

Análisis hidrológico e hidrodinámico del Monumento Nacional Guayabo y su impacto frente al cambio climático

Hydrological and hydrodynamic analysis of the Guayabo National Monument and its impact due to climate change

Daphne María Zamora-Varela¹, David Borge-Leandro²

Fecha de recepción: 25 de enero, 2022
Fecha de aprobación: 2 de mayo, 2022

Zamora-Varela, D.M; Borge-Leandro, D. Análisis hidrológico e hidrodinámico del monumento nacional guayabo y su impacto frente al cambio climático. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, Nº 2. Abril-Junio, 2023. Pág. 37-49.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i2.5925>

-
- 1 Universidad Fidélitas, Costa Rica.
Correo electrónico: zamoradaphne18@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-8577-9639>
 - 2 Universidad Fidélitas, Costa Rica.
Correo electrónico: dborge80034@ufide.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-9157-8438>

Palabras clave

Hidrología; hidrodinámica; tecnología LiDar; hidrograma; hietograma; calado; anegamiento.

Resumen

En Costa Rica existe un patrimonio y un legado de la Ingeniería Civil, en la provincia de Cartago: Monumento Nacional Guayabo es un sitio con zonas arqueológicas de más de 1000 años d.C. Hoy en día se han presentado distintos problemas de erosión y anegamiento en el sitio que amenaza con el deterioro de la infraestructura.

La importancia de la investigación se centraliza en un análisis de la situación actual y futura de la escorrentía y como esta puede ver afectada por el cambio climático, además de una propuesta de solución basada en una zanja de infiltración.

Los datos hidrodinámicos se obtuvieron de una tormenta de 30 min, con un periodo de retorno de 50 años con un incremento en la lluvia de un 18% por el cambio climático, donde se estudian las variables de velocidad y calado de la escorrentía. Los valores críticos obtenidos son de 1,43 m/s y 0,47 m respectivamente. El hidrograma crítico correspondiente al escenario con un periodo de retorno de 50 años y un incremento del 18%, muestra un caudal de 0,65 m³/s y el hietograma en el mismo escenario muestra una cantidad de precipitación de 19 mm.

Dicho esto, se propone como solución una zanja de infiltración con GeoPockets para acumular la escorrentía superficial, la cual ayuda a disminuir el anegamiento y detiene la erosión.

Con la solución propuesta se lograría liberar la zona del monumento de la escorrentía superficial sin secar el sistema hidráulico ni los canales del Monumento Nacional Guayabo.

Keywords

Hydrology; hydrodynamics; Lidar technology; hydrograph; hietogram; draft; waterlogging.

Abstract

In Costa Rica there is a Civil Engineering heritage and a legacy, in the province of Cartago: Guayabo National Monument is a site with archaeological sites dating back more than 1400 years AD. Today there have been different problems of erosion and waterlogging at the site that threaten to deteriorate of infrastructure.

The importance of the research focuses on an analysis of the current and future runoff and how it may be affected by climate change, and how the issue can be solved by means of an infiltration ditch.

The hydrodynamic data was obtained from a 30-minute storm, with a return period of 50 years with an increase in rainfall of 18% due to climate change, where the variables of runoff speed and draft are studied. The critical values obtained are 1.43 m / s and 0.47 m respectively. The critical hydrograph corresponding to the scenario with a return period of 50 years and an increase of 18%, suggests a flow of 0.65 m³ / s and the hietograph under the same scenario shows a precipitation amount of 19 mm.

An infiltration ditch with GeoPockets is proposed as a solution to accumulate surface runoff, which helps reduce waterlogging and stops erosion.

With the proposed solution, it is possible to free monument area from surface runoff without drying up the hydraulic system or the channels of the Guayabo National Monument.

Introducción

El Monumento Nacional Guayabo se ubica en la provincia de Cartago, Costa Rica; dentro del cantón de Turrialba, en el distrito de Santa Teresita, el mismo cuenta con zonas arqueológicas que datan entre 1000 años d.C. y 1400 a.C. El sitio arqueológico con más de tres mil años de antigüedad es considerado la ciudad más antigua en el país. De acuerdo con [1] el monumento fue fundado en el año 1000 a.C. y abandonado en el año 1400 d.C. y descubierto hace 50 años por el arqueólogo Carlos Aguilar Piedra.

