Index for Water Resources Planning and Management,» *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 137, n° 5, 2011.

- [36] J. Ganoulis, «Integrated Risk Analysis for sustainable water resources management,» de *Comparative Risk Assessment and Environmental Decision Making. Nato Science Series: IV Earth and Environmental Sciences*, vol. 38, Springer, Dordrech, 2004, pp. 275-286.
- [37] A. Sarang, A. Vahedi y A. Shamsai, «How to Quantify Sustainable Development: A Risk-Based Approach to Water Quality Management,» *Environmental Management*, vol. 41, pp. 200-220, 2008.
- [38] Ministerio de Planificación, Costa Rica, «Índice de desarrollo social,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.mideplan.go.cr/indice-desarrollo-social>.
- [39] Contraloría General de la República, Costa Rica, «Sistema Integrado de Información Municipal,» 2018, [En línea]. Available: <https://cgrweb.cgr.go.cr/apex/f?p=142:8:0:>.
- [40] Construcción de indicadores ambientales, «Repositorio de la CEPAL,» 2014. [En línea]. Available: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/5502/1/S0900307_es.pdf.
- [41] Ministerio de Planificación MIDEPLAN, «Índice de Desarrollo Social,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.mideplan.go.cr/indice-desarrollo-social>.
- [42] Ministerio de Salud, «Indicadores del Ministerio de Salud,» 2020, [En línea]. Available: <https://www.ministerio-desalud.go.cr/index.php/acceso-a-sistemas-de-informacion>.
- [43] Instituto Nacional de Fomento Municipal, «Capacitaciones,» 2020, [En línea]. Available: http://www.ifam.go.cr/?page_id=1689.
- [44] Contraloría General de la República, «Índice de Gestión Municipal,» 2019, [En línea]. Available: <https://cgrfiles.cgr.go.cr/publico/docsweb/documentos/publicaciones-cgr/igm/2018/igm-2018.pdf>.
- [45] D. Mora, V. Mata y C. Portuguez, «Agua para consumo y saneamiento, situación de Costa Rica en el contexto de las Américas, 1961-2011,» Mayo 2012. [En línea]. Available: http://www.paho.org/cor/index.php?option=com_docman&view=download&category_slug=salud-y-ambiente&alias=219-agua-para-consumo-y-saneamiento-situacion-de-costa-rica-en-el-contexto-de-las-americas-1960-2011&Itemid=222.
- [46] Comisión Nacional de prevención del riesgo y atención de Emergencias CNE, «Mapas de Amenazas,» 2020. [En línea]. Available: https://www.cne.go.cr/reduccion_riesgo/mapas_amenazas/index.aspx.
- [47] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, Costa Rica, «Resultados de la Encuesta Nacional de Hogares,» Julio 2016. [En línea]. Available: <http://sistemas.inec.cr/pad4/index.php/catalog/165/datafile/F2/V588>.
- [48] A. Gain, C. Giupponi y Y. Wada, «Measuring global water security towards sustainable development goals,» *Environmental research letters*, vol. 11, n° 12, 2016.
- [49] Instituto Geográfico Nacional, «Sistema Nacional Infraestructura Nacional de Datos Espaciales de Costa Rica,» Gobierno de Costa Rica, 2020. [En línea]. Available: http://www.snitcr.go.cr/instituto_geografico_nacional.
- [50] S. Soto-Córdoba, L. Gavira-Montoya y M. Pino-Gomez, «Estudio de caso: disposición de las aguas residuales domésticas en zonas rurales de Costa Rica,» *Ambiente e Sociedade*, vol. 22, pp. 1-20, 2019.
- [51] S. Soto-Córdoba, L. Gavira-Montoya y M. Pino-Gomez, «Situación de la gestión del agua potable en las zonas rurales de la provincia de Cartago, Costa Rica,» *Tecnología en Marcha*, pp. 67-76, 2016.
- [52] Reglamento para la calidad del agua N 38924-S, «Sistema Costarricense de información jurídica,» 2015. [En línea]. Available: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=80047.
- [53] Formulario Unificado AyA, «Acueductos y Alcantarillados,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.aya.go.cr/ASADAS/documentacionAsadas/FORMULARIO%20UNIFICADO.pdf>.
- [54] Metodologías para evaluar la amenaza, «Repositorio Gestión del Riesgo, Colombia,» 2018. [En línea]. Available: https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/27226/Metodologias_evaluar_amenaza_ciclones%20tropicales.pdf?sequence=4&isAllowed=y.
- [55] A. Schuschny y H. Soto, «Guía metodológica diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible,» Naciones Unidas, Santiago de Chile, 2009.
- [56] «Metodología Delphi,» 2020. [En línea]. Available: <https://research.phoenix.edu/content/research-methodology-group/delphi-method> .
- [57] Repositorio ITCR, «Evaluación de la gestión de la ASADA COOPEROSALES, San Nicolás, Cartago, desde una perspectiva del uso sostenible del recurso hídrico,» 2016. [En línea]. Available: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/7040>.

