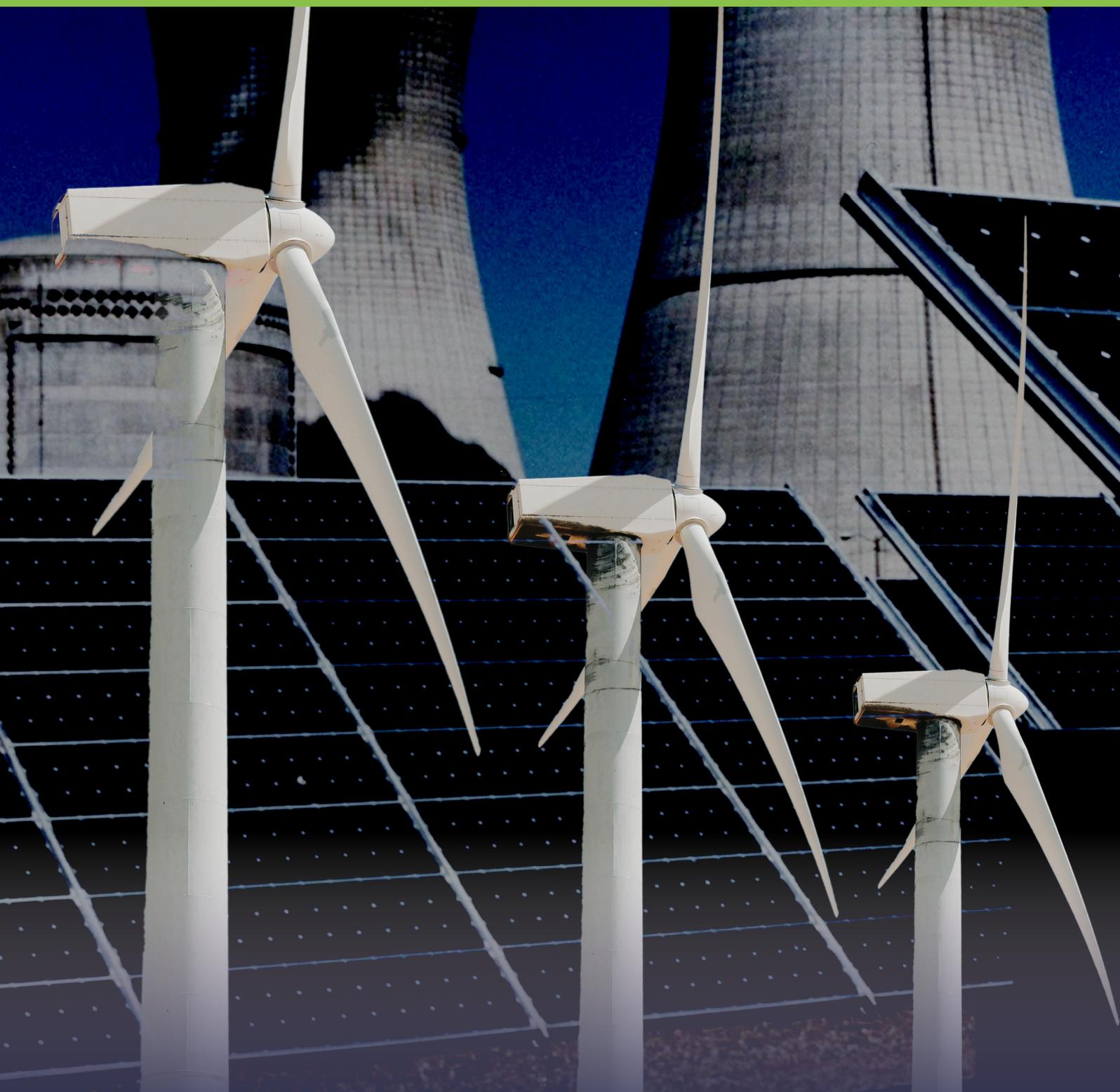


ENFOQUE



UTE
REVISTA

Facultad Ciencias de la Ingeniería e Industrias
eISSN:13906542



Volumen 14 • N°2 • Abril 2023

Sumario

LUDIFICACIÓN DIGITAL EN EL APRENDIZAJE EN EDAD PREESCOLAR: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA (Digital gamification in pre-school learning: a systematic review of the literature) <i>Fabrizio Marcillo, Wilmar Hernández, Jimmy Torres, Lorena Cusme, Eugenio Mora, Susana Cobeña</i>	1
ADAPTABILITY OF REGRESSION ALGORITHMS TO THE BEHAVIOR OF PROTEIN PLANTS (Adaptabilidad de algoritmos de regresión al comportamiento de las plantas proteicas) <i>Pedro M. Estrada-Jiménez; Hernán A. Uvidia-Cabadiana; Rocío del Carmen Herrera-Herrera, Luís G. Hernández-Montiel; Danis M. Verdecia-Acosta; Jorge L. Ramírez-de la Ribera; Pedro J. Noguera-López; Edilberto Chacón-Marcheco</i>	20
EVALUACIÓN DE RESIDUOS FORESTALES DE ESPECIES POTENCIALES PARA LA OBTENCIÓN DEL CARBONO COMO ENERGÍA LIMPIA DE LA AMAZONÍA ECUATORIANA (Evaluation of forest residues of potential species to obtain carbon as clean energy in the Ecuadorian Amazon) <i>Rubén Darío Ledesma, Reinier Abreu-Naranjo, Juan Elías González</i>	35
ANÁLISIS NUMÉRICO DEL FUNCIONAMIENTO DE UN CONVERTIDOR DE ENERGÍA DE LAS OLAS (WEC) USANDO CFD Numerical analysis of operation of a Wave Energy Converter (WEC) using CFD <i>Cristian Andrade-Terán, Esteban Valencia, Edgar Cando</i>	52
IMPACTO DEL USO DE HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS EN LA PRODUCCIÓN ACUÍCOLA Impact of the use of technological tools aquaculture <i>Jhordani Guélac-Gómez, Jeison Eli Sánchez-Calle, Miguel Angel Valles-Coral</i>	66
MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA URBANA DEL RÍO BÉLICO EN LA CIUDAD DE SANTA CLARA, CUBA (Hydrological modeling of the urban basin of the Bélico river in the city of Santa Clara, Cuba) <i>Carlos Lázaro Castillo García, Victor Manuel Carvajal González</i>	77

Ludificación digital en el aprendizaje en edad preescolar: una revisión sistemática de la literatura

(Digital gamification in pre-school learning: a systematic review of the literature)

Fabricio Marcillo¹, Wilmar Hernández², Jimmy Torres³, Lorena Cusme⁴,
Eugenio Mora⁵, Susana Cobeña⁶

Resumen

En el contexto educativo, la ludificación ha emergido como una estrategia efectiva para potenciar el aprendizaje y la motivación. Con el auge de las tecnologías de la información y la comunicación ha surgido la Ludificación Digital (LD). A pesar de que existen numerosos estudios que resumen las contribuciones de la ludificación en la educación, muy pocos han incluido a la educación preescolar. La presente revisión, se apoya en 25 estudios primarios publicados realizados entre 2014 y 2022 e indexados en Scopus y Web of Sciences; busca cerrar esta brecha al caracterizar las principales contribuciones y sintetizar cualitativamente los efectos de la LD. Los resultados indican que hay un interés creciente sobre el tema, en donde la mayoría de los estudios se originan en Asia; se publican en revistas; y se basan en la propuesta de videojuegos para computadoras o dispositivos móviles que buscan mejorar el aprendizaje de la lengua. Predominan las investigaciones de enfoque narrativo, basadas en muestras inferiores a diez participantes, que emplean elementos de juego de tipo Logro (Progresión). Los 15 estudios que midieron algún tipo de efecto de la LD reportan resultados positivos. Sin embargo, estos son difíciles de generalizar por las pequeñas muestras consideradas y su diversidad en la experimentación.

Palabras clave

Ludificación digital; educación preescolar; revisión sistemática de la literatura; educación mejorada por tecnología.

Abstract

In the educational context, gamification has emerged as an effective strategy to enhance learning and motivation. With the rise of information and communication technologies, digital gamification (DG) has emerged. Although there are numerous studies summarizing the contributions of gamification in education, very few have included preschool education. The present systematic review, supported by 25 primary studies published between 2014 and 2022 and indexed in Scopus and Web of Sciences, seeks to close this gap by characterizing the main contributions, and qualitatively synthesizing the effects of DG. The results indicate that there is a growing interest in the topic, where most of the studies originate in Asia; they are published in journals; and are based on the proposal of video games for computers or mobile devices that seek to improve language learning. Narrative approach research predominates, based on samples of less than 10 participants, employing Achievement (Progression) type game elements. The 15 studies that measured the effect of DG report positive results.

Keywords

Digital gamification; pre-school education; systematic literature review; technology enhanced learning.

- 1 Instituto Superior Tecnológico Japón, ITJ, Departamento de Investigación, Quito-Ecuador [fmarcillo@itsj.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0003-2628-9167>].
- 2 Universidad de Las Américas, UDLA, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Quito-Ecuador [wilmar.hernandez@udla.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0003-4643-8377>].
- 3 Instituto Superior Tecnológico Japón, ITJ, Carrera Desarrollo de Software, Santo Domingo-Ecuador (ttorres@itsj.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0001-7690-4936>).
- 4 Instituto Superior Tecnológico Japón, ITJ, Departamento de Investigación, Quito-Ecuador [lcusme@itsj.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0002-9783-1219>].
- 5 Instituto Superior Tecnológico Japón, ITJ, Carrera Desarrollo de Software, Santo Domingo-Ecuador [gmora@itsj.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0002-5654-8695>].
- 6 Instituto Superior Tecnológico Japón, ITJ, Carreras Parvularia y Educación Inclusiva, Santo Domingo-Ecuador [scobena@itsj.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0002-6896-0054>].

1. Introducción

Hoy en día, la sociedad está cada vez más inmersa en las tecnologías de la información y la comunicación (TIC). En este contexto, una de las áreas que más se ha beneficiado y aprovechado de estas tecnologías digitales es la Educación (Cladis, 2020). Numerosos son los escenarios donde las TIC han sido aplicadas en el ámbito educacional. Desde el uso de asistentes computacionales hasta el desarrollo de clases virtuales. El proceso de enseñanza-aprendizaje en sí mismo ha sido objeto de innumerables innovaciones didácticas y tecnológicas a lo largo de los años y en los diferentes niveles educativos. Una de estas estrategias que ha llamado mucho la atención en los últimos años es la ludificación (*gamification*). Kapp (2012) la define como “el uso de elementos de diseño de juegos, mecánicas de juego, estéticas y pensamientos de juego en aplicaciones no relacionadas con juegos para motivar a los estudiantes” (p. 11). De esta definición se puede notar que la ludificación hace un uso muy puntual de los componentes anteriormente mencionados, pero sin descuidar la esencia de la actividad de aprendizaje que se está desarrollando. En otras palabras, se aprende con ayuda de elementos motivadores, pero sin jugar. Existen otros dos enfoques muy cercanos a la ludificación que sobrepasan esta restricción, estos son, en los que los juegos son protagonistas en el aprendizaje. Y son el aprendizaje basado en juegos (*game-based learning*) (Plass et al., 2020) y los juegos serios (*serious games*) (Calderón y Ruiz, 2015).

Aunque existe un gran interés sobre la LD en el ámbito educativo (Dichev y Dicheva, 2017; Kalogiannakis et al., 2021; Loganathan et al., 2019), la mayoría de revisiones de la literatura actual ha dejado de lado a la educación preescolar, o se ha enfocado en disciplinas muy específicas. Por tanto, no queda claro hasta qué punto se ha progresado en la aplicación de la LD en la educación preescolar. Más concretamente, existe incertidumbre acerca de las metodologías, estrategias de evaluación, componentes de juego, áreas de conocimiento y aspectos demográficos presentes en las contribuciones actuales. El objetivo de este estudio fue analizar diferentes puntos de vista científicos a base de la LD y su aplicabilidad en estudios preescolares mediante una revisión sistemática de la literatura, tomando en consideración parámetros como demografía y método científico aplicado a la LD en preescolar. Esta revisión literaria propone determinar la aplicabilidad de la LD en el nivel de estudio preescolar y los beneficios de esta.

Específicamente, en este estudio se respondió las siguientes interrogantes: P1) ¿Qué características demográficas y metodológicas poseen la literatura sobre LD en educación preescolar?, P2) ¿qué resultados se han reportado hasta ahora sobre los efectos de la LD en el aprendizaje preescolar?

2. Revisiones previas sobre ludificación en el ámbito educativo

Muchas investigaciones se han enfocado en el efecto de esta estrategia, y los contextos en los que ha sido aplicada.

Loganathan et al. (2019) encontró que de los 128 estudios realizados, la mayoría reportaron los efectos positivos de la ludificación en el proceso de aprendizaje. Adicionalmente, los autores concluyen que los principales elementos de juego empleados son aquellos orientados al progreso del aprendizaje, y que la estrategia de evaluación de este ocurre a través de métricas cuantitativas. Aunque los autores no especifican explícitamente el período cubierto por la revisión, mencionan que la búsqueda de los trabajos se realizó en junio de 2015, por lo que se puede inferir que cubrieron toda la literatura hasta esa fecha. La revisión sistemática de Subhash y Cudney (2018), a partir de 41 estudios publicados entre 2013 y 2017, arribó a conclusiones similares en el ámbito de la Educación Superior.

Otra revisión que encontró que la ludificación bien planificada e implementada en clase puede ser exitosa fue la desarrollada por Loganathan et al. (2019). Concretamente, los autores revisaron 36 trabajos publicados entre 2010 y 2019 y destacaron que la ludificación puede sufrir en su implementación de falta de infraestructura y consecuencias negativas en el proceso de aprendizaje. Esto último, debido a que existen diseños que propician la competencia entre los estudiantes, lo cual podría causar falta de motivación en algunos de ellos.

Algunos autores han optado por resumir las contribuciones en una determinada región geográfica. Este es el caso de Wang et al. (2020) quienes abordaron el aprendizaje basado en juegos en China. A partir de 818 estudios de una base de datos científica de ese país, los autores concluyen que predominan investigaciones enfocadas en juegos educativos. En el mismo año, la revisión sistemática realizada por Zainuddin et al. (2020), a partir de 46 estudios empíricos publicados desde 2016 a 2019, arribó a conclusiones diferentes. En particular, la mayoría de las contribuciones estuvieron centradas en la aplicación de la ludificación en la Educación Superior, aplicando métodos cuantitativos apoyados en cuestionarios y encuestas para evaluar el aprendizaje y la motivación de los estudiantes. El marco teórico predominante fue la teoría de la autodeterminación de Ryan y Deci (2000). En cuanto a las tecnologías que posibilitan la ludificación, los autores encontraron una gran diversidad de estas. Finalmente, la revisión concluye que la mayoría de las investigaciones reportan efectos positivos de la ludificación.

En el contexto particular de la enseñanza preescolar, Marín Suelves et al. (2021) arribaron a conclusiones similares, en cuanto al uso de videojuegos. Concretamente, los autores realizaron una revisión que incluyó 18 estudios (2011-2019), y concluyeron que esta tecnología potencia el aprendizaje significativo siempre y cuando se pueda aplicar con docentes digitalmente competentes.

Una caracterización bibliométrica sobre ludificación en educación fue desarrollada recientemente por Hebebcı y Alan (2021). A partir de 798 documentos (2002-2022), los autores concluyen que el número de trabajos ha ido en aumento. Además, que España y Estados Unidos son los dos países donde más investigación sobre el tema se genera.

Una de las revisiones más completas sobre ludificación en Ciencias de la Educación es la de Kalogiannakis et al. (2021) quienes se basaron en 24 estudios (2012-2020). Los autores se centraron en cuatro aspectos específicos: 1. metodología y herramientas de evaluación, 2. áreas del conocimiento, niveles y contextos educativos, 3. teoría de aprendizaje y elementos de juego, y 4. efectos reportados sobre la motivación y el aprendizaje.

En tal sentido, encontraron que la mayoría de los estudios: aplicaron enfoques de métodos mixtos con instrumentos de evaluación tipo cuestionarios; fueron implementadas en ambientes universitarios del área de Biología o Ciencias de la Salud; no se apoyan explícitamente en teorías de aprendizaje existentes y usan la competición como principal elemento de juego; y reportan efectos positivos de la ludificación sobre la motivación y el aprendizaje. Aunque en este último caso existe la misma cantidad de trabajos que reportan resultados no concluyentes que son positivos.

Por su parte, Arufe-Giráldez et al. (2022) se centraron en revisar las propuestas pedagógicas y experiencias didácticas que emplearon ludificación en la Educación Física infantil, primaria y secundaria. La revisión sistemática desarrollada se basó en 17 artículos publicados hasta 2022. Los autores concluyeron, en concreto que, si bien no existen experiencias hasta el momento en la etapa preescolar, en los otros niveles educativos los efectos de la ludificación son en general positivos para la práctica y aprendizaje de la Educación Física. La revisión también reveló que los estudios presentan una gran heterogeneidad en cuanto al diseño de investigación.

En resumen, numerosas revisiones de la literatura se han propuesto en tiempos recientes: caracterizar y resumir las contribuciones existentes sobre ludificación en la educación. Los ha-

llazgos reportados, generalmente sobre la base de menos de 30 estudios, coinciden en que esta estrategia educativa potencia la motivación y el aprendizaje de los estudiantes. Sin embargo, en ninguna de estas se aborda la educación preescolar, con excepción de Arufe-Giráldez et al. (2022), quienes no encontraron experiencias a ese nivel educativo para la enseñanza de la Educación Física. El presente estudio buscaría por tanto contribuir a cerrar esta brecha de conocimiento.