La investigación realizada por José Ricardo Bonilla Brenes en el año 2014 [2] sobre un análisis de las estructuras hidráulicas del Monumento Nacional Guayabo, muestra un modelo del funcionamiento de las estructuras hidráulicas de una manera geométrica, dando a conocer sus dimensiones, pendientes, capacidades y conexiones de cada una de las estructuras hidráulica que se encuentran visibles en el parque, además de cómo estas se interconectan y brinda acceso a una mejor comprensión de los trayectos del agua.

Existen distintos hallazgos arqueológicos que se han dado gracias a las nuevas tecnologías de geoposicionamiento espacial, entre las más destacables está la herramienta LiDar, es un método que se desarrolló con mayor profundidad en los 2000, sin embargo, existen documentaciones desde 1971, la herramienta permite digitalizar relieves, que mediante un láser permite detectar y medir la distancia entre dicho instrumento y la superficie.

El estudio se centraliza en el sistema hidráulico del monumento en el cual existe una zona denominada “núcleo arquitectónico” el cual se refiere según [3] a un conjunto de estructuras de distinta índole y características que les permitieron a los pobladores el manejo del agua para su total aprovechamiento.

La investigación se centraliza en el desarrollo que toma la esorrentía en las construcciones hidráulicas. Se cree que los fuertes cambios climáticos que ha sufrido el país afectan rotundamente el funcionamiento de estas estructuras. La investigación busca satisfacer una solución a las grandes intensidades de lluvia que existen en el país.

La solución propuesta está fundada en el concepto SbN (Solución basada en la Naturaleza)

El termino SbN yace en la década de los 2000 por la UICN y el Banco Mundial [4], por la búsqueda de abordar los desafíos actuales desde una perspectiva más natural, convirtiéndolas a la vez en oportunidades de innovación y lazos entre la naturaleza, comunidad, infraestructural, cultura y economía.

Análisis metodológico

La investigación se clasifica como un estudio exploratorio, ya que el objetivo pretende alcanzar un modelo hidráulico e hidrodinámico del Monumento Nacional Guayabo mediante la recolección de datos geospaciales por medio de tecnología LiDar terrestre y aérea. La recolección de datos se realiza de una forma cuantitativa, mediante la observación, recopilación y obtención de las distintas variables de la esorrentía de la zona en estudio, para ello se trabajó con tecnología RTK donde se usa una triangulación con dos estaciones, una en tierra y la otra en aire para aumentar la precisión de los equipos, los grupos siempre están en comunicación para que la información obtenida por ambos equipos se esté guardando simultáneamente, se vayan tomando los datos de la superficie, obteniendo una nube de puntos de 3 dimensiones del sitio valorado.

Los datos obtenidos en campo se procesarán y analizarán en los sistemas de información geográfica para modelar los escenarios de los cambios de esorrentía superficial en la zona. Entre las herramientas por utilizar se tienen: Global Mapper, Google Earth, QGis, IBER para

generar histogramas, gráficos y cuadros comparativos para los distintos periodos de retorno y cambios frente al cambio climático, donde se modela la información obtenida para procesar situaciones de crecida de lluvias en velocidad y en altura para un periodo de retorno de 50 años con una intensidad de lluvia 30 minutos. Estos escenarios brindan la situación en la que se enfrenta el monumento Nacional Guayabo y determinan el principal impacto de la zona. Para finalizar se presenta el planteamiento de la solución que vaya acorde con la infraestructura de la zona.

Resultados

El modelo permitió realizar simulaciones para cuantificar la variación temporal de la información hidrológica del sitio arqueológico.

Para el cálculo de la intensidad de lluvia de toma la fórmula del modelo propuesto por [5], tomando el dato de intensidad correspondiente a la provincia de Cartago:

$$I_{cartago} = 156,89 - (28,6 * \ln(dur)) + (42,2 - (8,07 * \ln(dur))) * \ln tn \quad \text{Ec 1}$$

donde:

I = Intensidad de lluvia en mm/h

tn = Periodo de retorno correspondiente en años

dur = Duración de la lluvia en minutos (30 min).