- [58] Repositorio TEC, «Evaluación de la gestión de la ASADA de Quebradilla, Quebradilla, Cartago, desde una perspectiva del uso sostenible del recurso hídrico,» 2016. [En línea]. Available: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/7016>.
- [59] Repositorio TEC, «Evaluación de la gestión de la ASADA de Guatuso, San Isidro, El Guarco, desde una perspectiva del uso sostenible del recurso hídrico,» 2016. [En línea]. Available: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/7015>.
- [60] Repositorio TEC, «Evaluación de la gestión de la ASADA de Higuito, San Isidro, El Guarco, desde una perspectiva del uso sostenible del recurso hídrico,» 2016. [En línea]. Available: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/7017>.
- [61] Repositorio Institucional TEC, «Evaluación de la gestión de la ASADA de Guatuso, San Isidro, El Guarco, desde una perspectiva del uso sostenible del recurso hídrico,» [En línea]. Available: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/7015>.
- [62] Repositorio ITCR, «Evaluación de la gestión de la ASADA de Cañón-Macho Gaff Damita, San Isidro, El Guarco, desde una perspectiva del uso sostenible del recurso hídrico,» [En línea]. Available: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/7014>.
- [63] Repositorio ITCR, «Evaluación de la gestión de la ASADA de Cot, Cot, Oreamuno, desde una perspectiva del uso sostenible del recurso hídrico,» 2016. [En línea]. Available: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/7011>.
- [64] Repositorio TEC, «Evaluación de la gestión de la ASADA de Paso Ancho y Boqueron, Cipreses, Oreamuno, desde una perspectiva del uso sostenible del recurso hídrico, » 2016. [En línea]. Available: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/7010>.
- [65] Repositorio TEC, «Evaluación de la gestión de la ASADA de Potrero Cerrado, Potrero Cerrado, Oreamuno, desde una perspectiva del uso sostenible del recurso hídrico,» 2016. [En línea]. Available: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/7009>.
- [66] Repositorio TEC, «Evaluación de la gestión de la ASADA de San Pablo, Santa Rosa, Oreamuno, desde una perspectiva del uso sostenible del recurso hídrico,» 2016. [En línea]. Available: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/7006>.
- [67] Repositorio TEC, «Evaluación de la gestión de la ASADA de Santa Rosa, Santa Rosa, Oreamuno, desde una perspectiva del uso sostenible del recurso hídrico,» 2016. [En línea]. Available: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/7008>.
- [68] Repositorio ITCR, «Evaluación de la gestión de la ASADA de El Yas, Santiago, Paraíso, desde una perspectiva del uso sostenible del recurso hídrico,» 2016. [En línea]. Available: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/7007>.
- [69] Repositorio del ITCR, «Evaluación de la gestión de la ASADA del Palomo, Orosí, Paraíso, desde una perspectiva del uso sostenible del recurso hídrico,» 2016. [En línea]. Available: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/7005>.
- [70] Repositorio TEC, «Evaluación de la gestión de la ASADA de Río Macho, Orosi, Paraíso, desde una perspectiva del uso sostenible del recurso hídrico,» 2016. [En línea]. Available: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/7003>.
- [71] Repositorio TEC, «Evaluación de la gestión de la ASADA San Jerónimo, Cachí, Paraíso, desde una perspectiva del uso sostenible del recurso hídrico,» 2016. [En línea]. Available: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/7002>.
- [72] Repositorio TEC, «EVALUACIÓN DE LA GESTIÓN DE LA ASADA DE SANTIAGO, SANTIAGO, PARAÍSO, DESDE UNA PERSPECTIVA DEL USO SOSTENIBLE DEL RECURSO HÍDRICO,» 2017. [En línea]. Available: https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/7001/17%20santiago_revisado.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [73] Repositorio TEC, «Evaluación de la gestión de la ASADA de San Vicente, San Rafael, La Unión, desde una perspectiva del uso sostenible del recurso hídrico, » 2016. [En línea]. Available: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/7012>.
- [74] Repositorio ITCR, «Evaluación de la gestión de la ASADA de Alto Varas, La Isabel, Turrialba, desde una perspectiva del uso sostenible del recurso hídrico,» 2016. [En línea]. Available: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/7024>.
- [75] Repositorio TEC, «Evaluación de la gestión de la ASADA de Jicotea, Tayutic, Turrialba, desde una perspectiva del uso sostenible del recurso hídrico,» 2016. [En línea]. Available: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/7004>.

- [76] Repositorio TEC, «Evaluación de la gestión de la ASADA de Santa Cristina, La Suiza, Turrialba, desde una perspectiva del uso sostenible del recurso hídrico,» 2016. [En línea]. Available: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/7000>.
- [77] Repositorio TEC, «Evaluación de la gestión de la ASADA de Santa Cruz, Santa Cruz, Turrialba, desde una perspectiva del uso sostenible del recurso hídrico ,» 2016. [En línea]. Available: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/7023>.
- [78] M. Wackernagel y W. Rees, «Nuestra huella ecológica: Reduciendo el impacto humano sobre la Tierra,,» *Polis, Revista Latinoamericana*, 2003.

Metodologías para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero: descripción del proyecto de control en una industria productora de cemento

Methodologies for the calculation of greenhouse gas emissions: description of the control project in a cement-producing Industry

María Concepción Martínez-Rodríguez¹,
Lorena Elizabeth Campos-Villegas², Jesús Castillo-Monroy³

Fecha de recepción: 25 de julio de 2020
Fecha de aprobación: 3 de octubre de 2020

Martínez-Rodríguez, M.C; Campos-Villegas, L.E; Castillo-Monroy, J. Metodologías para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero: descripción del proyecto de control en una industria productora de cemento. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-3 Julio-Setiembre 2021. Pág 177-189.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5313>

- 1 Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo. México. Correos electrónicos: mcmartinezr@ipn.mx; mconcepcionmr@yahoo.com.mx
 <https://orcid.org/0000-0003-3094-5411>
- 2 Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo. México. Correo electrónico: lor_ca2003@yahoo.com.mx
 <https://orcid.org/0000-0001-7248-9296>
- 3 Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo. México. Correo electrónico: josjes.castillo@hotmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-7482-2259>



Palabras clave

Políticas públicas ambientales; cambio climático; industria cementera; gases de efecto invernadero; auditoría.