3. Metodología

En este estudio se aplicó un enfoque mixto, esto es, desde perspectivas tanto cualitativas como cuantitativas. Para el desarrollo de la revisión se han seguido los principales pasos de la guía *PRISMA 2020* (Page et al., 2021). Estos pasos se describen a continuación; esto es, siguiendo las indicaciones que brinda la lista de control (*Checklist*) de la propia guía. La decisión de optar por esta metodología se debe a dos razones fundamentales.

3.1. Criterios de elegibilidad

Para incluir un estudio en la revisión literaria, este debió cumplir con los siguientes criterios: 1. ser un trabajo científico revisado por pares (artículo de revista, congreso, capítulo de libro), 2. que aborde la LD en entornos educativos preescolares donde los niños son la población objetivo, y 3. ser un estudio primario, esto es, en el que se reporta una experiencia, experimento, o una herramienta que se relaciona con el tema que nos ocupa. Hemos decidido no aplicar restricciones de fecha, idioma, ni de calidad de fuente, como suelen ser el impacto de las revistas, entre otros criterios. Todo esto con la intención de abarcar la mayor cantidad de estudios posibles.

3.2. Fuentes de información

Se realizaron búsquedas en las bases de datos bibliográficas *Scopus* y *Web of Sciences*, las cuales poseen una amplia cobertura de la literatura científica, incluyendo la relacionada con Educación y las TIC (Mongeon y Paul-Hus, 2016).

Algunas revisiones actuales sobre temas afines a la investigación también se han apoyado en estas bases de datos (García-Murillo et al., 2020; Saltos-Rivas et al., 2021).

3.3. Estrategia de búsqueda

Como estrategia de búsqueda en las bases de datos consideradas se tomó en cuenta la siguiente fórmula de consulta:

```
("preschool" OR "creche" OR "daycare" OR "kindergarten" OR "nursery" OR "play school" OR "pre-k" OR "pre-kindergarten" OR "pre-primary") AND gamif*
```

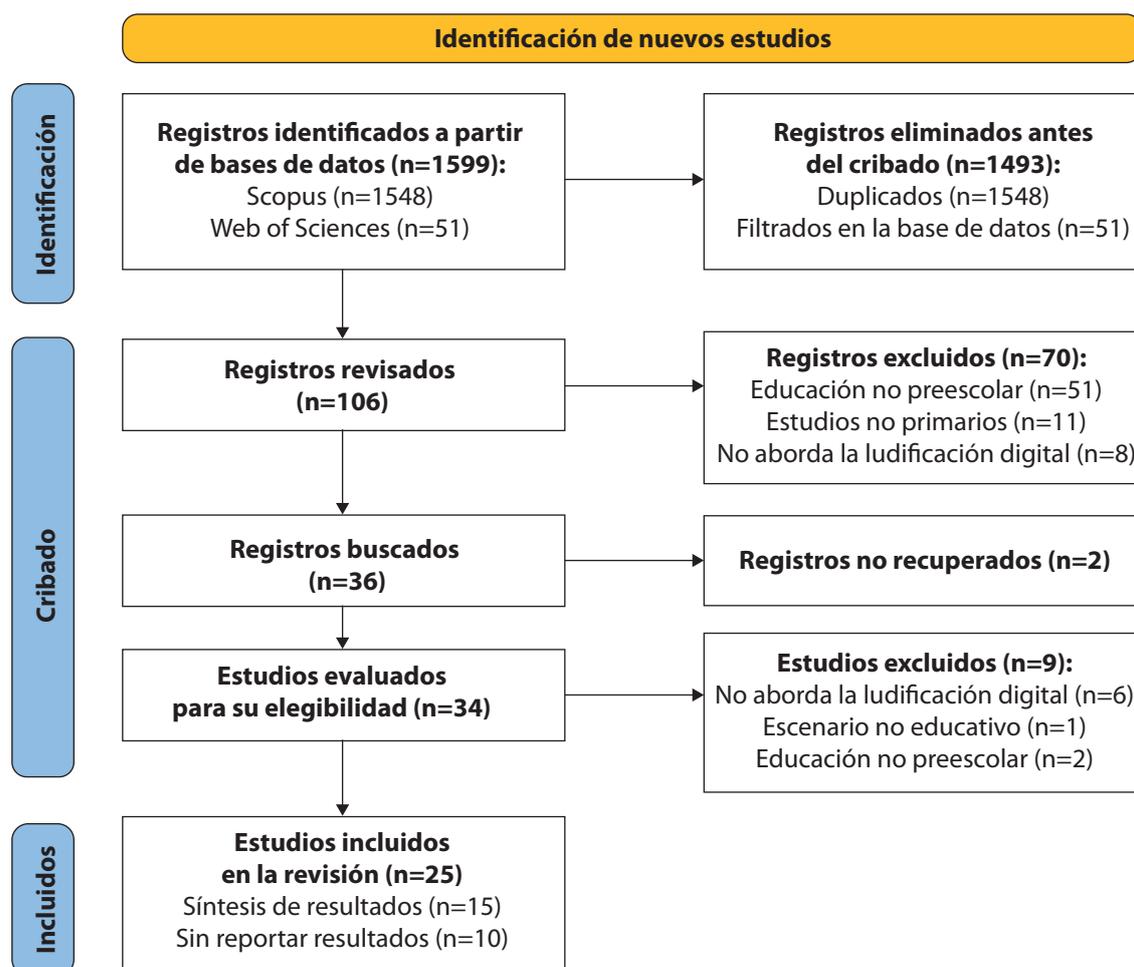
La fórmula consideró múltiples combinaciones de sinónimos en inglés de educación preescolar y las variantes derivadas de la ludificación. Hemos decidido no incluir otros términos más específicos como 'digital'. En un primer paso, se aplicó esta fórmula en las bases de datos sin restringir la búsqueda a metadatos específicos como el título y el resumen. Sin embargo, luego de obtener como respuesta más de 1500 estudios, se decidió considerar como metadatos: el título, el resumen y las palabras clave. En el caso de *Scopus*, esto se logró al incluir la fórmula entre los paréntesis del siguiente comando *TITLE-ABS-KEY()*, mientras que en *Web of Science* en el comando *TS=()*.

3.4. Proceso de selección

Se analizaron los títulos y resúmenes de los trabajos, y aquellos aceptados, fueron buscados en las correspondientes editoriales y repositorios de internet para su análisis a nivel de texto completo. Esta última tarea también fue desarrollada por dos autores de manera independiente y confrontándose los resultados obtenidos para llegar a consensos. El proceso de selección en general fue desarrollado con ayuda de la herramienta Parsifal (<https://parsif.al/about/>), que está orientada a la gestión de una revisión sistemática de la literatura.

La selección de los estudios se resume en el diagrama de flujo de la [figura 1](#). Como se aprecia, los 1599 registros encontrados en las bases de datos fueron filtrándose durante varias etapas hasta llegar a los 25 estudios, incluidos en la revisión. De estos, n=15 reportaron resultados sobre el efecto de la LD en la educación preescolar. El resto (n=10), se limitaron a presentar herramientas, prototipos, diseños, etc. que no fueron suficientemente evaluados. Es importante señalar que se pudo acceder a dos estudios durante la búsqueda de los textos completos. Estos fueron (Portela Iglesias y Garcia Fernandez, 2017; Schocken y Kupferman, 2018). En ambos casos se contactó con los autores vía correo electrónico y a través de la plataforma *ResearchGate* (<https://www.researchgate.net/>). Sin embargo, no se recibieron respuestas.

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de selección de estudios



3.5. Proceso de recogida de datos

El análisis estadístico se realizó mediante el cálculo de la muestra aplicado por (Bhavnani et al., 2019) donde se consideró un nivel de confianza del 95 %. Del total de estudios encontrados (n=1559) se filtró a un total de 25 estudios que represan el 20 % de margen de error, considerando una población finita. El margen de error mencionado se justifica por (Batanero, 2001).

3.6. Datos extraídos

Los datos que se extrajeron de cada estudio responden a las preguntas planteadas en el estudio. En tal sentido, para el caso de la pregunta de investigación número 1 (PI1), se tuvieron en cuenta los siguientes datos: año de publicación, tipo de documento, país y continente de los participantes, si el estudio presenta o no una propuesta de LD, diseño de la investigación, tamaño de la muestra de participantes, asignatura en la que se pretende incidir, qué aspecto se busca mejorar con la estrategia de ludificación, *software* que implementa la LD, *hardware* que soporta a dicho *software*, elementos de juego presentes en la estrategia, y la categoría de dichos elementos. En este último caso, se tuvieron en cuenta trabajos previos (Dichev y Dicheva, 2017).

En el caso de la pregunta de investigación número 2 (PI2), se consideró solamente el resultado de la aplicación y la prueba de la estrategia de LD. Dado que no estamos interesados en estimar estadísticamente un efecto (como se haría, por ejemplo, en un metaanálisis), hemos decidido catalogar los posibles resultados en términos cualitativos. De la forma siguiente: *Positivo* (cuando en general los autores concluyen que su propuesta ha logrado su objetivo), *Negativo* (cuando no lo logra), *No reportado* (cuando los autores no reportan ningún resultado), *No concluyente* (cuando no es claramente ni positivo ni negativo). En este caso, se siguió una clasificación empleada por Kalogiannakis et al. (2021).

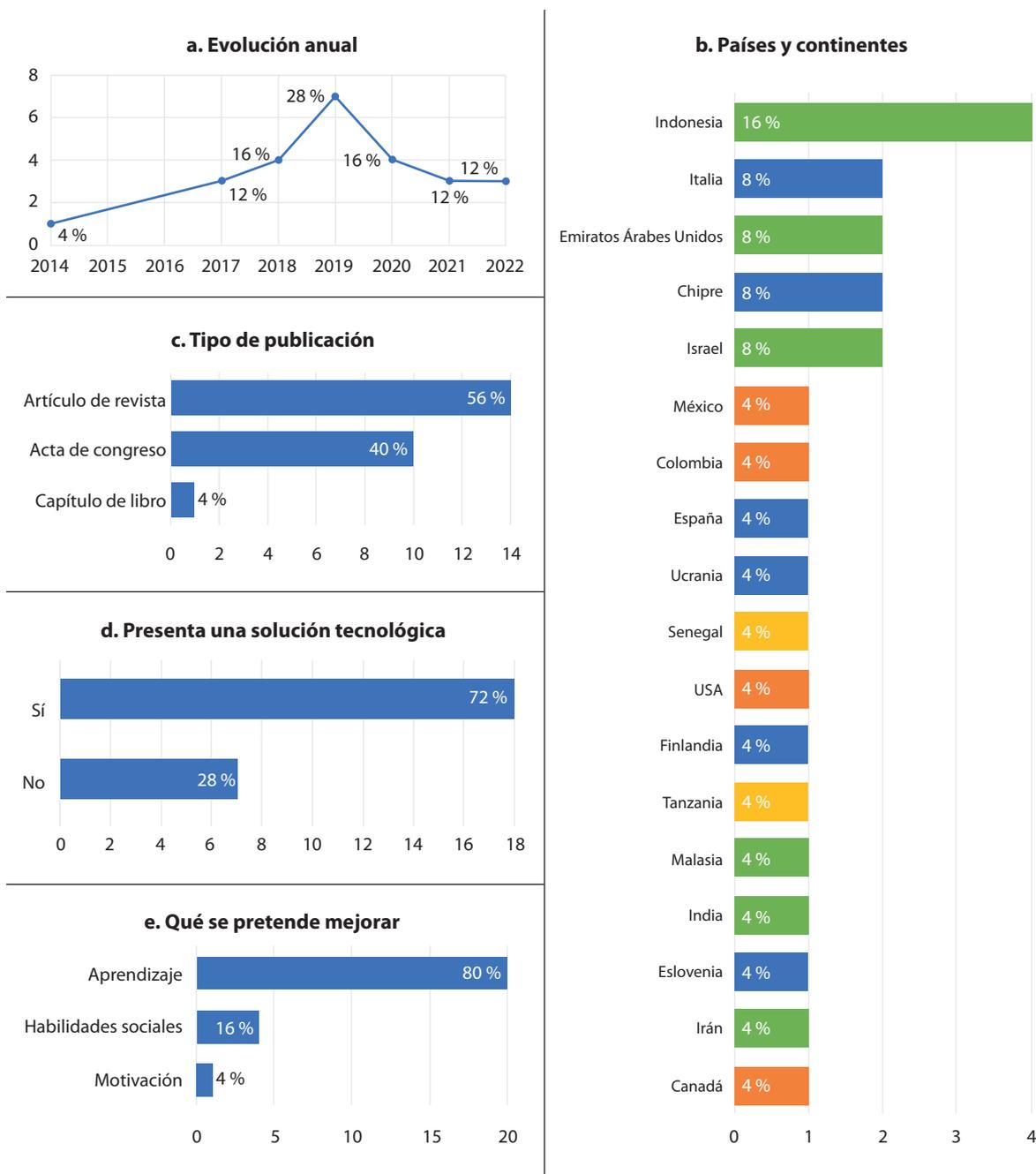
4. Resultados

4.1. Características demográficas y metodológicas de los estudios

En la [tabla A1](#) del anexo A se muestra la información por cada estudio (n=15). Adicionalmente, los gráficos de las [figuras 2 y 3](#), resumen las principales tendencias y patrones de los estudios en cada característica.

En el gráfico de la [figura 2a](#), los estudios sobre LD iniciaron en 2014 con el trabajo de Peled y Schocken (2014), y luego tuvieron un momento álgido en 2019 con siete contribuciones (28 %). En años más recientes, el número de contribuciones, aunque menor a 2019, se ha mantenido en torno a tres publicaciones por año. Sobre la distribución geográfica, el gráfico de la [figura 2b](#) indicó que Asia y Europa concentran la mayoría de las experiencias, 44 % y 32 %, respectivamente. En particular, Indonesia sobresale sobre el resto de los países concentrando el 16 % de los estudios sobre el tema. En cuanto al tipo de publicación, la [figura 2c](#) determinó que predominan los artículos de revista (56 %) y actas de congresos (40 %). Por otro lado, en la [figura 2d](#) se observó que la mayoría de los estudios proponen soluciones tecnológicas de LD (72 %), siendo el foco de estas mejorar el aprendizaje de los estudiantes, como se aprecia en la [figura 2](#).

Figura 2. Características de los estudios: Evolución anual, países y continentes de los participantes, tipo de publicación, si se propone o no una solución tecnológica, y qué se pretende mejorar con la LD



El resto de las características de los estudios fueron resumidas en la [figura 3](#). Concretamente, la [figura 3](#) indicó que la mayor parte de los estudios (36 %) adoptó un enfoque de investigación descriptiva para presentar sus resultados. Este es el caso preciso de aquellos estudios

que se limitaron a proponer herramientas de LD, esto es, sin probarlas o evaluarlas. Nótese que el número de investigaciones orientadas a la experimentación es mucho menor y adoptan diferentes enfoques. Sobre la asignatura, o contexto curricular en el que se aplica la estrategia de ludificación, la [figura 4](#) muestra que la mayoría de los estudios se enfocaron en mejorar aspectos del aprendizaje del habla, ya sea del idioma nativo (20 %) o del idioma inglés (16 %). En menor medida se ubican la escritura (12 %), el manejo de emociones (8 %), Ciencias Naturales (8 %), Matemáticas (8 %) y varias asignaturas al mismo tiempo (8 %).

En las [figuras 3, 4, 6, 7, 8](#), el eje x representa la frecuencia porcentual de los estudios seleccionados (n=25). En la [figura 5](#), el eje x representa el rango de tamaño de muestra utilizado en los estudios seleccionados (n=25). En el histograma de la [figura 5](#) se observó que el tamaño de la muestra de participantes empleado en los estudios es predominantemente inferior a 10. En ese grupo de investigaciones se encuentran también aquellas que no se basaron en muestras de participantes, esto es, tamaño de muestra igual a 0. Estas representan el 32 % del total. Existen, no obstante, excepciones notables como Bhavnani et al. (2019), y Ongoro y Mwangoka (2019), quienes emplearon más de 100 participantes en sus estudios.