Con la intensidad de lluvia del cuadro 1 se generó un hidrograma (ver figura 1) con periodo de retorno de 50 años y dentro del mismo una comparación con un incremento del 18% en la intensidad de lluvia debido al cambio climático [6].

Para el hidrograma se procede a calcular las siguientes variables:

Intensidad de lluvia:

$$I = 156,89 - (28,46 * \ln(30)) + (42,2 - 8,07 * \ln(30)) * \ln(50)$$

$$I = 118 \text{ mm/h}$$

Precipitación:

$$P = (I * dur)/60 \quad \text{Ec 2}$$

$$P = (118 * 30)/60$$

$$P = 58,90 \text{ mm}$$

Con los resultados obtenidos y los datos de entrada del sitio arqueológico se calculan las siguientes variables:

$$\text{Pendiente: } S = (cota \text{ max} - cata \text{ min}) / (Long \text{ cauce} * 1000) \quad \text{Ec 3}$$

$$\text{T concentración (h): } 0,000325 * (((Long \text{ cauce} * 1000)^{0,77} / (Pendiente)^{0,385}) \quad \text{Ec 4}$$

$$\text{T concentración (min): } t \text{ concentración (h)} / 60$$

$$\text{Tiempo punta (h): } \sqrt{t \text{ concentración (h)}} + 0,6 * t \text{ concentración (h)} \quad \text{Ec 5}$$

Tiempo base (h): $2,67 * tiempo\ punta$ Ec 6

Caudal de la punta (m³/s): $0,208 * ((Precipitación * Superficie) / tiempo\ punta)$ Ec 7

Duración P neta (h): $2 * \sqrt{t\ concentración\ (h)}$ Ec 8

Cuadro 1. Datos y cálculo hidrograma T= 50 años

Datos de Entrada	
Long cauce (km)	0,36
Cota máx. (m)	1122
Cota min (m)	1100
Superficie (km ²)	0,02
Precipitación (mm)	58,90

Cálculos	
Pendiente	0,061
t concentración (h)	0,089
t concentración (min)	5,31
tiempo punta (h)	0,35
tiempo base (h)	0,9
Caudal de la punta (m ³ /s)	0,5
Duración P neta (h)	0,595

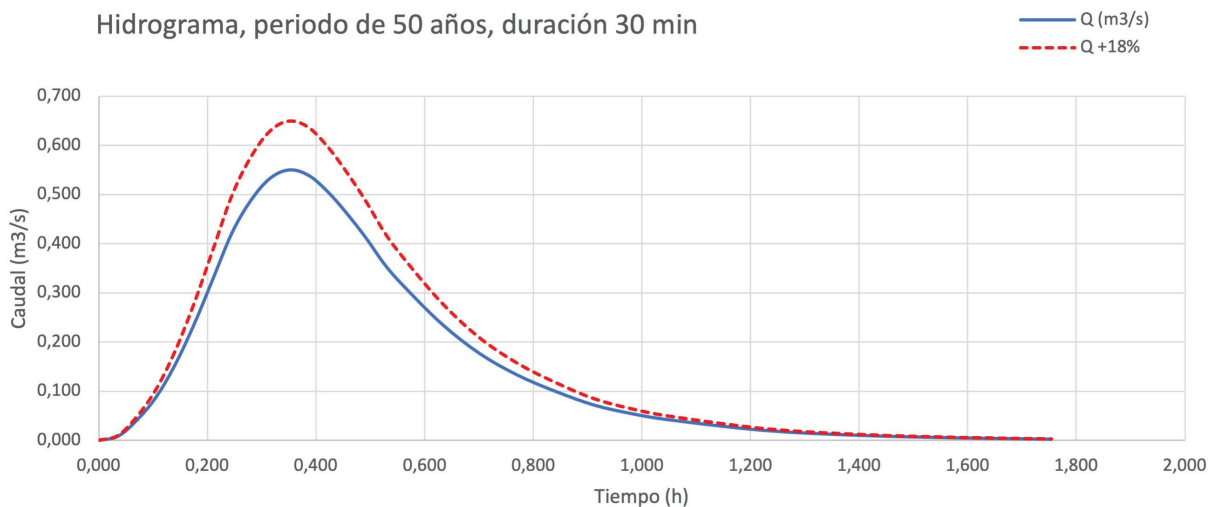


Figura 1. Hidrograma T= 50 años.