Resumen

La industria cementera global, es responsable de aproximadamente el 5 % del total de emisiones de CO₂ en el mundo, como resultado de las reacciones químicas en la producción de clinker, el consumo de combustible, el uso de electricidad, el transporte de materias primas y productos terminados. El objetivo general de la presente investigación es proporcionar las bases metodológicas de preparación del proyecto de control de emisiones con vista a una auditoría inicial para Gases de Efecto Invernadero (GEI) en una Industria del sector cemento con la finalidad de identificar el nivel de gestión de sus sistemas y procesos para el cálculo de los GEI alcance 1 y 2 así como sugerir un procedimiento de cálculo de GEI que fortalezca los procesos de reporte de las emisiones GEI. Este trabajo se basó en la ISO 14064-2, relativa a la Especificación, a nivel de proyecto, para la cuantificación, el seguimiento y la base para definir el informe de la reducción de emisiones o el aumento en las remociones de gases de efecto invernadero. Las principales variables a considerar en la validación del inventario de emisiones de GEI que se sugiere considerar en el marco de la auditoría teniendo en primer nivel; de fijar al interior de la empresa el año inicial o cero, e integrar un compendio histórico de al menos 5 años de las emisiones de GEI, estimar las emisiones por calcinación de materia prima, por uso de combustibles y producción de cemento.

Keywords

Environmental public policies; climate change; cement industry; greenhouse gases; audit.

Abstract

The global cement industry is responsible for approximately 5% of total CO₂ emissions in the world, as a result of chemical reactions in clinker production, fuel consumption, electricity use, transportation of raw materials and finished products. The general objective of this research is to provide the methodological bases for the preparation of the emission control project with a view to an initial audit for Greenhouse Gases (GHG) in a Cement industry in order to identify the management level of its systems and processes for calculating GHG scope 1 and 2 and suggest a GHG calculation procedure that strengthens the GHG emissions reporting processes. This work was based on the ISO 14064-2, regarding the Specification, at the project level, for the quantification, monitoring and the basis for defining the report of the reduction of emissions or the increase in greenhouse gas removals. The main variables to consider in the validation of the inventory of GHG emissions that are suggested will be considered in the framework of the audit taking first level; to set within the company the initial year or zero, and to integrate a historical compendium of at least 5 years of GHG emissions, to estimate emissions from calcination of raw material, by use of fuels and cement production.

Introducción

El cambio climático representa hoy día uno de los mayores desafíos a los que se enfrentan los países, los gobiernos, las empresas y la humanidad del siglo XXI, y uno de los principales factores que incide sobre este fenómeno es la generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) debido a las actividades inherentes a los procesos de producción. La acumulación de gases

de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera está provocando un aumento de la temperatura global (calentamiento global), que es extremadamente amenazante para la vida en la tierra, desde la revolución industrial, como consecuencia de la expansión industrial y la quema de combustibles fósiles, el nivel de GEI en la atmósfera aumentó sustancialmente y se espera que aumente aún más en el futuro. En comparación con 1750, las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera han aumentado de 280 a 410 ppmV, y esta tendencia se espera en las próximas décadas, resultando un aumento de temperatura de hasta 5.8°C. Entre diversos GEI, el CO₂ es el gas que más influye, considerándose como la causa inmediata del fenómeno del calentamiento global, por lo tanto, casi todos los estudios y esfuerzos para la disminución de la temperatura media mundial se está centrando en frenar las emisiones de CO₂ de diversas fuentes emisoras; los sectores industriales son las principales fuentes de producción de CO₂, en 2017, se liberaron 21.4 Gton CO₂ de este sector que indica el impacto dramático de tales procesos sobre el calentamiento global [1] [2].

En respuesta a este impacto global, es necesario contar con sistemas robustos de administración de las emisiones de GEI para identificar las oportunidades de ahorro en el consumo energético y al mismo tiempo reducir las emisiones de GEI.

Actualmente, para las compañías y organizaciones se han desarrollado metodologías para realizar su inventario y reporte de emisiones GEI “Corporativo” este contexto se refiere a que la metodología es aplicable tanto para organizaciones públicas como privadas.

Las herramientas de cálculo son el complemento del estándar y ayudan a las empresas a cuantificar las emisiones provenientes de actividades. El protocolo de GEI [3], es la herramienta más utilizada a nivel internacional. Derivado de este estándar se han generado diversas herramientas de cálculo sectoriales, para la industria química, cemento, hierro, papel, entre otros.

El desafío del cálculo o inventario de huella de carbono, requiere una metodología sistemática y confiable para cumplir con los principios que establece el protocolo de GEI, con un mínimo de requisitos estandarizados que garanticen la obtención de resultados con alto nivel de confianza y un robusto soporte estadístico que asegure el nivel de calidad que permita la validación y verificación del informe de emisiones presentado [4].

Elementos para identificar y calcular emisiones [5]: Identificar fuentes, Selección del método de cálculo, Recolectar datos y seleccionar factores de emisión, Aplicar herramientas de cálculo, Enviar datos a nivel Corporativo.

Ante el complejo sistema para medir la huella de carbono [2] [6], se ha visto la necesidad de hacer la verificación y la auditoría externa, por lo que surgieron estándares en el mercado para la revisión de los inventarios, como: PAS2050 [2] [7], ISAE3410 [8], así como la serie ISO14064 parte 1-3[2][9], relativas a las cuantificaciones, reportes, la validación y verificación de Emisiones. En el presente proyecto se utilizará la parte 2 para la descripción del proyecto de control de emisión GEI como una primera base para la auditoría en una industria cementera.

Como consecuencia de la toma de conciencia social con respecto a los GEI y la necesidad de reducir estas emisiones, en los últimos años las empresas y otras entidades reclaman cada vez más estrategias y acciones que permitan compensar el impacto ambiental derivado del uso energético en los procesos de producciones de bienes y servicios.