Figura 3. Características de los estudios según el diseño de la investigación

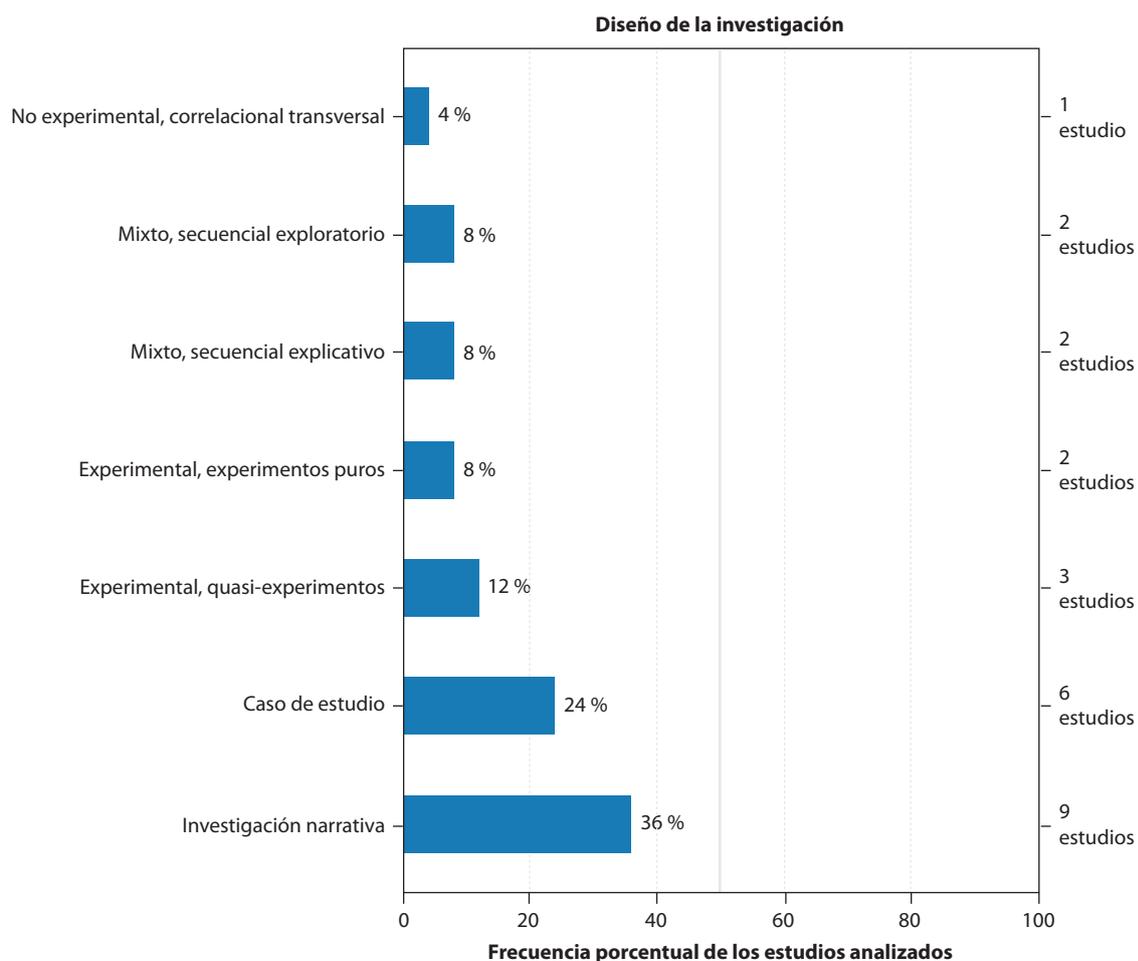


Figura 4. Características de los estudios analizados según la asignatura

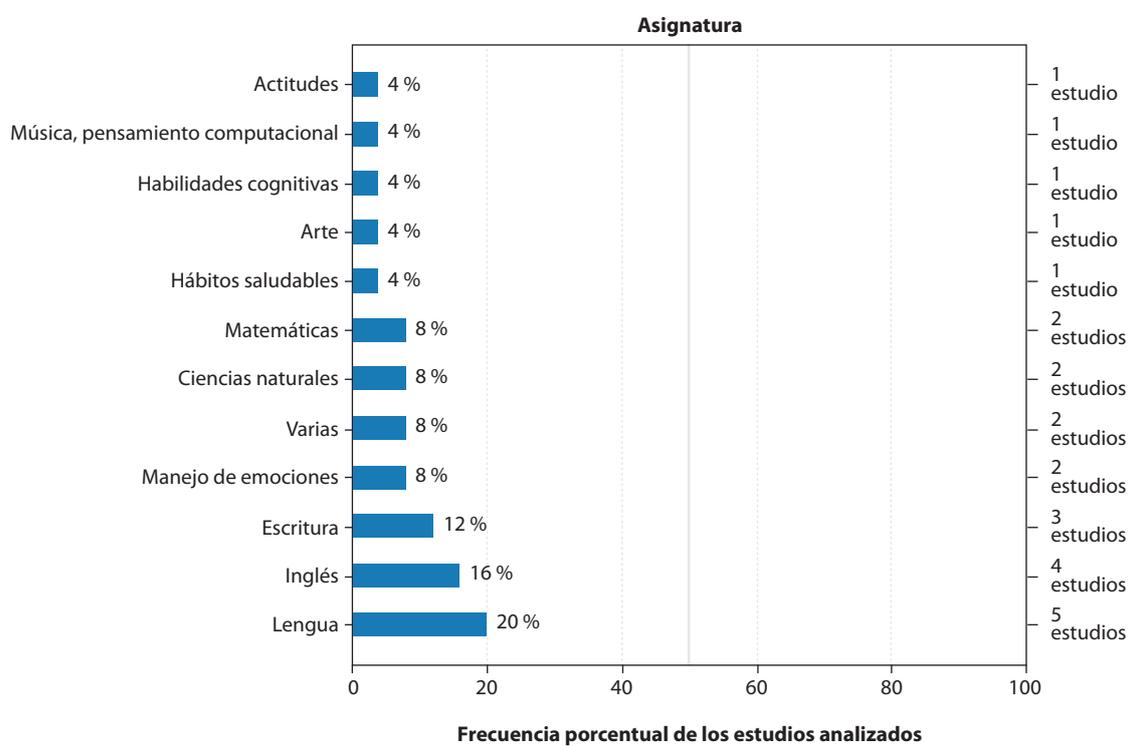
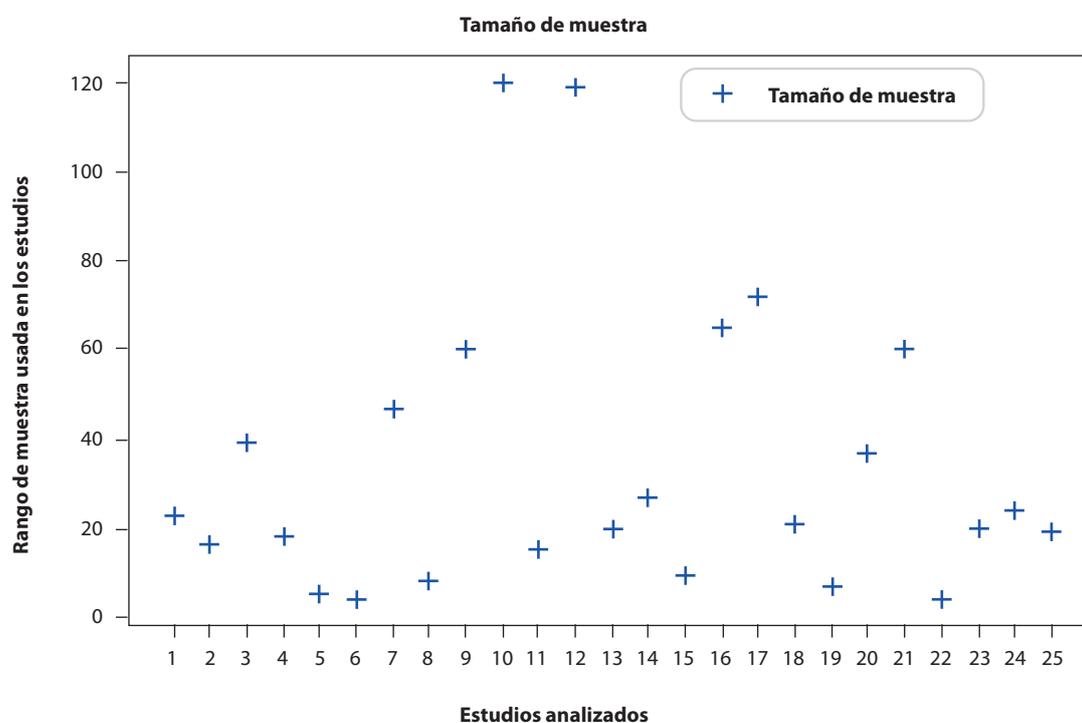


Figura 5. Tamaño de la muestra en cada estudio analizado



Sobre el aspecto técnico de las herramientas digitales, empleadas para llevar a cabo la ludificación, en las gráficas de las figuras 6 y 7 se observó que la mayoría de los estudios consideraron videojuegos que se apoyaron en computadoras o dispositivos móviles.

En muy pocos casos los autores emplearon tecnologías más específicas como realidad aumentada o pizarras inteligentes. Finalmente, la gráfica de la figura 8 sugiere que la categoría de elementos de juego más aplicada por los estudios fue Logro (Progresión). Un 84 % de los estudios empleó esta categoría de una forma u otra, especialmente señalizando el progreso (40 %) del estudiante durante su interacción con la herramienta. Otra categoría que estuvo de manifiesto en las experiencias reportadas fue Microinteracciones (36 %). En esta, los elementos de juego más empleado fueron las animaciones y sonidos. Es notable ver, que ningún elemento de juego relacionado con el tiempo fue considerado por los estudios.

Figura 6. Tipo de *software* usado para LD según los estudios analizados

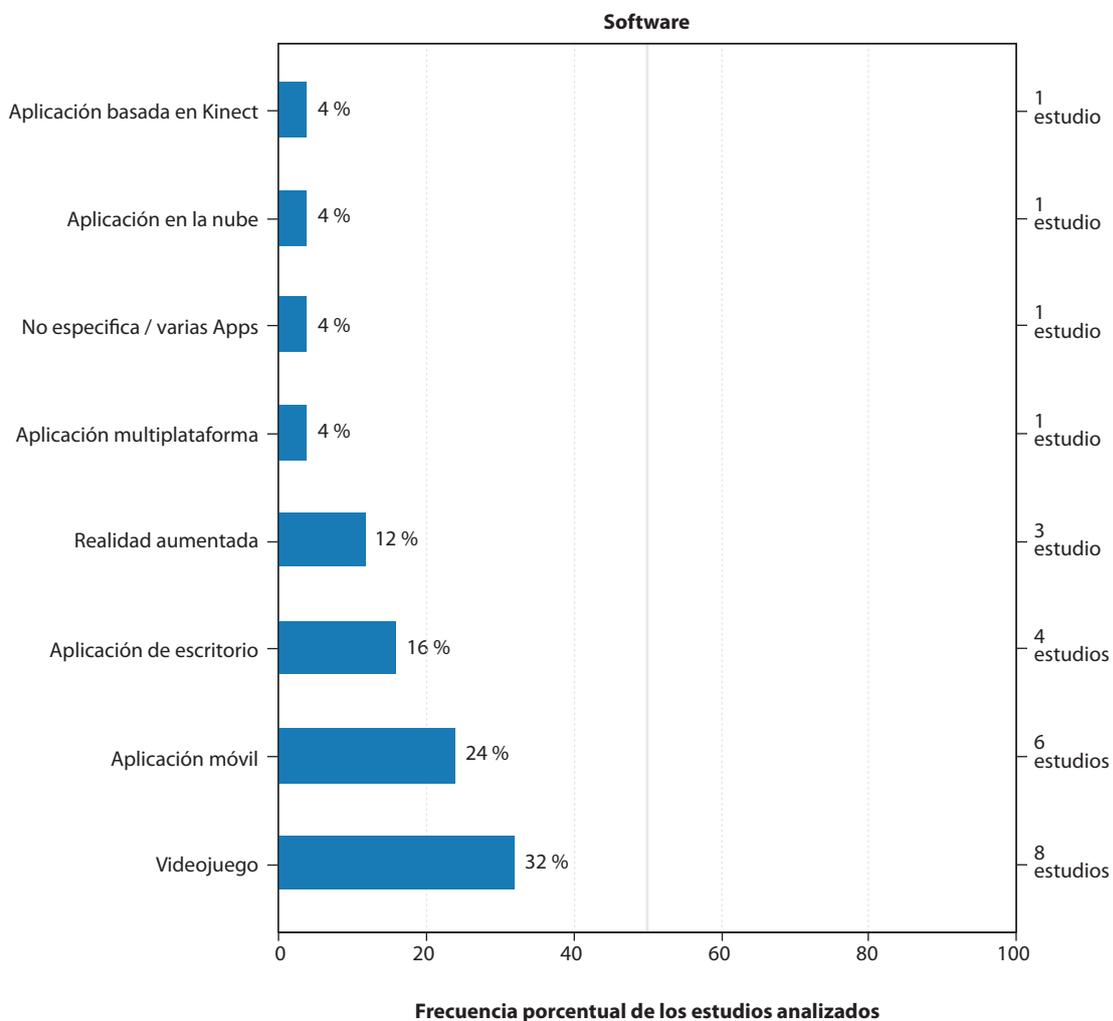


Figura 7. Tipo de *hardware* usado para LD según los estudios analizados

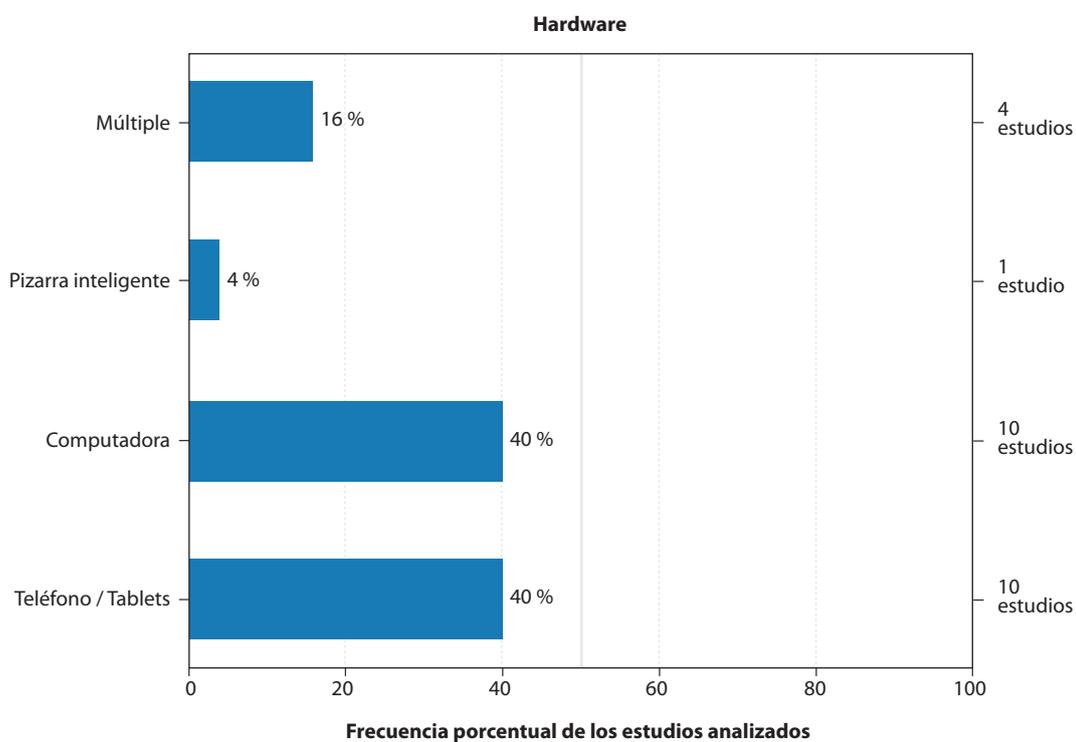
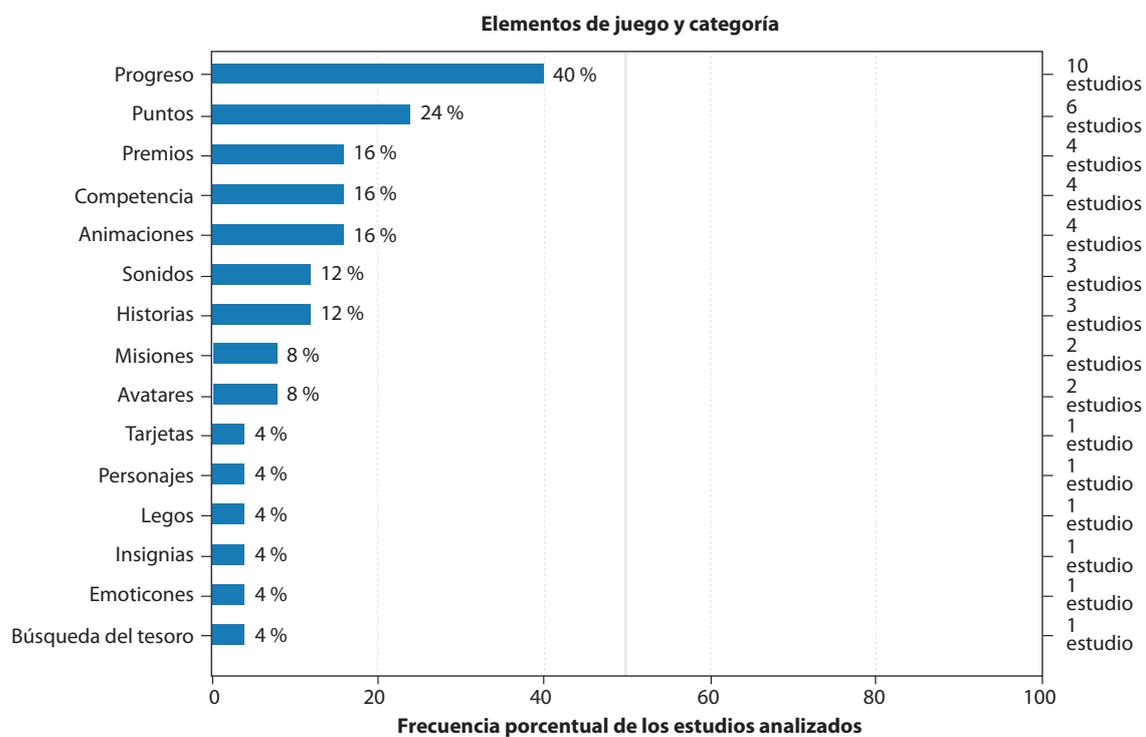


Figura 8. Elementos de juego y categoría usados para LD según los estudios analizados



4.2. Síntesis de los resultados

En este apartado se sintetizaron los resultados solo de los 15 estudios que midieron de una forma u otra, el efecto de sus estrategias basadas en la LD sobre los estudiantes. Esta síntesis, no busca determinar un efecto global debido principalmente a tres razones fundamentales: 1. La escasa cantidad de estudios que realizaron mediciones cuantitativas de los efectos, incluyendo un grupo de control o de referencia temporal; 2. La gran heterogeneidad de técnicas de recolección de datos y estrategias de ludificación empleados por los estudios; y 3. El uso de muestras muy pequeñas para evaluar los efectos. No obstante, es importante mencionar que, desde un punto de vista cualitativo, todos los estudios que midieron algún tipo de efecto reportaron resultados positivos, esto es, a favor del empleo de la LD para mejorar o bien el aprendizaje, o las habilidades sociales, o simplemente la motivación de los niños en edad preescolar. La [tabla 1](#) resume los resultados de estos 15 estudios, considerando si se basaron o no en un grupo de control o referencia temporal de los participantes, así como la principal conclusión o hallazgo.