Se generan los hietogramas para representar las variaciones en el tiempo de la precipitación, como se muestra en los cuadros 2 y 3.

Los datos de intensidad de precipitación de toman de [7], específicamente de la estación meteorológica de Pacayas en Cartago durante el periodo de 1980-2006.

Cuadro 2. Precipitación, periodo de retorno T= 50 años.

Hietograma T 50				
Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación Acumulada (mm)	Precipitación incremental (mm)	Precipitación incremental ordenada (mm)
5	191.99	16.00	16.00	0.08
10	148.96	24.83	8.83	1.78
15	137.17	34.29	9.47	3.47
20	123.98	41.33	7.03	5.17
25	110.78	46.16	4.83	4.83
30	97.59	48.80	2.64	9.47
35	92.51	53.96	5.17	16.00
40	87.42	58.28	4.32	8.83
45	82.34	61.75	3.47	7.03
50	77.25	64.38	2.62	2.64
55	72.17	66.15	1.78	4.32
60	67.08	67.08	0.93	2.62
65	62.00	67.16	0.08	0.93

Cuadro 3. Precipitación, periodo de retorno T = 50 años + 18%.

Hietograma T 50 + 18%				
Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación Acumulada (mm)	Precipitación incremental (mm)	Precipitación incremental ordenada (mm)
5	226.55	18.88	18.88	-0.10
10	175.77	29.30	10.42	2.10
15	161.86	40.47	11.17	4.10
20	146.29	48.76	8.30	6.10
25	130.72	54.47	5.70	5.70
30	115.16	57.58	3.11	11.17
35	109.16	63.67	6.10	18.88
40	103.16	68.77	5.10	10.42
45	97.16	72.87	4.10	8.30
50	91.16	75.96	3.10	3.11
55	85.15	78.06	2.10	5.10
60	79.15	79.15	1.10	3.10
65	73.15	79.25	0.10	1.10

Se realizó un cálculo del volumen de vacíos dentro de la zanja en donde el volumen sólido de la zanja de infiltración propuesta se obtiene de la siguiente manera:

$$V_S = \text{Ancho} \times \text{Altura} \times \text{Largo} \quad \text{Ec 9}$$

$$V_S = 2 \times 1 \times 400$$

$$V_S = 800 \text{ m}^3$$

La relación de vacíos se estimó según [8]:

$$0,35 = \frac{V_v}{800} \quad \text{Ec 10}$$

Posteriormente se calculó el volumen máximo de precipitación en T=50 años más 18% según se indica a continuación:

$$V_T = \text{Caudal (m}^3/\text{s)} \times \text{tiempo (s)} \quad \text{Ec 11}$$

$$V_T = 0,65 \times 1263,18$$

$$V_T = 819,7 \text{ m}^3$$

Por último, se le resta el volumen de vacíos para obtener el volumen real con el que trabaja la solución propuesta como zanja de infiltración. El cálculo se muestra a continuación:

$$V_R = V_T - V_v \quad \text{Ec 12}$$

$$V_R = 819,7 - 280$$

$$V_R = 539,7 \text{ m}^3$$

En el punto más crítico de la tormenta dentro de la zanja se infiltra, evapora y transcurre aproximadamente un volumen de agua de 539,7 m³ a lo largo de la misma.

Con los datos de caudal se corrieron los modelos hidrodinámicos. El caso crítico del calado es de 0,47 m y la velocidad de 1,43 m/s

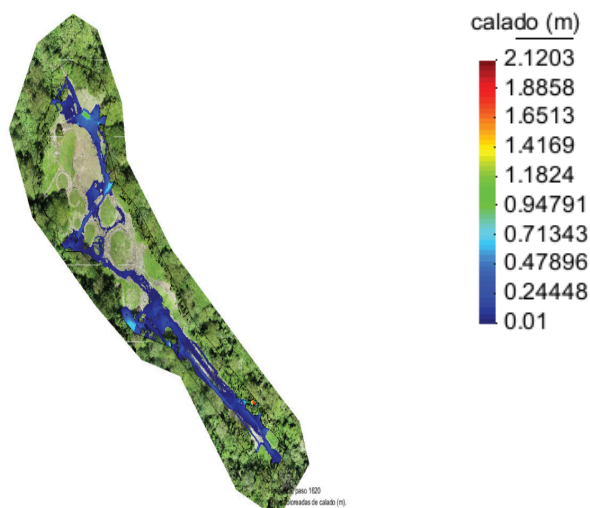


Figura 2. Calado con hidrograma T 50 +18%, sitio arqueológico.