Actualmente, en México empresas que verifican sus emisiones de GEI por auditoría tradicional de cumplimiento ambiental son escasas en el marco industrial. De acuerdo con el programa GEI México [10], 6 empresas en 2015 participaron en un esquema de certificación de desempeño de carbono, por lo que han realizado una verificación por una tercera parte independiente de su reporte de emisiones de GEI.

La aprobación de la Ley General de Cambio Climático, ayuda a promover políticas e incentivos para reducir las emisiones de bióxido de carbono y el uso de combustibles de origen fósil y para impulsar las energías renovables.

¿Por qué la Industria de Cemento tiene el reto de administrar adecuadamente sus emisiones de GEI? Históricamente, el sector del cemento ha sido responsable de entre 5% y 9% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI). En 2010, se emitieron más de 2800 millones de toneladas de GEI de la industria, una cifra que corresponde al 9% de las emisiones globales de CO₂ [6][11]; con una producción anual de alrededor de 10 mil millones de toneladas en todo el mundo [12], siendo el cemento el producto de mayor consumo después del agua en todo el mundo, la producción de cemento es la más intensiva en energía y emisiones de la industria, sus características, físicas, las propiedades químicas y el proceso de fabricación han sido objeto de estudio durante mucho tiempo[6], actualmente se encuentra bajo presión para reducir las emisiones de GEI, sin embargo, reducir los GEI de la industria del cemento, no es una tarea fácil para países en vías de desarrollo [13].

El consumo per cápita se estima en 447 kg/hab y de acuerdo con la Federación Interamericana del Cemento (FICEM) [14], la producción mundial en 2009 fue de 3,033 millones de toneladas.

La industria cementera en un esquema global como resultado de las reacciones químicas en la producción de clinker, el consumo de combustible, el uso de electricidad y el transporte de materia primas y productos terminados representa un gran emisor de GEI [15] [6], esta industria proporciona soporte insustituible para el desarrollo sucesivo de otras industrias relacionadas, ya que el cemento es uno de los materiales de construcción más utilizados en el mundo, en ello radica también su importancia económica social [16].

En este contexto, tiene retos importantes la Industria Cementera en la administración de las emisiones de GEI. Actualmente a nivel global ha conformado una iniciativa global denominada: CSI (Cement Sustainable Initiative), que promueve al interior del sector cementero, la contabilidad y reporte de las emisiones de GEI, además de que estas emisiones sean auditadas por una tercera parte independiente [17].

México enfrentará retos importantes en el marco del cumplimiento de la Ley General de Cambio Climático, por tal razón, los programas de Auditoría Ambiental promovidos por la Procuraduría Federal de Protección Ambiental (PROFEPA), deberán crear sinergias para que los programas de auditoría ambiental consideren la administración de información no financiera como son las emisiones de GEI.

Metodología

Diseño del Proyecto de control GEI con base a ISO 14064-2 con visión a la auditoría en una Industria productora de cemento. Representa un elemento clave la auditoría de la huella de carbono para las empresas al considerar el marco de su desempeño ambiental. Garantizar un cálculo adecuado de las emisiones de GEI ayuda a las empresas a tener una mejor comprensión de la dimensión de sus emisiones, reconocer su potencial de ahorro de energéticos y establecer una base para la comparación y comunicación de los resultados alcanzados, tanto el interior como exterior [18].

En la práctica, la auditoría involucra la canalización del esfuerzo por parte del auditor hacia los datos y sistemas asociados que tengan en su calidad general.

La auditoría de las emisiones GEI, involucra la evaluación de los riesgos de discrepancias materiales en los datos reportados. Las discrepancias ocurren entre los datos reportados y los datos generados por la aplicación apropiada de los estándares y metodologías de cálculo de las emisiones.

Cuando se realiza la auditoría para una Industria productora de cemento se emite una conclusión sobre si la información del Reporte de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero se manifiesta de acuerdo al alcance, en particular para la industria del cemento es propuesto lo siguiente:

Alcance 1 (Emisiones Directas – Consumo de Combustible en obra y centro fijo)

Alcance 2 (Emisiones Indirectas- Asociadas a consumo de Energía Eléctrica en obra y centro fijo), y se encuentra libre de discrepancias en los cálculos, así como en los sistemas de reporte utilizados.

Por consiguiente, para el caso de la industria productora de cemento, es sumamente necesario homologar criterios de reporte para los GEI, contar con métodos claros y consistentes para evaluar, verificar y neutralizar las emisiones de sus productos a lo largo de su ciclo de vida.

Método

Como Metodología la norma ISO 14064 en la parte 2 en todos los aspectos de los proyectos de GEI proporciona una serie de cláusulas y facilita el seguimiento de los escenarios de línea base del proyecto contra el desempeño del proyecto y asegura que toda la información sea verificada y validada en el esquema de una auditoría ISO 14064-3.

En un resumen de la parte 2 de la ISO la metodología se sintetizaría en los elementos siguientes de la figura 1.



Figura 1. Resumen de la parte 2 de la ISO 14064-3. Fuente: [8].

Aquí presentamos la descripción del proyecto para una industria del cemento bajo la ISO 14064-2, esto es, describir el proyecto dando seguimiento a los requisitos de la norma, proporcionar elementos que sirvan como principio para determinar la línea base, los procedimientos de seguimiento listan algunos componentes para el diseño de los mismos, sugerir metodologías útiles para la industria del cemento en la cuantificación de emisiones, almacenamiento, reducciones de emisiones e incrementos de remociones GEI, un prototipo para el contenido del informe y puntos de base para validar el proyecto de GEI, dado que la segunda fase queda fuera del objeto del presente trabajo, ya que es la etapa en la cual el proyecto debe ejecutar e implementar cada uno de los procedimientos, dar seguimiento y verificar el desempeño, Auditar para someterlo a la evaluación por terceros para buscar la certificación final.