Tabla 1. Resumen de resultados

Estudio	Grupo de control o referencia	Principales hallazgos o conclusiones
(Zamuner et al., 2017)	Sí	La ludificación es una estrategia viable para aumentar la participación de los preescolares en la investigación.
(Atighi Lorestani y Khalili, 2017)	No	Los resultados sugieren un mayor aprendizaje a través del diseño social ludificado.
(Sasi et al., 2017)	No	El aprendizaje de la lengua inglesa en un entorno de aprendizaje basado en ludificación favorece el proceso de aprendizaje y aumenta la comprensión de los contenidos.
(Ati et al., 2018)	No	La realidad aumentada, combinada con un sonido agradable, hace que el aprendizaje sea más interactivo y agradable.
(Martens et al., 2018)	No	Trabajar directamente con los participantes permitió diseñar específicamente para ellos y con ellos. El resultado final es un producto mejor y más centrado en los niños.
(Zviel-Girshin y Rosenberg, 2018)	No	Los patios de recreo deben ser el entorno preferido de todos los jóvenes digitalizados.
(Bhavnani et al., 2019)	No	Los resultados muestran altos niveles de aceptación y métricas que pueden ser utilizadas para la validación de las evaluaciones cognitivas estándar.
(Rahmah y Siti Aishah, 2019)	Sí	El enfoque de ludificación mejora el proceso de aprendizaje de los preescolares.
(Ongoro y Mwangoka, 2019)	Sí	El método basado en el juego digital es eficaz en la educación preescolar.
(Sudarmilah y Arbain, 2019)	Sí	La intervención del juego "Rhino Hero" hizo que las puntuaciones del CI verbal, el CI de rendimiento y el CI a escala completa aumentaran respectivamente en +0.50, +0.83 y +1.33.
(Riska et al., 2021)	Sí	El juego fomentó el aprendizaje activo y dinámico de los alumnos.
(Oliva-Maza et al., 2021)	Sí	La ludificación basada en tecnologías tangibles para mejorar la conciencia fonológica puede conducir a una mejora de esta capacidad, al tiempo que activa el aprendizaje de habilidades sociales.
(Nicolaidou et al., 2022)	No	Las aplicaciones de ludificación pueden constituir tecnologías eficaces de intervención conductual.
(Torres-Rojas et al., 2022)	No	Los emoticones y avatares son útiles para identificar emociones.

5. Discusión y conclusiones

Con base en los resultados obtenidos, el hecho de que existan pocas investigaciones sobre LD en la educación preescolar es consistente con los resultados reportados recientemente por Arufe-Giráldez et al., (2022) y Marín Suelves et al. (2021). En especial, Arufe-Giráldez et al., (2022) reportaron que en edad preescolar no existen experiencias, en especial en el caso de Educación Física. Estas evidencias, junto con el hecho de que una importante cantidad de estudios estén publicados como actas de congreso, constituyen una clara señal de que se trata de un tema aún en desarrollo, y que ofrece, por tanto, importantes oportunidades de investigación futura.

Desde el punto de vista demográfico, es notable la gran diferencia en cuanto al origen regional de las investigaciones. En concreto, Asia y Europa concentran la gran mayoría de las experiencias reportadas. Hasta donde conocemos, ningún estudio secundario previo había reportado tal hallazgo. Aunque el trabajo de Wang et al. (2020) ya brindaba algunas señales sobre el liderazgo de Asia en esta área del conocimiento.

De manera similar al resultado anterior, aquí se vislumbran oportunidades de investigación que pueden desarrollarse en un futuro cercano. Especialmente, abordando aplicaciones de estrategias o herramientas de LD existentes en regiones y países no considerados aún. Por supuesto, todo esto dependerá de la infraestructura con la que puedan contar los centros escolares. Como bien alertaban Loganathan et al. (2019) y Marín Suelves et al. (2021), la falta de una infraestructura y personal docente adecuados, atentan contra la buena implementación de la LD.

Por otro lado, es notable ver como la mayoría de las contribuciones se basan en la propuesta de una solución tecnológica *ad-hoc* para su contexto en particular. Este patrón es consistente con un área del conocimiento en pleno desarrollo; es decir, en donde se pone mayor énfasis a explorar soluciones en lugar de validar las existentes. Si bien esta fase es necesaria para el desarrollo del tema, también es importante la presencia de estudios de validación o evaluación sobre herramientas que hayan mostrado cierto nivel de efectividad. Todo esto con el objetivo de favorecer una estimación realista del verdadero efecto de la LD en el ámbito preescolar.

El foco principal de los estudios ha sido el aprendizaje. En menor medida, otros autores se enfocaron en mejorar ciertas habilidades sociales de los niños (Nicolaidou et al., 2022; Riska et al., 2021; Torres-Rojas et al., 2022).

Este hallazgo es, en cierta medida, esperable dado que hemos centrado la revisión en el contexto de la educación preescolar. No obstante, al tener en cuenta las asignaturas que fueron objeto de estudio por parte de los investigadores, se puede observar que existe una diversidad apreciable. Puesto que a diferencia de lo que ocurre en la Educación Superior, donde abundan las estrategias aplicadas en Ciencias de la Salud y Ciencias Biológicas (Kalogiannakis et al., 2021), o Ciencias de la Computación (Dichev y Dicheva, 2017). En la edad preescolar las asignaturas están orientadas a conocimientos y habilidades más generales. Consistente con lo reportado recientemente en Arufe-Giráldez et al. (2022), en la revisión no se encontró experiencias que aplicaran LD en Educación Física.

Metodológicamente, persiste igualmente una gran heterogeneidad de enfoques. En cuanto a los diseños, se mantiene la investigación narrativa para presentar sobre todo herramientas digitales que asisten la ludificación. Al mismo tiempo, otros autores han optado por profundizar en el análisis del efecto que estas pueden tener en los estudiantes. Sin embargo, tal y como indican en los resultados, sus conclusiones en su mayoría son cuestionables, o bien por el tama-

ño de la muestra, o por la ausencia de un grupo de control o de referencia. Estos problemas no son inherentes al tema que nos ocupa, Hamari et al. (2014) y Dicheva et al. (2015) realizaron hallazgos similares en revisiones más generales. Sobre el tamaño de la muestra, hay que tener en cuenta que no siempre es posible garantizar una cantidad adecuada de participantes en edad preescolar. Entre otras razones por complejidades que van, desde el propio tamaño del grupo de estudiantes que comparten la misma aula o salón, hasta el consentimiento de padres para que los niños puedan participar en el estudio. De hecho, aunque se lograra contar con una cantidad suficiente, desde el punto de vista del análisis estadístico, las mediciones de los efectos no pueden ser tan objetivas como ocurre en otro rango de edad (p. ej. jóvenes o adultos.). Este es precisamente un elemento que no debe subestimarse de cara a obtener resultados veraces y significativos. En este contexto, quizás más que en otros, enfoques mixtos son necesarios.

Desde el punto tecnológico, aunque en los resultados indican una prevalencia de videojuegos que pueden ejecutarse en plataformas tanto móviles como basadas en computadoras convencionales, se aprecia una gran diversidad de herramientas, esto ya advertían Zainuddin et al. (2020) en un contexto más general. Este es un aspecto igualmente crítico para el éxito de las estrategias basadas en LD. Sobre todo, porque se debe cuidar que la motivación no venga solo del lado de la tecnología, sino de los propios elementos de juego. Además, existen cuestiones complejas a la hora de aplicar y evaluar tecnologías a usuarios de tan corta edad. La recomendación es incluir diseños de tipo *centrado en el niño (child-centered desing)* como el adoptado por Martens et al. (2018), en el que tanto los niños y profesores, participan activamente en el desarrollo de la herramienta.

Consistente con las tecnologías empleadas por la mayoría de los estudios, los elementos de juego que predominaron fueron los de tipo *Logro (Progresión)*. Estos son elementos clave dentro de los videojuegos. No obstante, algunos trabajos reportan que los niños reaccionaron positivamente también a elementos como sonidos y animaciones (Martens et al., 2018; Rahmah y Siti Aishah, 2019). El hecho de que no existan elementos relacionados con el aspecto temporal es en cierta medida comprensible por el nivel cognitivo aún en desarrollo de los niños. En contraste, en los niveles educativos superiores, la competición prevalece y es más común el elemento temporal (Kalogiannakis et al., 2021). Algo similar concluyeron Kalogiannakis et al. (2021) y Arufe-Giráldez et al. (2022), pero en contextos diferentes al mencionado. De manera que queda mucho por hacer de cara a obtener evidencias suficientes de que la LD funciona en edad preescolar. Un primer paso es evidente: adoptar diseños más experimentales y menos de tipo caso de estudio. Sin embargo, advertimos anteriormente, desarrollar experimentos aleatorizados en el contexto de la educación preescolar conlleva varios retos.

Estos hallazgos tienen importantes implicaciones para tres grupos fundamentales de profesionales: investigadores, docentes y administrativos. En el primer caso, las brechas identificadas previamente sirven de oportunidades de investigación futura. En particular, en el desarrollo de investigaciones que no solo apliquen tecnologías aún no exploradas o se basen en poblaciones demográficamente diferentes a las existentes, sino que adopten diseños más orientados a experimentos o cuasiexperimentos (Creswell y Creswell, 2018).

Otro aspecto que hemos visto muy poco desarrollado es la evaluación de la aceptación digital (García-Murillo et al., 2020; Murillo et al., 2021) de las tecnologías de ludificación. En el caso docente, resulta claro que la LD ya se está implementando en la educación preescolar. Sin embargo, las evidencias de su efecto son aún escasas y en algunos casos cuestionables. Por lo

que la sugerencia es que, en caso de aplicar alguna estrategia de LD, esta sea simple (al menos al comienzo) (Rivas et al., 2019; Saltos-Rivas et al., 2021).

En conclusión, el número de estudios obtenidos fue representativo, considerando que en el cribado, se excluyeron el 98.39 % debido a que no se reportaron en su mayoría estudios experimentales de ludificación en educación preescolar o estudios experimentales. Esto quiere decir que el campo de la LD es nuevo y requiere de mayor atención en la ciencia y mejorar la calidad de la educación. También, se considera que el efecto de la LD en la educación preescolar debe ser interpretados con cautela, ya que, existen una gran variedad de métodos para medir estos efectos, en los que no siempre se emplean tamaños de muestra adecuados, o grupos de control o de referencia temporal.

Bibliografía

- Arufe-Giráldez, V., Sanmiguel-Rodríguez, A., Ramos-Álvarez, O., y Navarro-Patón, R. (2022). Gamification in Physical Education: A Systematic Review. *Education Sciences*, 12(8), 540. <https://doi.org/10.3390/educsci12080540>
- Ati, M., Kabir, K., Abdullahi, H., y Ahmed, M. (2018). Augmented Reality Enhanced Computer Aided Learning for Young Children. En *2018 IEEE Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE 2018)* (pp. 129-133). IEEE. 10.1109/ISCAIE.2018.8405457 <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/ISCAIE.2018.8405457>
- Atighi Lorestani, E., y Khalili, M. (2017). How lighting dynamics create social interactive game. *Proceedings of the 19th International Conference on Engineering and Product Design Education: Building Community: Design Education for a Sustainable Future, E and PDE 2017*, 680-685. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85042140667&partnerID=40&md5=5ad7d8a7bdef500ae6a6321adbad23ce>
- Batanero, C. (2001). Introducción a la inferencia. En G. de I. FQM (Ed.), *Didáctica de la Estadística* (1st ed., pp. 15–26). UGR.
- Bhavani, S., Mukherjee, D., Dasgupta, J., Verma, D., Parameshwaran, D., Divan, G., Sharma, K. K., Thiagarajan, T., y Patel, V. (2019). Development, feasibility and acceptability of a gamified cognitive DEvelopmental assessment on an E-Platform (DEEP) in rural Indian pre-schoolers—a pilot study. *Global Health Action*, 12(1). <https://doi.org/10.1080/16549716.2018.1548005>
- Calderón, A., y Ruiz, M. (2015). A systematic literature review on serious games evaluation: An application to software project management. *Computers & Education*, 87, 396-422. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2015.07.011>
- Cladis, A. E. (2020). A shifting paradigm: An evaluation of the pervasive effects of digital technologies on language expression, creativity, critical thinking, political discourse, and interactive processes of human communications. *E-Learning and Digital Media*, 17(5), 341-364. <https://doi.org/10.1177/2042753017752583>
- Creswell, J. W., y Creswell, J. D. (2018). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. SAGE Publications. https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog_609332/objava_105202/fajlovi/Creswell.pdf/
- Dichev, C., y Dicheva, D. (2017). Gamifying education: What is known, what is believed and what remains uncertain: a critical review. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 14(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s41239-017-0042-5>
- Dicheva, D., Dichev, C., Agre, G., y Angelova, G. (2015). Gamification in Education: A Systematic Mapping Study. *Journal of Educational Technology & Society*, 18(3), 75-88. JSTOR. <https://www.jstor.org/stable/jeductechsoci>

- García-Murillo, G., Novoa-Hernández, P., y Rodríguez, R. S. (2020). Technological acceptance of Moodle through latent variable modeling – a systematic mapping study. *Interactive Learning Environments*, 1-17. <https://doi.org/10.1080/10494820.2020.1857786>
- Hamari, J., Koivisto, J., y Sarsa, H. (2014). Does Gamification Work? -A Literature Review of Empirical Studies on Gamification. *2014 47th Hawaii International Conference on System Sciences*, 3025-3034. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2014.377>
- Hebebcı, M. T., y Alan, S. (2021). Gamification in education: An overview of the literature. En A. Csiszárık-Kocsır & P. Rosenberger (Eds.), *Current Studies in Social Sciences 2021* (pp. 174-194). ISRES Publishing.
- Kalogiannakis, M., Papadakis, S., y Zourmpakis, A.-I. (2021). Gamification in Science Education. A Systematic Review of the Literature. *Education Sciences*, 11(1), 22. <https://doi.org/10.3390/educsci11010022>
- Kapp, K. M. (2012). *The Gamification of Learning and Instruction: Game-based Methods and Strategies for Training and Education*. Wiley.
- Loganathan, P., Talib, C. A., Thoe, N., Aliyu, F., y Zawadski, R. (2019). Implementing Technology Infused Gamification in Science Classroom: A Systematic Review and Suggestions for Future Research. *Learning Science and Mathematics*, 14, 60-73.
- Marín Suelves, D., Vidal Esteve, M. I., Donato, D., y Granados Saiz, J. (2021). Análisis del estado del arte sobre el uso de los videojuegos en Educación Infantil y Primaria. *Innoeduca. International Journal of Technology and Educational Innovation*, 7(2), 4-18. <https://doi.org/10.24310/innoeduca.2021.v7i2.11541>
- Martens, M., Rinnert, G. C., y Andersen, C. (2018). Child-centered design: Developing an inclusive letter writing app. *Frontiers in Psychology*, 9(DEC). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02277>
- Mongeon, P., y Paul-Hus, A. (2016). The journal coverage of Web of Science and Scopus: A comparative analysis. *Scientometrics*, 106(1), 213-228. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1765-5>
- Murillo, G. G., Novoa-Hernández, P., y Rodríguez, R. S. (2021). Technology Acceptance Model and Moodle: A systematic mapping study. *Information Development*, 37(4), 617-632. <https://doi.org/10.1177/0266666920959367>
- Nicolaidou, I., Tozzi, F., y Antoniadis, A. (2022). A gamified app on emotion recognition and anger management for pre-school children. *International Journal of Child-Computer Interaction*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.ijcci.2021.100449>
- Oliva-Maza, A., Ayuso-Escuer, N., Coma-Rosello, T., y Torres-Moreno, E. F. (2021). Mystery of the Runaway Letrabytes: Inclusive Assessment of Phonological Awareness with Tangible Gamification. *Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje*, 16(4), 424-432. <https://doi.org/10.1109/RITA.2021.3136442>
- Ongoro, C. A., y Mwangoka, J. W. (2019). Effects of digital games on enhancing language learning in Tanzanian preschools. *Knowledge Management and E-Learning*, 11(3), 325-344. <https://doi.org/10.34105/j.kmel.2019.11.017>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *Systematic Reviews*, 10(1), 89. <https://doi.org/10.1186/s13643-021-01626-4>
- Peled, S., y Schocken, S. (2014). Mobile learning and early age mathematics. *Proceedings of the 10th International Conference on Mobile Learning 2014, ML 2014*, 19-25. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84944128737&partnerID=40&md5=1e6a331eec84e4ca6d4d29eecb4c45ea>. ISBN: 978-989-8704-02-3/
- Plass, J. L., Mayer, R. E., y Homer, B. D. (2020). *Handbook of Game-Based Learning*. MIT Press. <https://books.google.es/books?id=5NCMEAAAQBAJ>
- Portela Iglesias, M. A., y García Fernández, G. (2017). Digital peer-assessment activities: students as the heroes of a transition from content consumers to creators of significative learning. En L. Chova,