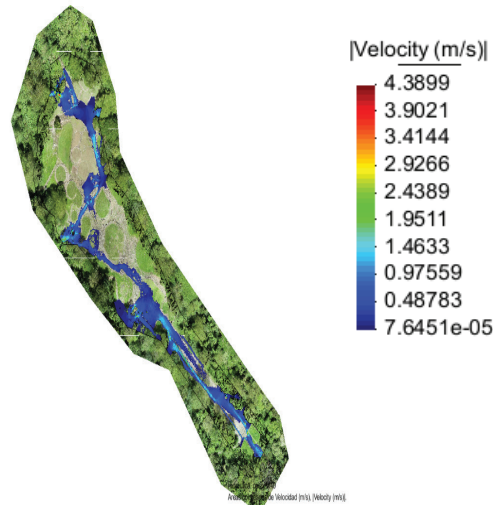


Figura 3. Velocidad con hidrograma T 50 +18%, sitio arqueológico.

Propuesta de solución

El objetivo de la solución es disminuir la cantidad y velocidad de escorrentía superficial en el sitio mediante un sistema de zanjas de infiltración aguas arriba del monumento (ver figura 5), esto para evitar interponerse con la antropología del monumento. Las cuales funcionan como una trinchera perpendicular al sitio arqueológico donde la escorrentía tiene tres distintos destinos: evo transpiración, conducción a la quebrada y filtración

De acuerdo con los lineamientos del SINAC y la administración del Monumento Nacional Guayabo, no existe ningún formulario necesario para realizar ningún tipo de intervención del Monumento. Es necesario que la solución propuesta sea aprobada por el Colegio de Arqueología y que la misma tenga antecedentes de su funcionalidad y eficiencia en otro proyecto ya sea Nacional o Internacional relacionado con el tema, para su aprobación y realización, ya que esta es una solución invasiva al terreno.

La zanja está conformada por sistema llamado “GeoPockets” o Hongxiang Geocell el cual consiste en una red diseñada y de alta resistencia de celdas interconectadas que confina y estabiliza los suelos. El sistema proporciona una solución innovadora a los problemas de estabilidad del suelo en aplicaciones de protección de taludes y canales, soporte de carga y retención de tierra. Una vez instalado el sistema, se utilizan materiales de relleno específicos para rellenar las celdas y crear un sistema de protección y estabilización fuerte y permanente [9].

Diseño zanja de infiltración

La zanja se encuentra en el lado oeste y a todo el largo del sitio arqueológico, como se puede apreciar en la figura 4.



Figura 4. Diagrama flujo del agua.

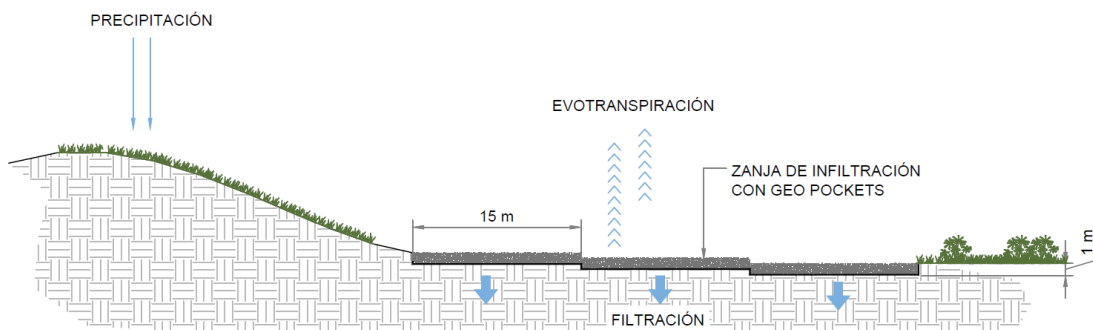


Figura 5. Diseño zanja de infiltración.