Objetivo general

Proporcionar las bases en una Industria del sector cemento para la gestión de sus sistemas y procesos para el cálculo de los GEI alcance 1 y 2 y sugerir un procedimiento de cálculo para fortalecer el mecanismo de reporte de las emisiones GEI con la finalidad de Auditar las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI).

Objetivos específicos

- Identificar las fuentes de emisión de GEI de la Industria en su proceso de producción de cemento
- Identificar los procesos de reporte de emisiones de GEI alcance 1 y 2.
- Identificar los principales factores de la gestión del cálculo de las emisiones de GEI que tienen mayor incidencia en la contabilidad y reporte

Identificar los parámetros de calidad y credibilidad del reporte de la huella de carbono

Identificación de variables

El punto inicial es el establecimiento de la línea base que requiere de acordar al interior de la empresa fijar el año inicial o cero, e integrar un compendio histórico de al menos 5 años de las emisiones de GEI de la Industria que sean representativos de la actividad anual promedio, además todos los años deberán poder tratarse bajo el mismo esquema de análisis, cálculo y reporte, posteriormente se identificarán las variables con las que se habrá de trabajar. Para ello los mapas de proceso y una Check-list sería una herramienta de mucha utilidad.

Diagrama Sagital

Estos son diagramas usados para representar mediante flechas relaciones entre las partes de un conjunto los elementos de entrada y de partida. El marco del cálculo de las emisiones de GEI en el proceso de producción de cemento, involucran diversas variables entrantes y de partida a considerar, como muestra la figura 2.

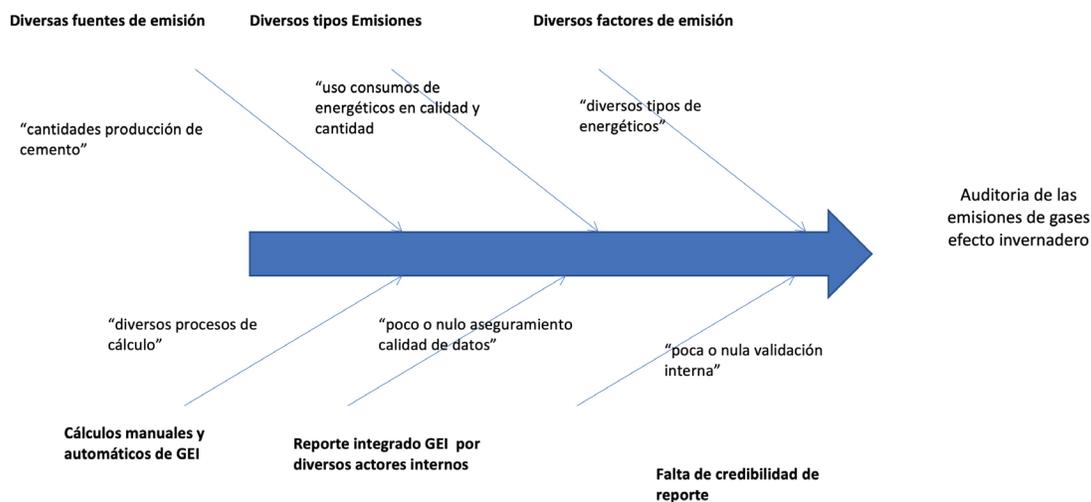


Figura 2. Diagrama Sagital del proceso de Auditoria de las emisiones de GEI..

La relación existente entre las variables permite seleccionar las esenciales para el proyecto, las variables consideradas permiten identificar los aspectos que son críticos en la administración de las emisiones de GEI, por lo que facilita el plantearse el "Problema" para la Auditoria de las emisiones GEI de una industria del Cemento en México.

En el contexto del cálculo de las emisiones de GEI para la industria de producción de cemento, se describe como se propone realizar la identificación, los procesos de reporte de emisiones de GEI y de los principales factores de la gestión del cálculo de las emisiones de GEI, manifestando las diversas variables involucradas a considerar en el cuadro 1.

Cuadro 1. Gestión en el cálculo de las emisiones de GEI de la industria del cemento.