- A. Martinez, y I. Torres (Eds.), *INTED2017: 11TH international technology, education and development conference* (pp. 1705-1714). IATED-INT Assoc Technology Education & Development. <https://doi.org/10.21125/inted.2017.0530>.
- Rahmah, M., y Siti Aishah, Z. (2019). Effectiveness of kinect-based application in gamification approach for preschooler: Case study in Taska Permata Perpaduan, Kuantan, Pahang, Malaysia. *ACM International Conference Proceeding Series*, 124-129. <https://doi.org/10.1145/3306500.3306534>
- Riska, N., Handini, M. C., Asmawi, M., y Jarudin. (2021). Instructional-based Gamification in Improving Knowledge in Early Childhood. *International Journal of Early Childhood Special Education*, 13(2), 948-958. <https://doi.org/10.9756/INT-JECSE/V13I2.211138>
- Rivas, R. S., Novoa-Hernández, P., y Rodríguez, R. S. (2019). Evaluation of the presence of digital competences in higher education institutions | [Evaluación de la presencia de competencias digitales en las instituciones de educación superior en América Latina]. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, 2019(E21), 23-36. <https://doi.org/10.20511/pyr2019.v7n2.329>
- Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2000). Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being. *American Psychologist*, 55(1), 68-78. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.55.1.68>
- Saltos-Rivas, R., Novoa-Hernández, P., & Serrano Rodríguez, R. (2021). On the quality of quantitative instruments to measure digital competence in higher education: A systematic mapping study. *PLOS ONE*, 16(9), e0257344. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257344>
- Sasi, S., Chang, M., Altinay-Aksal, F., Kayimbasioglu, D., Haci, H., Kinshuk, y Altinay-Gazi, Z. (2017). Technology enhanced instruction: An example of english language learning in the context of peace. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 13(6), 1605-1614. <https://doi.org/10.12973/eurasia.2017.00687a>
- Schocken, S., y Kupferman, R. (2018). USING GAMES TO LEARN EARLY AGE ALGEBRA. En L. Chova, A. Martinez, & I. Torres (Eds.), *edulearn18: 10th international conference on education and new learning technologies* (pp. 10344-10353). IATED-INT Assoc Technology Education & Development.
- Subhash, S., y Cudney, E. A. (2018). Gamified learning in higher education: A systematic review of the literature. *Computers in Human Behavior*, 87, 192-206. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.05.028>
- Sudarmilah, E., y Arbain, A. F. B. (2019). Using gamification to stimulate the cognitive ability of preschoolers. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(6), 1250-1256.
- Torres-Rojas, I. S., Garcés-Bolaños, Y. S., y León Blanco, D. A. (2022). Development of an M-Learning application for early childhood education in emotional consciousness [Desarrollo de una aplicación M-Learning para educar en conciencia emocional a la primera infancia]. *Gaceta Médica de Caracas*, 130, S779-S790. <https://doi.org/10.47307/GMC.2022.130.s3.31>
- Wang, J., Song, Q., Gao, S., y Tao, Y. (2020). A Systematic Review of Game Learning Research in China. En X. Fang (Ed.), *HCI in Games* (Vol. 12211, pp. 486-502). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50164-8_36
- Zainuddin, Z., Chu, S. K. W., Shujahat, M., y Perera, C. J. (2020). The impact of gamification on learning and instruction: A systematic review of empirical evidence. *Educational Research Review*, 30, 100326. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2020.100326>
- Zamuner, T. S., Kilbertus, L., y Weinhold, M. (2017). Game-influenced methodology: Addressing child data attrition in language development research. *International Journal of Child-Computer Interaction*, 14, 15-22. <https://doi.org/10.1016/j.ijcci.2017.09.001>
- Zualkernan, I. A., Aloul, F., Algebail, E., Refaay, M. E., Ali, A., y Sabaa, O. E. (2020). Little genius: An experiment in internet of tangible learning things. *Proceedings - IEEE 20th International Conference on Advanced Learning Technologies, ICALT 2020*, 69-71. <https://doi.org/10.1109/ICALT49669.2020.00028>
- Zviel-Girshin, R., & Rosenberg, N. (2018). Educational Technology for Pre-K Digizens. *ACM International Conference Proceeding Series*, 30-34. <https://doi.org/10.1145/3234825.3234840>

Tabla A1. Estudios incluidos en la revisión y sus características demográficas y metodológicas

Estudio	Tipo de public.	País	Cont.	Herr.	Investig.	Mues.	Asignatura	Software	Hardw.	Objetivo	Elementos de juego
(Peled y Schocken, 2014)	Acta	Israel	Asia	No	Investigación narrativa	0	Matemática	Aplicación móvil	Teléfonos/ Tablets	Aprendizaje	Avatares, Insignias
(Zamuner et al., 2017)	Artículo	Canadá	América	No	Experimental, quasi-experimentos	16	Lengua	Aplicación de escritorio	Computadora	Aprendizaje	Animaciones, Metas
(Atighi Lorestani y Khalili, 2017)	Acta	Irán	Asia	Sí	Caso de estudio	39	Ciencias naturales	Videojuego	Pizarra Inteligente	Aprendizaje	Insignias, Puntos, Tarjetas
(Sasi et al., 2017)	Artículo	Chipre	Europa	Sí	Caso de estudio	18	Inglés	Videojuego	Computadora	Aprendizaje	Puntos
(Ati et al., 2018)	Acta	Emiratos Árabes Unidos	Asia	No	Caso de estudio	5	Escritura	Realidad aumentada	Teléfonos/ Tablets	Aprendizaje	Progreso
(Martens et al., 2018)	Artículo	Eslovenia	América	Sí	Mixto, secuencial exploratorio	4	Escritura	Aplicación móvil	Teléfonos/ Tablets	Aprendizaje	Animaciones
(Cerrato et al., 2017)	Capítulo	Italia	Europa	Sí	Investigación narrativa	0	Actitudes	Videojuego	Computadora	Motivación	Avatares, Historias, Premios
(Zviel-Girshin y Rosenberg, 2018)	Acta	Israel	Asia	No	Investigación narrativa	8	Varias	Videojuego	Computadora	Aprendizaje	Animaciones, Progreso
(Baratè et al., 2019)	Acta	Italia	Europa	Sí	Investigación narrativa	0	Música y Pensamiento Computacional	Videojuego	Computadora	Aprendizaje	Legos
(Bhavnani et al., 2019)	Artículo	India	Asia	Sí	Mixto, secuencial explicativo	120	Habilidades cognitivas	Aplicación móvil	Teléfonos/ Tablets	Aprendizaje	Progreso
(Rahmah & Siti Aishah, 2019)	Acta	Malasia	Asia	Sí	Mixto, secuencial explicativo	15	Lengua	Aplicación basada en Kinect	Múltiple	Aprendizaje	Sonidos
(Ongoro y Mwangoka, 2019)	Artículo	Tanzania	África	Sí	Experimental, quasi-experimentos	119	Lengua	Aplicación de escritorio	Computadora	Aprendizaje	Sonidos, Puntos
(Kim et al., 2019)	Artículo	USA	América	No	Experimental, experimentos puros	27	Lengua	Videojuego	Teléfonos/ Tablets	Aprendizaje	Progreso, Premios
(Sudarmilah y Arbain, 2019)	Artículo	Indonesia	Asia	Sí	Experimental, quasi-experimentos	9	Varias	Aplicación de escritorio	Computadora	Aprendizaje	Progreso
(Permanasari et al., 2020)	Acta	Indonesia	Asia	Sí	Investigación narrativa	0	Ciencias naturales	Realidad Aumentada	Teléfonos/ Tablets	Aprendizaje	Puntos, Animaciones, Progreso, Tarjetas
(Tamtama et al., 2020)	Artículo	Indonesia	Asia	Sí	Investigación narrativa	0	Inglés	Aplicación móvil	Teléfonos/ Tablets	Aprendizaje	Puntos, Competencia, Premios
(Sarr et al., 2020)	Acta	Senegal	África	Sí	Investigación narrativa	0	Escritura	Aplicación móvil	Teléfonos/ Tablets	Aprendizaje	Puntos
(Zuolkernan et al., 2020)	Acta	Emiratos Árabes Unidos	Asia	Sí	Caso de estudio	7	Matemática	Aplicación en la nube	Múltiple	Aprendizaje	Progreso
(Fedusenko et al., 2021)	Artículo	Ucrania	Europa	Sí	Investigación narrativa	0	Inglés	Videojuego	Computadora	Aprendizaje	Progreso, Historias
(Riska et al., 2021)	Artículo	Indonesia	Asia	No	Experimental, experimentos puros	60	Hábitos saludables	No especificada (varias Apps)	Múltiple	Habilidades sociales	Puntos, Progreso, Insignias, Premios, Misiones, Competencia
(Oliva-Maza et al., 2021)	Artículo	España	Europa	Sí	Caso de estudio	4	Lengua	Videojuego	Computadora	Aprendizaje	Misiones, Puntos, Animaciones
(Nicolaidou et al., 2022)	Artículo	Chipre	Europa	Sí	No experimental, correlacional transversal	20	Manejo de emociones	Aplicación móvil	Teléfonos/ Tablets	Habilidades sociales	Premios, Progreso, Personajes
(Torres-Rojas et al., 2022)	Artículo	Colombia	América	Sí	Caso de estudio	24	Manejo de emociones	Aplicación multiplataforma	Múltiple	Habilidades sociales	Sonidos, Emoticonos, Progreso, Premios, Competencia
(Sandoval et al., 2022)	Acta	México	América	Sí	Investigación narrativa	0	Inglés	Aplicación de escritorio	Computadora	Aprendizaje	Historias, Avatares

Anexos bibliográficos

- Baratè, A., Ludovico, L. A., y Mauro, D. A. (2019). A web prototype to teach music and computational thinking through building blocks. *ACM International Conference Proceeding Series*, 227-230. <https://doi.org/10.1145/3356590.3356625>
- Cerrato, A., Ferrara, F., Ponticorvo, M., Sica, L. S., di Ferdinando, A., y Miglino, O. (2017). DILIGO assessment tool: A smart and gamified approach for preschool children assessment. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 75, 235-244. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59451-4_23
- Fedusenko, O., V., Domanetska, I. M., y Semeniuk, D. Y. (2021). Development of a Computer Game With Voice Interface for Learning English by Preschool Children. En *Information Technologies and Learning Tools* (vol. 85, n.º 5, pp. 95-117). Natl acad pedagogical sciences ukraine, inst info technol & learning tools. <https://doi.org/10.33407/itlt.v85i5.4306>
- Kim, J. S., Asher, C. A., Burkhauser, M., Mesite, L., y Leyva, D. (2019). Using a Sequential Multiple Assignment Randomized Trial (SMART) to Develop an Adaptive K-2 Literacy Intervention with Personalized Print Texts and App-Based Digital Activities. *AERA Open*, 5(3). <https://doi.org/10.1177/2332858419872701>
- Permanasari, A. E., Hidayah, I., Priyowibowo, F. M., Hidayat, M. A., Prayoga, F. B., y Sulistyaningrum Sakkinah, I. (2020). An Augmented Reality Application for Animal Learning Media at Alian Butterfly Park. *Proceedings - 2020 6th International Conference on Science and Technology, ICST 2020*. <https://doi.org/10.1109/ICST50505.2020.9732881>
- Sandoval, E. B., Rojas, D. V., Cereceres, C. A. P., Rios, A. A., Barde, A., y Billinghamurst, M. (2022). Prototyping a Virtual Agent for Pre-school English Teaching. *Proceedings - 2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops, VRW 2022*, 658-659. <https://doi.org/10.1109/VRW55335.2022.00180>
- Sarr, J. M. A., Yannakakis, G. N., Liapis, A., Bah, A., y Cambier, C. (2020). Djehuty: A Mixed-Initiative Handwriting Game for Preschoolers. *ACM International Conference Proceeding Series*. <https://doi.org/10.1145/3402942.3403030>
- Tamtama, G. I. W., Suryanto, P., y Suyoto. (2020). Design of english vocabulary mobile apps using gamification: An Indonesian case study for kindergarten. *International Journal of Engineering Pedagogy*, 10(1), 105-162. <https://doi.org/10.3991/ijep.v10i1.11551>
- Zualkernan, I. A., Aloul, F., Algebail, E., Refaay, M. E., Ali, A., Sabaa, O. E. (2020). Little genius: An experiment in internet of tangible learning things. *Proceedings-IEEE 20th International Conference on Advanced Learning Technologies, ICALT 2020*, 69-71. <https://doi.org/10.1109/ICALT49669.2020.00028>

Adaptability of regression algorithms to the behavior of protein plants

(Adaptabilidad de algoritmos de regresión al comportamiento de las plantas proteicas)

Pedro M. Estrada-Jiménez¹; Hernán A. Uvidia-Cabadiana²; Rocío del Carmen Herrera-Herrera³, Luís G. Hernández-Montiel⁴; Danis M. Verdecia-Acosta⁵; Jorge L. Ramírez-de la Ribera⁶; Pedro J. Noguera-López⁷; Edilberto Chacón-Marcheco⁸

Abstract

The behavior of components of protein plant is of vital importance for animals that consume them in their diet. The objective of this research is to evaluate regression algorithms, to determine the behavior of the expressions that best adapt to the procedures of a traditional laboratory and to estimate the chemical components of protein plants, in this sense the MULAN library of java has been used, that contain automatic learning algorithms capable of adapting to dissimilar problems. Three data set were created for each species treated in this study; each of these include the main elements to be evaluate in each experiment, these are delimitings by: secondary metabolites, cell wall components and digestibility element for training files one, two and three, respectively; subsequently, they were evaluated through learning supervised and cross-validation of each to determine the best fit by aRMSE (Average Root Mean Square Error). The learning results were compare with previous experiments, where there was a learning variant that contained in a single dataset all the components to be evaluates in a single prediction. The result of the comparison shows that the lazy algorithms based on instances have a better learning behavior than the others evaluate.

Keywords

Secondary metabolites; regression models, cell wall; nutritional value

Resumen

El comportamiento de los componentes de las plantas proteicas es de vital importancia para los animales que los consumen en su dieta. La presente investigación tiene como objetivo evaluar algoritmos de regresión para determinar la conducta de las expresiones que mejor se adaptan a los procedimientos de un laboratorio tradicional y estimar los componentes químicos de plantas proteicas, en este sentido, se ha utilizado la biblioteca MULAN de java, que contiene algoritmos de aprendizaje automático capaces de adaptarse a disímiles problemas. Para ello, se crearon tres conjuntos de datos para cada especie estudiada en este trabajo; cada uno de estos incluye los elementos principales a ser evaluados en cada experimento, que están delimitados por: Metabolitos secundarios, componentes de la pared celular y digestibilidad para los ficheros de entrenamiento uno, dos y tres, respectivamente. Posteriormente, fueron evaluados por medio del aprendizaje supervisado y una validación cruzada de cada uno para determinar el mejor ajuste por aRMSE (Error cuadrático medio de la raíz). Los resultados del aprendizaje fueron comparados con experimentos anteriores, donde se tenía una variante de aprendizaje que contenía en un solo dataset todos los componentes a evaluar en una sola predicción. El resultado de la comparación muestra que los algoritmos vagos basados en instancias tienen un mejor comportamiento en el aprendizaje que los otros evaluados.

Palabras clave

Metabolitos secundarios; modelos de regresión, pared celular; valor nutritivo.

- 1 Universidad de Granma, Cuba [pestrada@udg.co.cu, <https://orcid.org/0000-0001-8759-9500>]
- 2 Universidad Estatal Amazónica, Ecuador [huvia@uea.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0002-2961-6963>]
- 3 Universidad Nacional de Loja, Ecuador [rocio.herrera@unl.ec, <https://orcid.org/0000-0002-4136-4746>]
- 4 Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, Baja California Sur, México [lhernandez@cibnor.mx, <https://orcid.org/0000-0002-8236-1074>]
- 5 Universidad de Granma, Cuba [dverdeciaacosta@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4505-4438>]
- 6 Universidad de Granma, Cuba [jramirezrivera1971@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0956-0245>]
- 7 Universidad de Granma, Cuba [pedrojnl88@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0966-5266>]
- 8 Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador. [edilberto.chacon@utc.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0001-9590-6451>]

1. Introduction

The study of the nutrient components of plants used for animal feed has gained importance in scientific research with the aim of improving nutrition in both ruminants and non-ruminants. The different applications of artificial intelligence in the different fields of life and science are an advance in research. Solutions in medicine with contributions in most specialties can be mentioned, as in the case of application development in the field of imaging where there is software that makes use of pattern recognition to detect pathological anomalies (Verdecia et al., 2018).

The protein plants used in animal nutrition are of great importance for the livestock community as a substitute for concentrates that are becoming more expensive every day. Within these the so-called of excellence reach more relevance every day among farmers for their properties; that is why it is necessary to know the behavior of its components in order to form a quality diet (Díaz et al., 2007; Otegui & Totaro, 2007; Alonso-Peña, 2011; Verdecia et al., 2018). Hence, it is important that several authors dedicate time and resources to the investigation of the behavior of metabolites, components of the cell wall and digestibility of these plants used in livestock (Rincón-Tuexi et al., 2006; Ramírez-Lozano, 2010; T. Ruiz et al., 2011; T. E. Ruiz et al., 2014).

Agriculture is currently committed to the so-called efficient agriculture, which is the one that is equipped with research and applications in the field of artificial intelligence to improve yields. In the present research, the lazy algorithms are analyzing with the learning bases of four plant varieties to determine which of these algorithms is better adapted when simulating the laboratory results in the determination of secondary metabolites, cell wall components and quality components of the species under study (Herrera et al., 2017).