A lo largo de la zanja se coloca una red que permite la permeabilización [10], existe una pendiente natural de terreno por lo que en el diseño se incluyó cada 15 m un cambio de altura de entre 20 y 50 cm. La zanja tiene dos metros de ancho y un metro de altura, esto asegurara la mayor captación de agua en el caso más crítico. La solución no pretende secar los sistemas hidráulicos del Monumento ni impedir su funcionalidad, solamente es un conducto para la escorrentía superficial en el caso de tormentas muy severas y que la misma no erosione ni dañe gravemente la infraestructura del sitio.

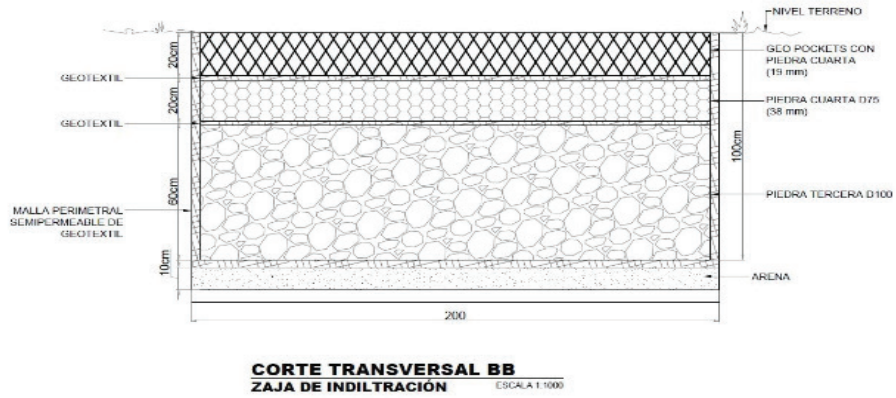


Figura 6. Diseño de zanja.

Una vez colocado en el modelo hidrodinámico la zanja de infiltración se obtuvo un dato de cala de 0,5 m y 0,88 m/s de velocidad, como se aprecia en las figuras 7 y 8.

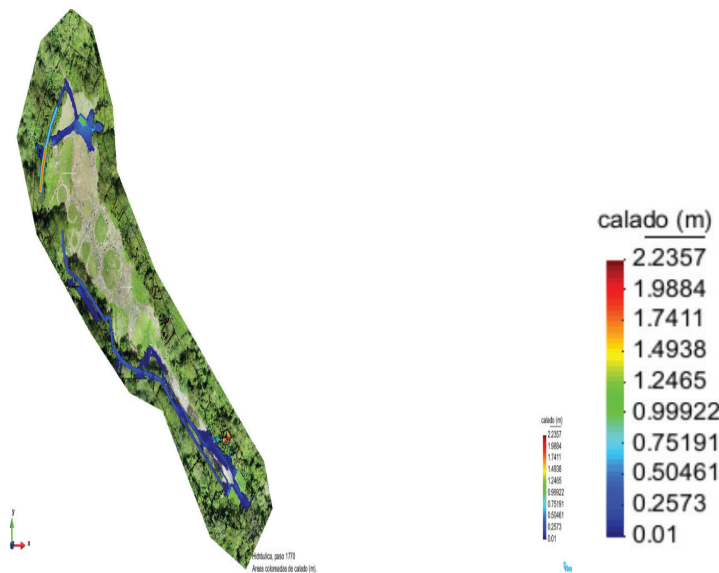


Figura 7. Calado con zanja de infiltración con T= 50 años +18%.