Dominio	Indicadores	Definición teórica y operativa
Emisiones por calcinación	Producción de Clinker	<p>El principal componente del cemento es el clinker. Este material se produce a partir de materias primas naturales, como la caliza y la arcilla, que se muelen, homogeneizan e introducen en un horno rotatorio, donde se cuecen a una temperatura de 1 450°C, necesaria para formar el nuevo compuesto.</p> <p>Los principales componentes del clinker son los óxidos de calcio.</p> <p>Posteriormente, al clinker se le añade yeso y otros materiales (escoria de alto horno, cenizas volantes, puzolanas, caliza, etc...) y conjuntamente se trituran en un molino hasta formar un polvo fino: el cemento, silicio, aluminio y hierro.</p>
	CKD y Bypass Dusts que salen del sistema del horno	<p>CO₂ del polvo bypass o cement kiln dust (CKD) se liberan del sistema del horno, deben ser calculados de acuerdo a volúmenes relevantes de polvo y un factor de emisión.</p> <p><i>Bypass dust</i> es a menudo completamente calcinado. Por tanto las emisiones relacionadas al <i>bypass dust</i> deben ser calculadas usando el factor de emisión para el Clinker.</p>
Emisiones por combustibles de horno.	Consumo de combustible de horno	Son los combustibles fósiles utilizados en el horno.
	Poder calorífico de combustibles de horno	<p>El poder calorífico es la cantidad de energía que la unidad de masa de materia puede desprender al producirse una reacción química de oxidación (quedan excluidas las reacciones nucleares, no químicas, de fisión o fusión nuclear, ya que para ello se usa la fórmula $E=mc^2$).</p> <p>El poder calorífico expresa la energía máxima que puede liberar la unión química entre un combustible y el comburente y es igual a la energía que mantenía unidos los átomos en las moléculas de combustible (energía de enlace), menos la energía utilizada en la formación de nuevas moléculas en las materias (generalmente gases) formadas en la combustión. La magnitud del poder calorífico puede variar según como se mida. Según la forma de medir se utiliza la expresión poder calorífico superior (abreviadamente, PCS) y poder calorífico inferior (abreviadamente, PCI).</p>
Emisiones por combustibles fuera del horno	Consumo de combustible fuera del hornos	Es el combustible fósil que se usa fuera del horno tales como los que se emplean en autos propios de la compañía, de la planta, del cuarto de calentamiento, equipos para la preparación de componentes minerales.
	Poder calorífico de combustibles fuera del horno	Depende del tipo de hidrocarburo en consumo.
Producción de productos de cemento	Componentes minerales (MIC) usados para producir cementos Portland y mezclados	MIC-componenetes minerales naturales o artificiales con propiedades hidráulicas usadas como clinker o sustitutos de cemento
	Clinker vendido	

Herramientas a utilizar

Información para alimentar el procedimiento de cálculo

- Mapas de proceso son una fuente de información relevante para detectar los puntos críticos
- Inventarios de emisiones calculadas por parte de la empresa
- Registro interno de CKD y polvos que salen del sistema del horno
- Facturas de clinker comprado y vendido, MIC comprado por parte de la empresa
- Niveles de stock registrados de Clinker y MIC
- Facturas de Combustibles
- Registro de la administración del stock interno y registro de la supervisión.
- Datos proporcionados por el laboratorio interno del análisis de calidad de los combustibles en la empresa
- Datos de Poderes caloríficos de combustibles proporcionado por el proveedor que abastece los combustibles.
- Datos de los análisis realizados por el Laboratorio externo

Check-list para la estructuración de los procedimientos de evaluación y auditoría.

Para el cálculo o evaluación en este mismo contexto, el protocolo de GEI ofrece diferentes herramientas para estimar la cuantificación de las emisiones de GEI en la producción de cemento, tales como: *A cement-based tool requiring data only on annual cement production. Emissions are calculated using clinker: cement ratios* así como la herramienta de CSI (Cement Sustainability Initiative): *A clinker based tool suitable for when the amount of clinker consumed.*

De acuerdo con el Protocolo de GEI, en la definición de la calidad de los inventarios de emisiones, se destacan cinco principios de confiabilidad:

1. Relevancia, que está relacionado con los límites del inventario;
2. Integridad, todas las emisiones dentro de un límite de inventario definido requiere ser contabilizadas;
3. Consistencia, la aplicación permanente de la contabilidad, el límite de los inventarios y las metodologías esenciales.
4. Transparencia, se refiere al grado en qué la información relacionada a los procesos, procedimientos, suposiciones y limitaciones de los inventarios de GEI es presentada de manera clara, efectiva, neutral y comprensible, basada en documentación sólida, transparente y auditable; con precisión, para que los datos deban ser suficientemente precisos como para tomar decisiones.
5. La medición de GEI y las estimaciones o cálculos nunca deben presentar errores sistemáticos sobre o por debajo del valor real de las emisiones.

Etapa final la auditoría de la huella de carbono se realiza con base a los criterios de la ISO14064-3[8], la cual establece los requisitos para la verificación de los inventarios y proyectos relacionados a los GEI. Además, describe el proceso para la verificación de las emisiones de GEI, y especifica los mecanismos de planificación y procedimientos de evaluación, y las declaraciones que se realizan ya sea por la organización o del proyecto de GEI. El resumen de la propuesta metodológica de revisión por la auditoría basada en ISO 14064-3 consistiría en figura 3.

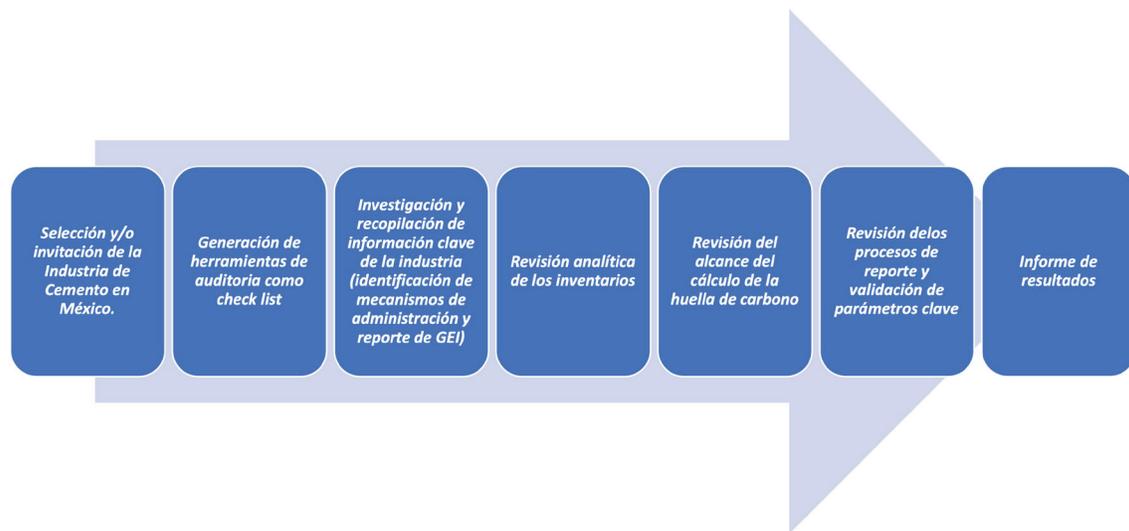


Figura 3. Propuesta metodológica de revisión por la auditoría basada en ISO 14064-3.