Meat and milk production in ruminants is conditions using forage plants in their diet. In the tropics, the use of leguminous has increased in search of better production indicators, as well as other feeding alternatives, obtaining indicators similar to conventional systems in several cases (Mahecha & Rosales, 2005; Mahecha et al., 2007). Forage plants, beyond being one of the main and excellent components in ruminant nutrition, offer various advantages, among which it is worth noting that they prevent soil erosion, maintain humidity, and provide organic matter; *Gliricidia sepium*, *Erythrina variegata*, *Leucaena leucocephala* and *Tithonia diversifolia* are among those preferred and used in the tropics (Cabrera, 2008).

The aim of the present research is based on the prediction of the phytochemical components, cell wall components and digestibility of four varieties of protein plants. For this, the adaptability of the multiple regression algorithms to the database provided by the specialists in pastures and forages of the University of Granma has been determined as the main problem.

In previous research, many regressive algorithms have been tested in order to evaluate their behavior with the databases obtained. The result of these analyses has shown that lazy algorithms are the ones that best adapt to these data (Barrios et al., 2015).

The present research studies the lazy algorithms present in the MULAN (Tsoumakas et al., 2011) library developed by the University of Waikato. In this, the aRMSE (Average Root Mean Square Error) is evaluate as the main performance measure to determine the one that best suits the database. The peculiarity of these types of algorithms is that since they work with little data, they are then base on the probability that an object may resemble another to estimate or predict a value. Hence, the objective of this research is to evaluate regression algorithms, to determine the behavior of the expressions that best adapt to the procedures of a traditional laboratory and to estimate the chemical components of protein plants, in this sense the MULAN

library of java has been used, that contain automatic learning algorithms capable of adapting to dissimilar problems.

2. Metodology

Regression and Classification Task

The one a most important problem into the Machine Learning is define a type of solutions. Is necessary to have a count the types of variables or types of the data into the data set (Alzubi et al., 2018; Coraddu et al., 2016; González, 2015). Thus is very important to define the types of machine learning tasks. To give solutions to the problem firstly we define a classification and regression:

- Classification is the task of predicting a discrete class label.
- Regression is the task of predicting a continuous quantity.

There is some overlap between the algorithms for classification and regression, for example:

- A classification algorithm may predict a continuous value, but the continuous value is in the form of a probability for a class label.
- A regression algorithm may predict a discrete value, but the discrete value in the form of an integer quantity.

Some algorithms can be used for both classification and regression with small modifications, such as decision trees and artificial neural networks (Alebele et al., 2020), (Mastelini et al., 2020). Some algorithms cannot, or cannot easily be used for both problem types, such as linear regression for regression predictive modeling and logistic regression for classification predictive modeling. Importantly, the way that we evaluate classification and regression predictions varies and does not overlap, for example:

- Classification predictions can be evaluated using accuracy, whereas regression predictions cannot.
- Regression predictions can be evaluated using root mean squared error, whereas classification predictions cannot.

Multi-Target Regression task

In Machine Learning to predict a vector of values of any task, first it is need give to the model a dataset with all examples to system to create with this a system, it is composing to three steps, training, evaluation the training task to define the quality of the model, later to test a model given a vector of real values to obtain a vector of real values that affect a result of prediction (Džeroski et al., 2000; Despotovic et al., 2016; Waegeman et al., 2019; Chen et al., 2021).

The learning process are realized using a learning algorithm. They algorithms are capable to the learn to the dataset to return a vector result. There are many algorithms, it are classify in based on rules, based on decision tree, lazy, vector regression, etc, each one with its specific characteristics (Nogueira & Koch, 2019).

At present, the problems solved by means of regression have reached high levels of applicability. In various life scenarios, these are decision-makers in the behavior of systems or help in rational decision-making. Current models have reached levels of complexity by having problems where several dependent and several independent variables concur, a challenge that has drawn significant attention from researchers. Among the most current regression techniques is the Multiple Target Regression (MTR) where the main task is to simultaneously predict each objective variable from several independent variables.

Among the latest contributions to this technique is the proposal by (Borchani et al., 2015) that establishes two forms or ways of solution according to the approach of the problem. The problems of transformation of the problem and those of adaptation of the method are then raised (Chen et al., 2021). These differ by themselves in exploiting the interrelationship between variables to make a prediction. Adaptation-based problems take into account the relationships between the output variables, while transformation-based problems decompose the multi-objective problem into several output variables (Fang et al., 2015; Zhang et al., 2017; Zhen et al., 2017; Wang et al., 2018; Joshi et al., 2020).

According to Spyromitros-Xioufis et al., (2016), when an MTR problem is modeled, it is taken into account that the input is made up of two vectors, one input X and the other output Y , where each one consists of n variables, one X can then be defined as a set of input variables x_1, \dots, x_i and Y as the set of target variables Y_1, \dots, Y_j , therefore vectors can then be defined as $X = [x_1, \dots, x_i]$ and $Y = [Y_1, \dots, Y_j]$.

Once an MTR model is conceived, it is evaluated to verify to what extent it fits the training data. Learning in a model of this type is carried out precisely with the use of regressive algorithms so that the model learns from the knowledge base and then can predict a given value. To evaluate a model, then, one of the methods used is cross validation (Kohavi, 1995; Refaeilzadeh et al., 2016; Berrar, 2019).

Cross validation or cross-validation is a technique used to evaluate the results of a statistical analysis and ensure that they are independent of the partition between training and test data. It consists of repeating and calculating the arithmetic mean obtained from the evaluation measures on different partitions. It is used in environments where the main objective is prediction and the accuracy of a model that will be carried out in practice is to be estimated. It is a technique widely used in artificial intelligence projects to validate generated models. Cross-validation is a way to predict the fit of a model to a hypothetical set of test data (Refaeilzadeh et al., 2016; Berrar, 2019).

Regression algorithms

The regressor algorithms studied in this research are found in the WEKA library, these are:

The IBk algorithm does not build a model, instead it generates a prediction for a test instance just-in-time. The IBk algorithm uses a distance measure to locate k instances in the training data for each test instance and uses those selected instances to make a prediction (Amin & Habib, 2015).

Locally Weighted Regression (LWL) or LOWESS. LOESS or LOWESS are nonparametric regression methods that combine multiple regression models in k -nearest-neighbor based model. Most of the algorithms such as classical feedforward neural network, support vector machines, nearest neighbor algorithms etc (Cambronero & Moreno, 2006; Mariño, 2015).

The principal difference of K* against other IB algorithms is the use of the entropy concept for defining its distance metric, which is calculated by mean of the complexity of transforming an instance into another; so it is taken into account the probability of this transformation occurs in a random walk away manner. The classification with K* is made by summing the probabilities from the new instance to all of the members of a category (Cleary & Trigg, 1995).

This must be done with the rest of the categories, to finally select that with the highest probability (Barrios et al., 2015).

Regression metrics of evaluation

Now, to evaluate regression models are exists some metrics:

Root Mean Square Error (RMSE) is the standard deviation of the residuals (prediction errors). Residuals are a measure of how far from the regression line data points are; RMSE is a measure of how to spread out these residuals are. In other words, it tells you how concentrated the data is around the line of best fit.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (Predicted_j - Current_j)^2}$$

one way to assess how well a regression model fits a dataset is to calculate the root mean square error, which is a metric that tells us the average distance between the predicted values from the model and the actual values in the dataset (Despotovic et al., 2016).

Average Root Mean Square Error (Average RMSE) is the average of the RMSE of the data set.

$$AverageRMSE = \frac{\sum_{j=1}^n MSE}{n}$$

Relative Root Mean Squared Error (RRMSE) this indicator is calculate by dividing RMSE with average value of measured data. (Despotovic et al., 2016).

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (Predicted_j - Actual_j)^2}}{\sum_{j=1}^n Actual_j} 100$$

Mean Absolute Error (MAE) is the magnitude of difference between the prediction of an observation and the true value of that observation. MAE takes de average of absolutes errors for a group of predictions and observations as a measurement of the magnitude of errors for the entire group.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |Predicted_j - Current_j|$$

Average Mean Absolute Error (Average MAE) is the average of the MAE of the data set.

$$AverageMAE = \frac{\sum_{j=1}^n MAE}{n}$$

Relative Mean Absolute Error (Relative MAE) represents the ratio of the error between the measured value and the predicted dataset to the measured value of all the points (Li et al., 2018).

$$RelativeMAE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{|Predicted_j - Current_j|}{Predicted_j}$$

Average Relative Absolute Error (Average Relative MAE) is the average of the RMSE of the data set.

$$AverageRelativeMAE = \frac{\sum_{j=1}^n MAE_j}{n}$$

3. Results and discussion

Because the principal objective of the research is based on to, find the algorithm that shows the best results in learning the databases of the treated species, all the algorithms in the MULAN library were tested to observe the learning behavior of the algorithms. For this task, were selected all algorithms can be used on regression problems. We specifically focused on instance-based ones, because in previous research these are show the best results in learning. The results showed in the next table, reflect the learning of the algorithms put in competition, that showed a better performance in learning were the lazy algorithms, in this case only the IBK and KStar algorithms was tested, the result is because they are instance-based algorithms, they can work with little data and use the probability that one object is similar to another to predict values given an input. In the case of predicting a numerical value, it is express in the way that a number can be approach to another, for this are used the approximation measures, as the nearest neighbor technique used by IBK while the measure used by KSTAR is based on the relative entropy between objects.

Table 1: Results of learning of machine learning

Algorithm	Erythrina variegata			Gliricidia sepium		
	Train 1	Train 2	Train 3	Train 1	Train 2	Train 3
M5P	0.6344	0.4075	3.6233	0.8816	1.2631	1.4116
M5PRULER	0.4004	0.2912	5.7588	0.6733	1.1885	1.2510
LINEARREGRESSION	0.1893	0.6994	24.9956	1.0639	0.9014	2.0969
IBK	0.0803	0.0809	0.1404	0.0957	0.8193	0.1498
KSTAR	0.0752	0.0809	0.1226	0.0823	0.7216	0.1369
ZERO	5.4043	1.9451	6.6927	6.3610	3.0554	5.4754
KSVM	0.2155	0.1556	0.4791	0.7948	1.0604	0.6712
SMOREG	0.3559	0.8400	5.4309	1.4938	1.2586	0.4980
DS	1.6679	1.1915	2.4516	2.4842	2.0812	3.5238

Algorithm	Erythrina variegata			Gliricidia sepium		
	Train 1	Train 2	Train 3	Train 1	Train 2	Train 3
MP	0.1122	0.1071	0.9798	0.2292	1.0130	0.3179
GP	1.2388	0.7448	3.7722	1.9998	1.3003	1.7266
RT	0.1785	0.2200	0.6036	0.4012	1.0413	0.8650
	Leucaena leucocephala			Tithonia diversifolia		
M5P	0.9367	0.8492	1.0961	0.1682	0.4329	1.0953
M5PRULER	0.5168	0.5157	0.9820	0.1170	0.3033	0.8341
LINEARREGRESSION	1.0316	1.0990	1.3070	0.1533	0.6576	1.5512
IBK	0.1115	0.0775	0.2271	0.0783	0.1068	0.1426
KSTAR	0.0893	0.0775	0.2257	0.0733	0.1068	0.1210
ZERO	4.5769	2.6097	4.4963	1.8289	2.5271	5.1321
K SVM	0.2565	0.2482	0.6244	0.1064	0.1954	0.5048
SMOREG	1.4007	1.4061	0.6379	0.1572	0.7590	0.8611
DS	2.9063	1.7746	2.5740	0.9467	1.1404	2.7933
MP	0.1318	0.1288	0.3835	0.0889	0.1392	0.4133
GP	1.6843	1.2084	1.4599	0.3435	0.8445	0.8441
RT	0.2217	0.2559	1.2949	0.1150	0.2516	0.5714

In the table 1, includes results of a study of the regressor algorithms of the MULAN tool, in this all were put to compete, to observe the learning behavior for each database of all of the species' studies. As previously explained, in this case the ones that showed the best results were those based on instances (IBK and KSTAR). In this case, was created three databases for each species, that respond to secondary metabolites, cell wall components and digestibility, all algorithms were tested on each database of each variety. Hence, the instance-based algorithms (IBK and KSTAR) are the ones that showed the best performance in learning with databases. This is since they learn from previous cases and with the use of distance measurements between two points (protein values, digestibility and composition of the cell wall) to be able to predict the real values of the different constituents of the nutritional value of each one of the forage species or protein plants studied.

Pascual et al. (2016) when using artificial neural networks to estimate the components of yield and nutritional value of three species of pasture grasses. The use of this technique through a multilayer perceptron network, which allowed estimating these indicators for the first time in Cuba, from databases for learning with information collected from scientific publications and data from referenced laboratories of the Humboldt University, Germany. Studies that served as the basis for our research since, despite being neural networks and regression models, the most recommended ways when you want to predict a numerical value from the set of real va-

lues. From the comparison of the two solutions in our study, better values were obtained with the regression models of multiple objectives. These results are because the networks during the learning process can appear the so-called false positives, which generates an over-prelearning of the model. In these models based on neural networks, it is very complex to control the internal process and the interaction between the neurons that make up the model, which is why it is often unlikely to detect an over-learning phenomenon.

While, Estrada-Jiménez et al. (2018), through a comparison between the regressor algorithms of the WEKA tool, they reported that the estimation of the phytochemical components of *Leucaena leucocephala* and *Tithonia diversifolia* from the variables of climate, rebound age and primary compounds (nitrogen and sugars) products of the photosynthetic activity of the plant, there was a better response for the KSTAR algorithm when evaluating the performance of the predictions using the aRRMSE function. Initial tests that served to establish for the present study the division of the training sets by processes, which favored a higher performance of the algorithms based on instances.

After to realize the preliminary study with all the algorithms and to see that the ones with the best performance were those based on instances, the work was centered on evaluating only those of this type in the tool. The Table 2 shows the principal measures of evaluation for this type of task. As you can see, this tool has 3 algorithms for regression, to putting them to compete, is observed that the most efficient training was about KStar. With this result then the other evaluation measures described above can also be seen. Now, the principal purpose is to find the one that learns the best to later create a tool, that automatically predict these values from input data which are, soil data, rebound age, primary metabolites, and climate.

In previous research (Spyromitros-Xioufis et al., 2016; Santana et al., 2017; Estrada-Jiménez et al., 2019; Waegeman et al., 2019; Estrada-Jiménez et al., 2020; Chen et al., 2021), various machine learning algorithms have also been tested, as well as regressor, with satisfactory results. In this only the lazy algorithms were put to the test since these are based on the probability that an object can resemble others; in these investigations the datasets had not been divided, this responded to a variant to test the behavior of all types of algorithms to select the best one through aRMSE, in these the best ones always turned out to be the lazy ones, therefore hence the decision to in this investigation test only the sloths.

Also, several models have been compared that included in most cases a single dataset, this contained in a first experimentation all the data of the studied varieties without considering the flow of the processes that we tried to simulate, even so the lazy algorithms always showed a better adaptation to them even with this drawback.

Then, in consultation with specialists from the department of pastures and forages of the University of Granma, it was decided to separate the dataset of how the process flow is carried out in a laboratory, therefore the datasets were separated, and 3 datasets were created datasets that respond to phytochemical components, cell wall components and digestibility components, which is as shown in Table 2. When comparing. In the aRMSE values, it can be observed that the aRMSE decreases with respect to Table 2, so it can be affirmed that with the new variant of separating the data set, the algorithms simulate with better quality the behavior of the plants studied in this research.