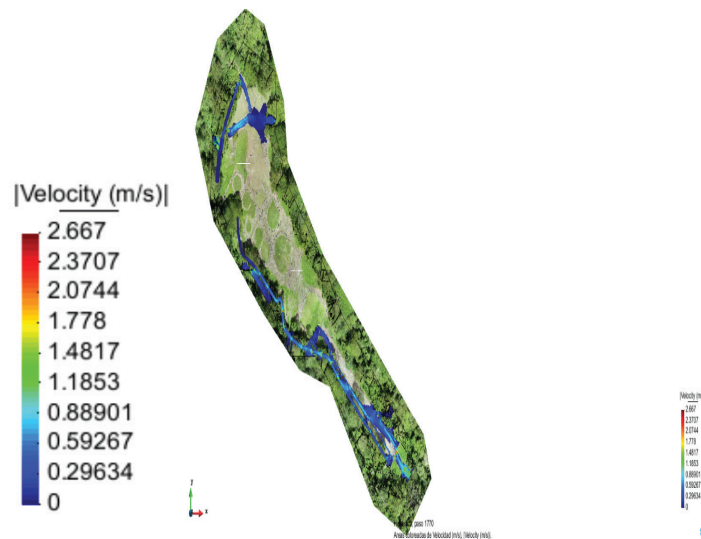


Figura 8. Velocidad con zanja de infiltración con T=50 años +18%.

Se puede observar que efectivamente la escorrentía se redirige a la nueva zanja de infiltración que se colocó en la parte oeste del sitio arqueológico.

Es importante recalcar que la altura de la escorrentía superficial sigue siendo igual de elevada que sin la zanja, esto porque el agua se acumula en ella. Sin embargo, en la mayoría del área esta no se desborda y se mantiene en la zanja de infiltración. La zona de los montículos está completamente resguardada de la escorrentía superficial y logra solucionar el problema de erosión y anegamiento en el área.

De acuerdo SINAC, es muy importante sin importar el tipo de solución otorgada en esta investigación, que el canal existente y el sistema hidráulico no se seque ni deje de funcionar y según los datos obtenidos esto no va a pasar con la zanja de infiltración, ya que como se observa el agua se desborda y sigue su rumbo original en la zona de los tanques de almacenamiento-sedimentación y en el área sur donde están las cunetas al lado de la calzada de piedra.

En el caso de la velocidad existe un cambio entre los datos de la simulación con zanja de infiltración y sin ella, pasa de 1,34 m/s a 0,88 m/s, eliminando el aumento de la erosión en el sitio.

Conclusiones

De acuerdo con los periodos de retorno se puede concluir que el incremento por el cambio climático afecta considerablemente los datos. El valor más crítico de caudal para el periodo de retorno de 50 años con el incremento del 18% es de 0,635 m³/s;

Con la información dictada anteriormente y la simulación de lo que puede provocar una tormenta de estos calibres en el Monumento Nacional Guayabo se pretende alcanzar una solución que redirija la escorrentía superficial de una manera que no se vea afectado grandemente la antropología e ingeniería del sitio arqueológico.

Para ello se propone una solución basada en la naturaleza y con elementos propios del sitio, con la que se pretende prevenir más daño y mantener la infraestructura. La misma se basa en una implementación de una zanja de infiltración de 2 metros de ancho x un metro de profundidad y 400 m de largo, con escalones de 20 cm – 50 cm cada 15 m aproximadamente a todo el alrededor del sitio arqueológico, exactamente al lado oeste, está compuesta por una malla de GeoPockets rellena piedra cuarta y tercera

La zanja de infiltración pretende redirigir la escorrentía superficial, primeramente, mediante la filtración en el suelo, para la cual se realiza un cálculo del volumen de vacíos en la zanja dando como resultado un volumen de 280 m³, esto para trabajar con un dato más concreto a la situación real y un volumen únicamente de sólidos, compuesto de fluidos y relleno.

Se toma el volumen de precipitación del periodo de retorno de 50 años + 18%, dando un total de 819,7 m³, y se le resta el volumen de vacíos antes descrito para obtener un resultado total de 624 m³, este sería el valor real de volumen de precipitación para la solución propuesta.

Con dicha solución la escorrentía superficial se acumula en la zanja de infiltración, la zona de los montículos está completamente resguardada y logra solucionar el problema de erosión y riesgos hidrometeorológicos en las áreas verdes y caminos de piedra entre los montículos, áreas más afectadas por la escorrentía superficial.

A pesar de lograr redirigir la escorrentía superficial, es de vital importancia recalcar que los ductos subterráneos, tanque de almacenamiento, de sedimentación y la cuneta a la par de la calzada de piedra, nunca se va a secar y esto se puede asegurar, de acuerdo con los modelos hidrodinámicos, que se va a mantener la corrida de agua, para que el sistema hidráulico original del Monumento siga funcionando y no se seque por motivos de dicha zanja de infiltración colocada como propuesta de solución.