En la auditoría se evaluará el riesgo de discrepancia material de cada uno de los componentes, los procesos de recopilación y reporte de información GEI. Esta evaluación es utilizada para planificar y dirigir el proceso de verificación. Para evaluar este riesgo, se considerará los factores siguientes:

- La estructura de la organización y el enfoque de la organización utilizado para asignar la responsabilidad de monitorear y reportar las emisiones.
- El método de aproximación y el compromiso de la administración con el monitoreo reporte de GE.
- La complejidad de los sistemas para procesar la información.
- El estado de calibración y mantenimiento de medidores utilizados.
- La confiabilidad y disponibilidad de los datos ingresados.
- El desarrollo e implementación de políticas y procesos para el monitoreo y reporte.
- Las suposiciones y estimaciones aplicadas.

Resultados

La gestión de los resultados tiene fundamento en uno de los objetivos de mayor importancia del proyecto que es identificar los parámetros de calidad y credibilidad del reporte de la huella de carbono.

Además, a la hora de reportar las emisiones directas de los GEI es necesario hacerlo, con un alto grado de detalle para cada caso de GEI. Por otro lado, las emisiones de CO₂ por combustión de biomasa siempre se considera que deberán ser contabilizadas aparte, el reporte de las emisiones, se realiza en toneladas de CO₂-e, diferenciando cada categoría.

Como lograr integrar una gran cantidad de información sin que se escapen los detalles sugerimos una forma que puede ser estructurar una matriz con la información colectada por área, colocando el proceso y cada una de sus etapas Vs el consumo en movilidad y fuente fija con ello las emisiones correspondientes, lo que posteriormente facilita la elaboración de las hojas de cálculo, cuadro 2.

Cuadro 2. Propuesta de matriz de resultados.

Emisiones directas	Consumo de gas		Consumo de combustible (TJ)		Consumo Energía eléctrica (kWh)		Emisiones totales GEI
	Obra móvil	Centro fijo	Obra móvil	Centro fijo	Obra móvil	Centro fijo	
Proceso							
Emisiones Indirectas							
Proceso							

En la generación de datos de calidad cuando se tiene una evaluación cuantitativa se precisa del cálculo de incertidumbre siempre que sea técnica y económicamente viable, no obstante en el caso de las emisiones GEI esto no siempre será así. Por lo que de acuerdo con Unzalu [18], en la guía metodológica para la aplicación de la norma ISO-14064 propone que la organización puede establecer un enfoque cualitativo para analizar el impacto de la incertidumbre de los datos presentados en el informe de GEI y recomienda solo realizar el cálculo matemático de incertidumbre cuando:

- Existe un requisito legal por ejemplo aquellas organizaciones a las que les afecte el esquema europeo de comercio de emisiones (eUETS)
- El caso en cual el seguimiento de los datos de actividad con mayor peso en el cómputo total de GEI se realiza con contadores internos de la organización.

En la gestión de los resultados contar con un sistema de registro en el cual se capturen toda la información y cada uno de los datos usados en las memorias de cálculo es de suma importancia como apoyo para el sistema de registro en el anexo 1 se ha diseñado el prototipo para realizar la auditoría en el cual se podrá evidenciar el desempeño del proyecto de control para GEI y se facilitan pasos, como:

- Identificar de las brechas en el marco del cálculo de la huella de carbono y ejecución de un plan de acción para el cierre de brechas
- La Identificación del nivel de madurez de los procesos de la empresa con relación a la administración de la huella de carbono.
- Procedimiento (protocolo) de reporte de indicadores GEI para la homologación de los criterios de cálculo y reporte

Reporte de Indicadores de GEI

Conclusiones

Lo que aquí presentamos es una guía que toma la industria cementera como ejemplo para realizar una metodología para el cálculo de emisiones de gases efecto invernadero y de cómo puede inventariar esas emisiones, revisar sus procesos para encontrar las áreas de oportunidad, que desde un enfoque empresarial esto representan un ahorro económico donde a la larga la inversión inicial puede ayudar a disminuir sus costos de producción y contribuir a mitigar los daños al medio ambiente.

El cambio climático representa un reto para las industrias en general y no solo en México, en todo el mundo, las políticas públicas ambientales así como la legislación diseñada para atender este fenómeno resulta un diseño útil para que las empresas comiencen a cambiar sus procesos,

ya sea por reacción y cumplimiento al marco regulatorio o por el convencimiento cultural, al invertir en nuevas tecnologías, en auditorías, en cálculos de inventarios, ayudan al medio ambiente, a su entorno, y las transforma en empresas sustentables, y no solo forman parte de la larga fila de empresas maquilladas con verde.

Con este último objetivo de aportar criterios de valoración, que adicionalmente debieran ser estandarizados fue desarrollado el presente trabajo como un modelo, diseñado para la industria cementera, por ser una de las más contaminantes y mayor emisora de GEI, pero esta metodología podrá ser implementada en otro tipo de industrias, no obstante la implementación de la normatividad diseñada de manera internacional, requiere de adecuarse en México, de la contratación de expertos o bien el conocimiento mínimo de las normas, su interpretación y su implementación, así como el desarrollo de indicadores, el análisis de los procesos y la elección precisa de las variables será producto solo del entrenamiento y la mejora continua en cada industria.