Table 2. Results of learning of machine learning

<i>Erythrina variegata</i>				
Algorithm	Metric	Train1	Train2	Train3
LWL	AverageRMSE	1.0262±0.3615	0.6441±0.1141	1.3213±0.2831
	AverageRelativeRMSE	0.3197±0.1438	0.3760±0.1484	0.3297±0.2227
	AverageMAE	0.8548±0.2322	0.5622±0.1058	1.1121±0.2124
	AverageRelativeMAE	0.3097±0.1487	0.3842±0.1747	0.3127±0.1951
IBK	AverageRMSE	1.0262±0.3615	0.0543±0.0167	0.138±0.0383
	AverageRelativeRMSE	0.3197±0.1438	0.0483±0.0222	0.0835±0.0728
	AverageMAE	0.8548±0.2322	0.0405±0.0115	0.1036±0.0267
	AverageRelativeMAE	0.3097±0.1487	0.0444±0.0211	0.0769±0.0660
KSTAR	AverageRMSE	1.0262±0.3615	0.054±0.0167	0.1227±0.0368
	AverageRelativeRMSE	0.3197±0.1438	0.0483±0.0222	0.0724±0.0574
	AverageMAE	0.8548±0.2322	0.0405±0.0115	0.0927±0.0238
	AverageRelativeMAE	0.3097±0.1487	0.0444±0.0211	0.0642±0.04691
<i>Gliricidia sepium</i>				
LWL	AverageRMSE	1.7472±0.5762	1.9449±0.5887	1.7135±0.3222
	AverageRelativeRMSE	0.3699±0.1067	0.6949±0.1912	0.3725±0.1124
	AverageMAE	1.3327±0.4196	1.5623±0.5724	1.4414±0.2912
	AverageRelativeMAE	0.3479±0.1147	0.6254±0.2084	0.3689±0.1208
IBK	AverageRMSE	0.0880±0.0311	1.8194±0.6851	0.1398±0.0716
	AverageRelativeRMSE	0.0602±0.0650	0.6522±0.2119	0.0294±0.0119
	AverageMAE	0.0634±0.0207	1.3083±0.6846	0.0953±0.0442
	AverageRelativeMAE	0.0466±0.0478	0.5288±0.2372	0.0236±0.0099
KSTAR	AverageRMSE	0.0762±0.0266	1.8194±0.6851	0.1323±0.0709
	AverageRelativeRMSE	0.0518±0.0423	0.6522±0.2119	0.0287±0.0115
	AverageMAE	0.0552±0.0171	1.3083±0.6846	0.0924±0.0449
	AverageRelativeMAE	0.0414±0.0317	0.5288±0.2372	0.0233±0.0090
<i>Leucaena leucocephala</i>				
LWL	AverageRMSE	0.8748±0.1156	0.7728±0.1055	1.2730±0.3951
	AverageRelativeRMSE	0.3102±0.1861	0.4689±0.1521	0.3550±0.1450
	AverageMAE	0.7878±0.1127	0.6805±0.1104	1.0245±0.3081
	AverageRelativeMAE	0.3293±0.1930	0.4817±0.1820	0.3269±0.1398
IBK	AverageRMSE	0.1047±0.0290	0.0690±0.0257	0.2106±0.1811
	AverageRelativeRMSE	0.0702±0.0345	0.0923±0.0369	0.0677±0.0616
	AverageMAE	0.0775±0.0165	0.0519±0.0184	0.1463±0.0983
	AverageRelativeMAE	0.0592±0.0289	0.0825±0.0311	0.0577±0.0535
KSTAR	AverageRMSE	0.0873±0.0217	0.0690±0.0257	0.2041±0.1729
	AverageRelativeRMSE	0.0574±0.0311	0.0923±0.0369	0.0620±0.0511
	AverageMAE	0.0646±0.0138	0.0519±0.0184	0.1406±0.0924
	AverageRelativeMAE	0.0484±0.0284	0.0825±0.0311	0.0524±0.0432

<i>Tithonia diversifolia</i>				
Algorithm	Metric	Train1	Train2	Train3
LWL	AverageRMSE	0.3859±0.1235	0.5390±0.1134	1.0671±0.3649
	AverageRelativeRMSE	0.3138±0.1277	0.3930±0.1444	0.3778±0.2450
	AverageMAE	0.3313±0.1011	0.4700±0.1186	0.8699±0.3224
	AverageRelativeMAE	0.3232±0.1410	0.4175±0.1476	0.3911±0.2510
IBK	AverageRMSE	0.0686±0.0224	0.0966±0.0304	0.1385±0.0653
	AverageRelativeRMSE	0.0962±0.0620	0.1372±0.0336	0.0688±0.0408
	AverageMAE	0.0523±0.0140	0.0707±0.0187	0.0974±0.0361
	AverageRelativeMAE	0.0775±0.0411	0.1314±0.0274	0.0603±0.0358
KSTAR	AverageRMSE	0.0661±0.0224	0.0966±0.0304	0.1240±0.0398
	AverageRelativeRMSE	0.0950±0.0583	0.1372±0.0336	0.0664±0.0369
	AverageMAE	0.0494±0.0142	0.0707±0.0187	0.0894±0.0255
	AverageRelativeMAE	0.0759±0.0391	0.1314±0.0274	0.0594±0.0355

With the data studied by learning the algorithms, it was possible to verify that the algorithms that had the best adaptation to the data were obviously the lazy algorithms. The performance measure used responds to the fact that in regression problems these are the measures to be used, but the same does not happen when the problem to be treated is classification. As has been used by several authors (Karalič & Bratko, 1997; Tuia et al., 2011; Osojnik et al., 2017; Reyes et al., 2018; Camejo-Corona et al., 2019), this aRMSE measure is the most representative in a model, even though it is known that among its limitations is precisely that the average encompasses all the values that are included within it, therefore, if at any time there is any high very high or low very low value may directly affect the average.

In comparison with the research developed by Estrada-Jiménez et al. (2018), it was possible to include the data referring to soil components, digestibility, and cell wall components. He proposed a model that predicted only the secondary metabolites from the primary metabolites, climate and rebound age. A significant detail is the reduction of the error evaluated to select the regressor algorithm. In addition, in the present paper the aRMSE is optimized by the creation of the databases by processes to be determined, that is, a data set to learning to secondary metabolites, cell wall components and digestibility respectively.

Painuli et al. (2014) reported the effectiveness of the KSTAR algorithm in predicting the wear of agricultural machinery parts, based on the collection of a set of data and characteristics of these parts, with which the data set for learning was formed and with the application of this algorithm, the effectiveness of the predictions could be evaluated at 78%, a value that is considered high due to the adaptability of the algorithm to the data set (Painuli et al., 2014).

The use of artificial intelligence as a powerful tool to predict different life processes and different branches of science is a practice that has gained popularity in recent years due to its practical utility and high levels of precision. In this sense, Erdal et al. (2018) developed studies with algorithms based on instances (lazy) to simulate the evaluation of concrete quality. At first, all the algorithms of the WEKA tool, which contains the relevant libraries for data mining, were evaluate. Then the data was evaluated only with the lazy algorithms, from the error it was possible to determine the high performance of the instance-based algorithms (LW, IBK and KSTAR). While Maliha et al. (2019) to predict the causes and appearance of cancer found when using

algorithms J-48 and KSTAR that in logistic regression the accuracy is 99,3%; for KSTAR it was 99,5% and J-48 is 99,1 %.

However, Zighed and Bounour (2019) used the KSTAR algorithm to assess software maintenance; based on the Quantity of codes to be implement for the maintenance of a specific computer product. Prediction models based on data collected from two object-oriented systems were create. In addition, the models created with the linear regression algorithms, neural network, decision tree, SVM, were compare with the use of the WEKA tool; where comparisons of the prediction accuracy of all models were established using and cross-validation. As a result, it shown that KSTAR produces better results by predicting more accurately than the other techniques. It should be note that the present study, using this tool, eliminates the multicollinearity between the input variables, eliminating the correlation between them to avoid setbacks.

Khosravi et al. (2021), using field data at one station, succeeded in predicting flow depth, water surface width, and water surface longitudinal slope using independent data mining techniques: database learning. instances (IBK), KSTAR, locally weighted learning (LWL), Vote, Attribute Selected Classifier (ASC), Regression by Discretization (RBD) and Cross-validation Parameter Selection (CVPS) (Vote-IBK, Vote-KSTAR, Vote-LWL, ASC-IBK, ASC-KSTAR, ASC-LWL, RBD-IBK, RBD-KSTAR, RBD-LWL, CVPS-IBK, CVPS-KSTAR, CVPS-LWL). Through a comparison of predictive performance and a sensitivity analysis of the driving variables, the results reveal that among other features the Vote-KSTAR model had the highest performance in predicting depth and width, and ASC-KSTAR in the estimation of the slope.

The results obtained in this research attest to the good behavior of the adaptability of the algorithms and artificial intelligence to predict the components studied. In this way, it is evident that for future studies it is advisable to use these procedures based on instances, which is due to the behavior of these before others.

4. Conclusions and recommendations

- The aRRMSE was optimized with respect to previous investigations
- The species that showed the best behavior was *Leucaena leucocephala* with the KStar algorithm
- Three datasets were created for each plant variety to evaluate the behavior of lazy algorithms.
- The datasets of the plant varieties created were tested with the lazy algorithms of the WEKA tool developed by the University of Waikato to evaluate the adaptability of these with the datasets.
- The results of the training with each of the datasets were evaluated with the conventional metrics for the evaluation of the regression algorithms. It was verified that the algorithm that presented the best aRMSE turned out to be KStar, which shows that this is the one that can best simulate the behavior of the properties of the varieties studied.
- We recommended, test the proposed and trained models with test cases designed by specialists from the Center for Animal Production Studies of the University of Granma.
- Consider the results proposed for the use of these in a computational tool that can gather and learn from these databases with these algorithms to simulate the behavior of plant components. Evaluate the methodology used and the flow of processes in the study of other varieties of plants used for animal nutrition.

Bibliography

- Alebele, Y., Zhang, X., Wang, W., Yang, G., Yao, X., Zheng, H., Zhu, Y., Cao, W. & Cheng, T. (2020). Estimation of Canopy Biomass Components in Paddy Rice from Combined Optical and SAR Data Using Multi-Target Gaussian Regressor Stacking. *Remote Sensing*, 12(16), 2564. <https://doi.org/10.3390/rs12162564/>
- Alzubi, J., Nayyar, A. & Kumar, A. (2018). Machine learning from theory to algorithms: An overview. *Journal of physics: conference series*, 1142(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1142/1/012012/>
- Amin, M. N. & Habib, A. (2015). Comparison of different classification techniques using WEKA for hematological data. *American Journal of Engineering Research*, 4(3), 55-61. [http://www.ajer.org/papers/v4\(03\)/H043055061.pdf/](http://www.ajer.org/papers/v4(03)/H043055061.pdf/)
- Barrios, H. D., Rivas, Y. A., Hernández, L. C., Hernández, A. M., Cárdenas, M. del C. C. & Cardoso, G. M. C. (2015). Algoritmos de aprendizaje automático para clasificación de Splice Sites en secuencias genómicas. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 9(4), 155-170. <http://scielo.sld.cu/pdf/rcci/v9n4/rcci12415.pdf/>
- Berrar, D. (2019). Cross-Validation. *Encyclopedia of Bioinformatics and Computational Biology*, 1, 542–545. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.20349-X/>
- Borchani, H., Varando, G., Bielza, C. & Larranaga, P. (2015). A survey on multi-output regression. *Wires Data Mining and Knowledge Discovery*, 5(5), 216-233. <https://doi.org/10.1002/widm.1157/>
- Cabrera, D. (2008). Manejo y uso de pastos y forrajes en ganadería tropical. *Universidad de Córdoba*, pp 40. http://www.uco.es/zootecniaygestion/img/pictorex/08_21_24_4.1.1.pdf/
- Cambroner, C. G. & Moreno, I. G. (2006). Algoritmos de aprendizaje: Knn & kmeans. *Inteligencia en Redes de Comunicación, Universidad Carlos III, Madrid, Spain*. pp. 8. <http://blogs.ujaen.es/barranco/wp-content/uploads/2012/02/Algoritmos-de-aprendizaje-knn-y-kmeans.pdf/>
- Camejo-Corona, J., Gonzalez, H. & Morell, C. (2019). Los principales algoritmos para regresión con salidas múltiples. Una revisión para Big Data. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 13(4), 118-150. <http://scielo.sld.cu/pdf/rcci/v13n4/2227-1899-rcci-13-04-118.pdf/>
- Chen, S., Gu, C., Lin, C. & Hariri-Ardebili, M. A. (2021). Prediction of arch dam deformation via correlated multi-target stacking. *Applied Mathematical Modelling*, 91, 1175-1193. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.10.028/>
- Cleary, J. G. & Trigg, L. E. (1995). K*: An instance-based learner using an entropic distance measure. En *Machine Learning Proceedings 1995*, 108-114. <https://sci2s.ugr.es/keel/pdf/algorithm/congreso/KStar.pdf/>
- Coraddu, A., Oneto, L., Ghio, A., Savio, S., Anguita, D. & Figari, M. (2016). Machine learning approaches for improving condition-based maintenance of naval propulsion plants. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 230(1), 136-153. <https://doi.org/10.1177/1475090214540874/>
- Despotovic, M., Nedic, V., Despotovic, D. & Cvetanovic, S. (2016). Evaluation of empirical models for predicting monthly mean horizontal diffuse solar radiation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 246-260. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.058/>
- Díaz, A., Cayón, G. & Mira, J. J. (2007). Metabolismo del calcio y su relación con la «mancha de madurez» del fruto de banano. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 25(2), 280-287. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/14131/14886/>
- Džeroski, S., Demšar, D. & Grbović, J. (2000). Predicting chemical parameters of river water quality from bioindicator data. *Applied Intelligence*, 13(1), 7-17. <https://doi.org/10.1023/A:1008323212047/>
- Erdal, H., Erdal, M., Simsek, O. & Erdal, H. I. (2018). Prediction of concrete compressive strength using non-destructive test results. *Computers and Concrete*, 21(4), 407-417. <https://doi.org/10.12989/cac.2018.21.4.407/>

- Estrada-Jiménez, P. M., Diez, H. R., Cabrera, A. V., Verdecia, D. M. & Ramírez, J. L. (2018). Modelos de predicción de metabolitos secundarios para dos variedades de plantas proteicas. *Memorias del VIII Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Proyectos. Universidad de Ciencias Informáticas, Cuba*, pp1-9. <https://repositorio.uci.cu/bitstream/123456789/9499/1/A205.pdf/>
- Estrada-Jiménez, P. M., González-Diez, H. R., Verdecia-Cabrera, A., Verdecia-Acosta, D. M. & Ramírez-de la Rivera, J. L. (2018). Modelos de predicción de metabolitos secundarios para dos variedades de plantas proteicas. *Libro de Memorias: VIII Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Proyectos. Ediciones Futuro. Universidad de Ciencias Informáticas, Cuba*, pp 1-9. <https://repositorio.uci.cu/jspui/bitstream/123456789/9499/1/A205.pdf/>
- Estrada-Jiménez, P. M., Noguera-López, P. J. & Recio-Avilés, R. (2020). Aplicación de la regresión de múltiples objetivos en la estimación de componentes fitoquímicos. *Pensamiento Matemático*, 10(2), 7-14. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7782227/>
- Estrada-Jiménez, P. M., Ramírez-de la Ribera, J. L., Verdecia-Acosta, D. M. & Soler-Pellicer, Y. (2019). Aplicación de la minería de datos en la estimación de componentes fotoquímicos (Original). *Roca. Revista científico-educacional de la provincia Granma*, 15(2), 177-186. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7013276/>
- Fang, J., Li, Y., Liu, R., Pang, X., Li, C., Yang, R., He, Y., Lian, W., Liu, A.L. & Du, G.H. (2015). Discovery of multitarget-directed ligands against Alzheimer's disease through systematic prediction of chemical-protein interactions. *Journal of chemical information and modeling*, 55(1), 149-164. <https://doi.org/10.1021/ci500574n/>
- González, F. A. (2015). Machine learning models in rheumatology. *Revista Colombiana de Reumatología*, 22(2), 77-78. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcreu.2015.06.001/>
- Herrera, R.S., Verdecia, D.M., Ramírez, J.L., García, M. & Cruz, A.M. (2017). Relation between some climatic factors and the chemical composition of *Tithonia diversifolia*. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 51(2), 271-279. <http://cjasience.com/index.php/CJAS/article/view/719/>
- Joshi, R. S., Jagdale, S. S., Bansode, S. B., Shankar, S. S., Tellis, M. B., Pandya, V. K., Chugh, A., Giri, A. P. & Kulkarni, M. J. (2020). Discovery of potential multi-target-directed ligands by targeting host-specific SARS-CoV-2 structurally conserved main protease. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 1-16. <https://doi.org/10.1080/07391102.2020.1760137/>
- Karalič, A. & Bratko, I. (1997). First order regression. *Machine learning*, 26(2), 147-176. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1023/A:1007365207130.pdf/>
- Khosravi, K., Khozani, Z. S. & Cooper, J. R. (2021). Predicting stable gravel-bed river hydraulic geometry: A test of novel, advanced, hybrid data mining algorithms. *Environmental Modelling & Software*, 144, 105165. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105165/>
- Kohavi, R. (1995). A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. *Ijcai*, 14(2), 1137-1145. <https://www.ijcai.org/Proceedings/95-2/Papers/O16.pdf/>
- Li, J., Zhang, L., He, C. & Zhao, C. (2018). A comparison of Markov chain random field and ordinary kriging methods for calculating soil texture in a mountainous watershed, northwest China. *Sustainability*, 10(8), 2819. <https://doi.org/10.3390/su10082819/>
- Mahecha, L. & Rosales, M. (2005). Valor nutricional del follaje de botón de oro *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) Gray, en la producción animal en el trópico. *Livestock Research for Rural Development*, 17(9), 1. <https://www.lrrd.cipav.org.co/lrrd17/9/mahe17100.htm/>
- Mahecha, L., Escobar, J., Suárez, J. & Restrepo, L. (2007). *Tithonia diversifolia* (hemsl.) Gray (botón de oro) como suplemento forrajero de vacas F1 (Holstein por Cebú). *Livestock Research for Rural Development*, 19(2), 1-6. <https://lrrd.cipav.org.co/lrrd19/2/mahe19016.htm/>
- Maliha, S. K., Islam, T., Ghosh, S. K., Ahmed, H., Mollick, Md. R. J. & Ema, R. R. (2019). Prediction of Cancer Using Logistic Regression, K-Star and J48 algorithm. *2019 4th International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/EICT48899.2019.9068790/>