Recomendaciones

Los resultados obtenidos pueden ser más acertados si se incluyesen estudios de suelos y pruebas de laboratorio sobre el terreno en estudio.

Se recomienda, a la administración del Monumento Nacional Guayabo y al Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos CFIA destacar que la solución propuesta es invasiva para el sitio arqueológico y en el caso de ser ejecutada debe ser revisada por más profesionales en el área de suelos, especialmente de existir algún problema del nivel freático, una posible socavación o licuefacción en la zona donde se encuentra la zanja de infiltración.

Se recomienda, a la escuela de Arqueología y a la administración del Monumento Nacional Guayabo realizar un estudio arqueológico en la zona donde se puede realizar la posible zanja de infiltración como solución para la escorrentía superficial, en caso de encontrar hallazgos arqueológicos como en otros lugares del sitio.

Se recomienda, al Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) realizar un estudio del presupuesto detallado de ser ejecutada la solución propuesta en este trabajo de investigación.

Se recomienda, a la comunidad de ingeniería civil sobre todo en la realización de obras de tipo hidráulicas siempre tomar en cuenta el incremento del 18% en las intensidades de lluvias por el cambio climático, dado que es una variable de gran relevancia y ciertamente acerca los resultados a un caso más real. En el caso de no ser valorados puede llegar a indicar un factor de riesgo considerable e inducir una falla en la estructura inesperada.

Se recomienda, a la comunidad de ingeniería civil tratar de relacionarse siempre con soluciones o factores sostenibles en los proyectos sobre todo en el caso de ser zonas con un gran valor cultural y natural para el país y también porque el factor de sostenibilidad y construcción amigable con el ambiente en cualquier tipo de infraestructura ayuda enormemente a proteger la biodiversidad y evitar grandes fallos en la zona de construcción.

Referencias

- [1] L.-U. Gabriela Contreras, «Tecnología permite conservar en memoria histórica digital sitio arqueológico,» 29 Abril 2014.
- [2] J. R. B. Brenes, *Análisis de las Estructuras Hidráulicas del Monumento Nacional Guayabo*, San José: Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, 2014.
- [3] M. A. Wong, «Manejo de la fuerza y la velocidad del agua: sector este del sistema hidráulico del sitio arqueológico Monumento Nacional de Turrialba,» 24 Julio 2020. [En línea]. Available: <file:///C:/Users/PROBOOK/Downloads/43376-Texto%20del%20art%C3%ADculo-159894-1-10-20200806.pdf>.
- [4] A. T. Giralda y L. R. M. Andrés F., «Soluciones basadas en la Naturales,» 2018. [En línea]. Available: http://www.conama.org/conama/download/files/conama2018/GTs%202018/10_final.pdf.
- [5] D. W.-G. Vahrson, L. M. A. Sánchez y L. I. A. Beita, *Cálculo de la intensidad de lluvia*.
- [6] Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático (IPCC), «Cambio Climático 2014 informe de síntesis,» 2014. [En línea]. Available: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf.
- [7] N. R. Morales, «Curvas de Intensidad duración frecuencia de algunas estaciones meteorológicas mecánicas,» 2011. [En línea].
- [8] D. Escobar, G. a. E. P. y C. Enrique, *Relaciones gravimétricas y volumétricas del suelos*, Universidad Nacional de Colombia, 2016.
- [9] Geocell, «HDP Geocell,» S.F. [En línea]. Available: http://en.hxgeos.cn/product/141.html?gclid=CjwKCAjw07qDBhBxEiwA6pPbHnW4ht3Fr-i0Bd8U07EiXO5yPHM6L8omNdwLTxr6WOYbqq2s1R287xoCi4UQAvD_BwE.
- [10] R. Hernández, C. Fernández y P. Baptista, *Metodología de la Investigación*, Ciudad de México: Compañía editorial Ultra, S.A. de C.V, 2000.
- [11] InfraGrass, «InfraGrass,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.infragrass.com/>.
- [12] J. R. B. Brenes, *Análisis de las estructuras hidráulicas del Monumento Nacional Guayabo*, San Jose, 2014.