Se considera que una de las principales dificultades para el diseño de los proyectos GEI se encuentra en la recopilación, la gestión de la información y control de todos aquellos datos, como los derivados del transporte de materia prima o salida de producto, dado que estos no los gestiona directamente el proyecto (Industria del cemento GEI) pero son fundamentales porque establecen los límites del sistema de cuantificación la frontera de dónde empezar y terminar el proyecto.

Agradecimientos

Trabajo derivado del proyecto de investigación SIP 20195759, patrocinado por el Instituto Politécnico Nacional.

Referencias

- [1] E. Benhelal, E. Shamsaei, M.I. Rashid. "Challenges against CO2 abatement strategies in cement industry: A review", *Journal of Environmental Sciences*, Volume 104, 2021, Pages 84-101, <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.11.020>
- [2] N.C.Onat, M. Kucukvar. "Carbon footprint of construction industry: A global review and supply chain analysis", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 124, 2020, 109783, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109783>
- [3] P. Wu, B. Xia, J. Pienaar, X. Zhao. "The past, present and future of carbon labelling for construction materials – A review" *Building and Environment*, Volume 77, 2014, Pages 160-168, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.023>
- [4] Gases de Efecto Invernadero (GEI). Available: <https://ghgprotocol.org/>
- [5] Green house gas protocol. Available: <https://ghgprotocol.org/guidance-0>
- [6] J. Cagiao, B. Gómez, J.L. Doménech, S. Gutiérrez Mainar, H.Gutiérrez Lanza. "Calculation of the corporate carbon footprint of the cement industry by the application of MC3 methodology". *Ecological Indicators*, Volume 11, Issue 6, 2011, Pages 1526-1540, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.02.013>
- [7] British Standards Institution, BSI . Guide to PAS 2050. How to assess the carbon footprint of goods and services. 2008
- [8] International Atandard on Assurance Engagements 3410 (ISAE 3410), Assurance engagements on greenhouse gas statements. Available: <http://www.ifac.org>
- [9] International Organization for Standarization. Greenhouse Gases –Part 3: specification with guidance for the validation of greenhouse gas assertions, (ISO 14064), firts edition 2006-03-01.
- [10] GEI México. Available: <http://www.geimexico>, consultado el 9 de octubre d 2012.
- [11] A. Talaei, D. Pier, A. V. Iyer, Md Ahiduzzaman, A. Kumar. "Assessment of long-term energy efficiency improvement and greenhouse gas emissions mitigation options for the cement industry", *Energy*, Volume 170, 2019, Pages 1051-1066, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.088>.

- [12] E. Hache, M. Simoën, G. Sokhna Seck, C. Bonnet, A. Jabberi, S. Carcanague. "The impact of future power generation on cement demand: An international and regional assessment based on climate scenarios". *International Economics*, Volume 163, 2020, Pages 114-133, <https://doi.org/10.1016/j.inteco.2020.05.002>.
- [13] S. Balsaraa, P. Kumar Jainc, A. Rameshd. "An integrated approach using AHP and DEMATEL for evaluating-climate change mitigation strategies of the Indian cement manufacturing industry", *Environmental Pollution* 252 (2019) 863-878, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.059>
- [14] Federación Interamericana del Cemento (FICEM) Informe estadístico 2011, FICEM.
- [15] CEMEX (2010), Inventario Corporativo de GEI Cemex México.
- [16] D. Song, B. Chen." A Life Cycle Modeling Framework for Greenhouse Gas Emissions of Cement Industry", *Energy Procedia*, Volume 61, 2014, Pages 2649-2653, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.267>
- [17] J. Farfan, M. Fasihi, C. Breyer. "Trends in the global cement industry and opportunities for long-term sustainable CCU potential for Power-to-X", *Journal of Cleaner Production*, Volume 217, 2019, Pages 821-835, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.226>
- [18] M. Schneider."The cement industry on the way to a low-carbon future", *Cement and Concrete Research*, Volume 124, 2019, 105792, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105792>
- [19] Unzalu, P. Guía Metodológica para la aplicación de la norma UNE ISSO 14064-1:2006 para el desarrollo de inventarios de gases de efecto invernadero en organizaciones. Ed. Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental. España. 2012

Anexos

Anexo 1. Prototipo para un sistema de registro para el control GEI

ESTABLECER LA IDENTIDAD EMPRESARIAL		SISTEMA DE CONTROL GEI VERSIÓN: 0		CÓDIGO: GEI 14064 – 3	
Industria del Cemento		REGISTRO DE COMPROBACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DE LA NORMA ISO 14064 ORIGINAL		FECHA DE ELABORACIÓN: 09/09/2016	
PROPÓSITO: Comprobar el cumplimiento de los requisitos de la ISO 14064:2 para verificar y validar la información vía la auditoria					
UBICACIÓN:					
RESPONSABLE:					
REQUERIMIENTOS POR CLÁUSULA DE LA ISO 14064:2006	SITUACIÓN ACTUAL		OBSERVACIONES		
	EXISTE		ALCANCE 1 y/o 2		
	SI	NO			
Política Ambiental GEI: ¿La Política Ambiental se ejecuta satisfactoriamente?					
Planificación Aspectos ambientales Requisitos legales GEI Objetivos y metas Programa (s) de control GEI					
Implementación y operación Estructura y responsabilidad Capacitación y entrenamiento, Conocimiento y competencia. Comunicación Control de documentos Control de operaciones Preparación y respuestas ante situaciones de emergencia					
Verificación y acción correctiva Monitoreo y medición No conformidad y acciones correctivas de evaluación del riesgo					
Resultados de la Auditoria Grado de cumplimiento con los requisitos de la ISO 14064-2 Registros Auditoria de seguimiento GEI					
Revisión por la dirección					