- Mariño, A. P. (2015). GMLKNN: modelo basado en instancias para el aprendizaje multi-etiqueta utilizando la distancia VDM [PhD Thesis]. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Matemática. pp. 100. <https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/7551/Tesis%20Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y/>
- Mastelini, S. M., Santana, E. J., Cerri, R. & Barbon Jr, S. (2020). DSTARS: a multi-target deep structure for tracking asynchronous regressor stacking. *Applied Soft Computing*, 91, 106215. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106215/>
- Nogueira, M. S. & Koch, O. (2019). The development of target-specific machine learning models as scoring functions for docking-based target prediction. *Journal of chemical information and modeling*, 59(3), 1238-1252. <https://doi.org/10.1021/acs.jcim.8b00773/>
- Osojnik, A., Panov, P. & Džeroski, S. (2017). Multi-label classification via multi-target regression on data streams. *Machine Learning*, 106, 745-770. <https://doi.org/10.1007/s10994-016-5613-5/>
- Otegui, M.B. & Totaro, M. E. (2007). *Atlas de histología vegetal*. EDUNAM-Editorial Universitaria de la Universidad Nacional de Misiones. https://editorial.unam.edu.ar/images/documentos_digitales/978-950-579-064-7.pdf
- Painuli, S., Elangovan, M. & Sugumaran, V. (2014). Tool condition monitoring using K-star algorithm. *Expert Systems with Applications*, 41(6), 2638-2643. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.11.005/>
- Pascual, I. de los A., Ramírez, J., & Ortiz, A. (2016). Métodos de Inteligencia Artificial para la predicción del rendimiento y calidad de gramíneas. *REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria*, 17(12). <https://www.redalyc.org/pdf/636/63649052026.pdf>
- Ramírez-Lozano, R. (2010). *Importancia de los taninos condensados en la nutrición del venado cola blanca*. Conferencia: 5° Simposio sobre Fauna Cinegética en México At: Puebla, México (1), 1-21. https://www.researchgate.net/publication/268207092_Importancia_de_los_taninos_condensados_en_la_nutricion_del_venado_cola_blanca/
- Refaeilzadeh, P., Tang, L. & Liu, H. (2016). Cross-Validation. In Liu L & Özsu MT (Eds.), *Encyclopedia of Database Systems* (pp. 1–6). Springer New York. <http://leitang.net/papers/ency-cross-validation.pdf/>
- Reyes, O., Cano, A., Fardoun, H. M. & Ventura, S. (2018). A locally weighted learning method based on a data gravitation model for multi-target regression. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 11(1), 282-295. <https://doi.org/10.2991/ijcis.11.1.22/>
- Rincón-Tuexi, J. A., Castro-Nava, S., López-Santillán, J. A., Huerta, A. J., Trejo-López, C. & Briones-Encinia, F. (2006). Temperatura alta y estrés hídrico durante la floración en poblaciones de maíz tropical. *Phyton (Buenos Aires)*, 75, 31-40. <http://www.scielo.org.ar/pdf/phyton/v75/v75a03.pdf/>
- Ruiz, T. E., Febles, G. J., Galindo, J. L., Savón, L. L., Chongo, B. B., Torres, V., Cino, D. M., Alonso, J., Martínez, Y., Gutiérrez, D., Crespo, G. J., Mora, L., Scull, I., La O, O., González, J., Lok, S., González, N. & Zamora, A. (2014). *Tithonia diversifolia*, sus posibilidades en sistemas ganaderos. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 48(1), 79-82. <https://www.redalyc.org/pdf/1930/193030122017.pdf/>
- Ruiz, T., Febles, G., Castillo, E., Jordan, H., Galindo, J., Chongo, B., Delgado, D., Mejías, R. & Crespo, G. (2011). Tecnología de producción animal mediante *Leucaena leucocephala* asociada con pastos en el 100% del área de la unidad ganadera. *Sitio Argentino de Producción Animal*. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pasturas_cultivadas_megatermicas/112-leucaena.pdf
- Santana, E. J., Mastelini, S. M. & Barbon Jr, S. (2017). Deep regressor stacking for air ticket prices prediction. In *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação*, (pp. 25-31). Porto Alegre: SBC. <https://doi.org/10.5753/sbsi.2017.6022>
- Spyromitros-Xioufis, E., Tsoumakas, G., Groves, W. & Vlahavas, I. (2016). Multi-target regression via input space expansion: Treating targets as inputs. *Machine Learning*, 104, 55-98. <https://doi.org/10.1007/s10994-016-5546-z/>

- Tsoumakas, G., Spyromitros-Xioufis, E., Vilcek, J. & Vlahavas, I. (2011). Mulan: A java library for multi-label learning. *Journal of Machine Learning Research*, 12(Jul), 2411-2414. <https://www.jmlr.org/papers/volume12/tsoumakas11a/tsoumakas11a.pdf/>
- Tuia, D., Verrelst, J., Alonso, L., Pérez-Cruz, F. & Camps-Valls, G. (2011). Multioutput support vector regression for remote sensing biophysical parameter estimation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(4), 804-808. <https://matlabtools.com/wp-content/uploads/p603.pdf/>
- Verdecia, D.M., Herrera, R.S., Ramírez, J.L., Bodas, R., Leonard, I., Giráldez, F., Andrés, S., Santana, A., Méndez-Martínez, Y. & López, S. (2018). Yield components, chemical characterization and polyphenolic profile of *Tithonia diversifolia* in Valle del Cauto, Cuba. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 52(4), 457-471. <http://cjasience.com/index.php/CJAS/article/view/838/>
- Waegeman, W., Dembczyński, K. & Hüllermeier, E. (2019). Multi-target prediction: A unifying view on problems and methods. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 33(2), 293-324. <https://arxiv.org/pdf/1809.02352.pdf/>
- Wang, X., Zhen, X., Li, Q., Shen, D. & Huang, H. (2018). Cognitive assessment prediction in Alzheimer's disease by multi-layer multi-target regression. *Neuroinformatics*, 16(3-4), 285-294. <https://doi.org/10.1007/s12021-018-9381-1/>
- Zhang, J., Li, Q., Caselli, R. J., Thompson, P. M., Ye, J. & Wang, Y. (2017). Multi-source multi-target dictionary learning for prediction of cognitive decline. *International Conference on Information Processing in Medical Imaging*, 10265, 184-197. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59050-9_15/
- Zhen, X., Yu, M., He, X. & Li, S. (2017). Multi-target regression via robust low-rank learning. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 40(2), 497-504. <https://ieeexplore.ieee.org/jelaam/34/8249508/7888599-aam.pdf/>
- Zighed, N. & Bounour, N. (2019). On The Use Of KStar Algorithm For Predicting Object-Oriented Software Maintainability. Conference *Internationale sur intelligence Artificielle et les Technologies Information ICAIIT 2019*. Pp. 1-5. <https://dSPACE.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/20983/1/Zighed%20Narimane.pdf/>

Evaluación de residuos forestales de especies potenciales para la obtención del carbono como energía limpia de la Amazonía ecuatoriana

(Evaluation of forest residues of potential species to obtain carbon as clean energy in the Ecuadorian Amazon)

Rubén Darío Ledesma¹, Reinier Abreu-Naranjo², Juan Elías González³

Resumen

Los residuos maderables que brinda el bosque secundario por su alto contenido en material lignocelulósico son de gran interés para la industria de la construcción y otras con fines energéticos. El objetivo de esta investigación fue evaluar los residuos forestales de seis especies para la obtención del carbono como energía limpia, esto representa gran interés para la industria energética. A través de la metodología del estudio de inventarios y muestreo de los residuos maderables de los aserraderos de cuatro cantones de la provincia de Pastaza, mediante técnicas instrumentales de análisis físicos, químicos y térmicos, los parámetros estudiados fueron el potencial de biomasa y residuo, densidad, humedad, cenizas, volátiles, carbono fijo y poder calorífico superior (análisis inmediato), carbono, hidrogeno, oxígeno, nitrógeno y azufre (CHONS), lo que permitió obtener las propiedades termoquímicas, alcanzando los principales resultados del potencial energético, de estas tres especies que se pueden aprovechar para energía limpia, debido a la cantidad de cenizas encontradas en los análisis por debajo del 1 % y de volátiles (60-80 %) de estos residuos, lo que evidencia claramente que evita la formación de incrustaciones en los equipos y daños, en relación a su contenido en carbono fijo en promedio de 14.78 % y su poder calorífico superior 19.72 Mj/kg, valorando la factibilidad industrial para su aprovechamiento energético que generará 515.62 GW de energía limpia en térmicos eléctricos anualmente para satisfacer las necesidades de las áreas vulnerables de la región amazónica.

Palabras clave

Potencial, residuo, poder calorífico, carbono y energía.

Abstract

Timber residues due to its use for the construction industry and others provided by the secondary forest and its high content of lignocellulosic material for energy purposes, our objective was to evaluate the forest residues of six species to obtain carbon as clean energy, which represents great interest for the energy industry. Through the methodology of the study of inventories and sampling of wood residues from sawmills that was in the four cantons of the province of Pastaza, through instrumental techniques of physical, chemical and thermal analysis, the parameters studied were the biomass potential and residue, density, humidity, ashes, volatiles, fixed carbon and higher calorific value (immediate analysis), carbon, hydrogen, oxygen, nitrogen and sulfur (CHONS), which allowed obtaining the thermochemical properties, reaching the main results of energy potential, of these three species that can be used for clean energy, due to the amount of ash found in the analyzes below 1 % and volatiles (60-80 %) of these residues, which clearly shows that it prevents the formation of scale in equipment and damage, in relation to its fixed carbon content on average of 14.78 % and its superior calorific value 19.72 Mj/kg, assessing the fact industrial reliability for its energy use that will generate 515.62 GW of clean energy in electrical thermal power annually to meet the needs of vulnerable areas of the Amazon region.

Keywords

Potential, Waste, Calorific Power, Carbon and Energy.

1 Universidad Estatal Amazónica. Pastaza, Ecuador. [rledesma@uea.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0002-2086-0185>].
2 Universidad Estatal Amazónica. Pastaza, Ecuador. [rabreu@uea.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0003-1048-7126>].
3 Universidad Estatal Amazónica. Pastaza, Ecuador. [jgonzalez@uea.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0002-0674-7741>].

1. Introducción

Los residuos maderables de las especies con potencial productivo del bosque secundario fueron descubiertos: el *Piptocoma discolor* (pigüe) por John Francis Pruski (n.1955), botánico estadounidense; *Cecropia peltata* L., (guarumo) por Daniel H. Janzen, biólogo estadounidense, *Inga edulis* Mart. (guabo) por Bishop J. 1980 *Jacaranda mimosifolia* D.Don. (jacaranda) por Michelle Noelia Rodríguez CATIE-Ecuador, *Miconia crocea* (colca) por Naudín 1986 y *Morella pubescens* (laurel) por (Humb. y Bonpl. ex Willd.) Wilbur, son aprovechados de diversas maneras, mayoritariamente el tronco del árbol o trozas principales para la madera destinada a la construcción de casas y muebles que se produce en la región Amazónica (Legarda, 2019). Quedando de estas una cantidad equivalente al 60 % como residuo maderable para su aprovechamiento como leña, astilla y carbón con fines energéticos, debido al crecimiento rápido y natural de las especies (González y Oliva, 2018). Siendo una de las principales fuentes de combustible de la biomasa tradicional de la humanidad la leña vegetal, a través de la combustión se obtiene el fuego, como una fuente energética sin manejo responsable (Gual-Díaz y Rendón-Correa, 2020). Sin embargo, los altos costos del petróleo obligan a muchos países a buscar la sustitución de las fuentes energéticas de materiales lignocelulósicos, del recurso maderable para la producción de energía limpia para la producción eléctrica (Uceda-Castillo, 1984). Por medio de los diferentes procesos termoquímicos que son aquellos que transforman la biomasa, en determinadas condiciones de presión y temperatura para obtener productos sólidos, líquidos o gaseosos, generalmente, mediante reacciones exotérmicas de la lignina por estar compuesto de una biomolécula como un heteropolímero amorfo, tridimensional, ramificado y está formada por alcoholes aromáticos, con una alta resistencia a la degradación química o biológica, que funciona como soporte estructural, impermeabilidad, rigidez y protección al resto de componentes como son la celulosa y hemicelulosa (Altamirano y Rocha, 2015).

Estos residuos maderables o combustible sólidos se encuentran implicados por las reacciones químicas irreversibles, a altas temperaturas y condiciones variables de oxidación y que requiere de la aplicación tecnológica acorde para la obtención de esta fuente renovable de energía limpia (Patiño Martínez, 2014). Estas biomásas residuales se han considerado como fuente renovable de energía limpia debido a las emisiones de carbono neutro, por sus características físicas de adsorber moléculas llamadas adsorbatos contenidos en un líquido o gas, y su composición química del carbón activo aproximadamente un 75-80 % en carbono, 5-10 % en cenizas, 60 % en oxígeno y 0,5 % en hidrógeno (Manrique y Garrido, 2021).

Las especies vegetales son los reactores de adsorción de dióxido de carbono atmosférico y su disponibilidad en el ambiente (Chuncho y Aguirre, 2019). Esta bioacumulación del carbono se produce en especies arbustivas y herbáceas, sus reacciones químicas, producida por la descomposición de hojarasca, humedad y temperatura impulsada por los microorganismos del suelo y de esta estructura está expresado en toneladas de carbono (tC) por hectárea por año, de tal manera que, en los trópicos se forman de 3.2 a 10 toneladas de carbono (tC) anualmente (Rimarachín, 2017). Por esta razón la importancia del análisis del poder calorífico superior del carbón de las especies forestales (Rivera y Uceda, 2014). Utilizaron un calorímetro adiabático y por el método del calor para la combustión del material orgánico. Y a base de esta metodología de la biomasa se destaca la relación entre la humedad y el poder calorífico, según la necesidad del pretratamiento de secado de acuerdo con la tecnología del sistema híbrido mediante

la simulación de optimización en Homer para la transformación energética (Pantoja-Bucheli y Guerrero-Ordoñez, 2016).

Según el potencial energético de biomasa residual en seco, qué cantidad de carbono fijo y su poder calorífico superior generaría anualmente por unidad de masa de dicho residuo, que se requiere una humedad del 10 (%H), como valor óptimo para su aprovechamiento energético (Arroyo-Vinueza y Reina-Guzmán, 2016).

El objetivo. Evaluar el potencial energético de los residuos forestales de especies de: *Piptocoma discolor*, *Cecropia peltata* L., *Inga edulis* Mart., *Jacaranda mimosifolia* D. Don., *Miconia crocea* y *Morella pubescens*, para obtención del carbono como energía limpia. Está basado en los métodos del inventario de las especies de los aserraderos de los cuatro cantones de la provincia de Pastaza y de los análisis del valor calórico, composición física, química, porcentaje del material volátil y la determinación del carbono fijo mediante la ecuación (Márquez-Montesino y Castillo-Ramos, 2009). Basado en la relación entre la masa de residuo seco y el contenido energético por unidad de masa de dicho residuo, o Poder Calorífico Inferior (PCI), con una humedad del 10 (%H), con valor óptimo para su aprovechamiento energético (Arroyo-Vinueza y Reina-Guzmán, 2016). Así queda demostrado como una alternativa de un combustible autóctono como fuente renovables de energía limpia en la Amazonía ecuatoriana.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

La obtención de las muestras residuales de las siguientes especies arbóreas *Acacia mearnsii* De Willd., *Eucalyptus grandis* Hill, *Mimosa scabrella* Benth. y *Ateleia glazioviana* Baill 22 °C (Agostinho-Da y Dalla-Corte, 2014). En esta investigación se clasificó en 11 aserraderos de los cuatro cantones que son: Arajuno, Mera, Santa Clara y Pastaza, de la provincia del mismo nombre, ubicado en la región Amazónica a 76°40' de longitud oeste y entre los 1°10' y 2°35' de latitud sur, considerado su altitud, desde los 550 a 960 ms. n. m., según el GPS, con una humedad relativa de 80 y 90 %, con una temperatura promedio de 22°C según (INAMHI, 2015), y se procedió a realizar el levantamiento de información con la metodología publicada por (MAE, 2014).

2.2. Método de muestreo

El método aplicado por estratificación se refiere a la distribución uniforme que presenta las especies arbóreas de acuerdo con la categoría diamétrica y seleccionando 3 muestras de árboles al azar, según el siguiente diámetro (DAP) a una altura de 1.30 m del suelo de a. (15-20 cm), b. (20 - 25 cm) y c. (25 a 30 cm) de parcelas de 600 m², por cada cantón que aprovechan en los 11 aserraderos y de los montículos de aserrín, de una área 1.5 m², según el volumen de los residuos de viruta y una vez determinado esta área, se obtuvo una muestra 3 kg de acuerdo a la siguiente normativa UNE-EN 148999: 2007 (UNE, 2007) y de acuerdo al art. 28 de la evaluación impactos ambientales según el capítulo IV de los estudios ambientales (Texto unificado de legislación secundaria de medio ambiente [TULSMA], 2017). Según la guía técnica de la clasificación de residuos (Pérez, 2020). El muestreo cuenta con características morfológicas semejantes, tal como menciona la Norma TAPPI - cm-85 de 1985. Esto se debe a la composición de carbohidra-

tos de madera libre de extracción y pulpa de madera (Standards:Regulations and Style Guidelines [TAPPI T, 249], 2021), que permitirá realizar los análisis físicos, químicos y termoquímicos.

2.3. Evaluación del potencial de biomasa

Para esta evaluación se obtuvo datos reales, en cada aserradero mediante la cubicación de los árboles o trozas que llegan y se aplicó la ecuación volumétrica para conos truncados utilizados por

$$V = \frac{\pi(R^2 + r^2 Rr) * h}{3} \quad (1)$$

Donde:

V = volumen del fuste (m^3).

R^2 = radio mayor al cuadrado (m^2)

r^2 = radio menor al cuadrado (m^2)

Rr = Radio mayor por radio menor (m^2)

h = altura del fuste hasta el diámetro superior aparente (m).

El mismo que nos permitió conocer la cantidad de residuo de biomasa que sale en cada una de las trozas. Obteniendo la cantidad de residuos y el porcentaje de madera residual o astillas que sale de la madera que utilizan con fines industriales. La simulación de la troza y del potencial de biomasa con el *software* Autodesk Inventor Profesional 2017. Fue con el fin de conocer el volumen total del árbol. Con base en los datos señalados de las trozas o árboles que llegan a cada aserradero y quedando válido con la ecuación (2), que utiliza en este programa de simulación del árbol y el cálculo del potencial de biomasa fresca.

2.4. Densidad de la biomasa

La cuantificación y estimación del potencial de biomasa fresca, basándose en los diámetros de la base y el final de fuste del árbol, que demuestra las mediciones respectivas según el método alométrico, determinando las medidas de los diámetros de las ramas y trozas que llegan a los aserraderos etc., concluyendo con la cantidad del potencial de biomasa fresca (Álvarez y Cogollo, 2013)

$$mv = kgm^3 \quad (2)$$

2.5. Secado de la biomasa

Se extrajeron 3 kg de muestras de un volumen total de serrín de $2.7 m^3$, de la biomasa residual, intermedio y superior, sin corteza con el objetivo de realizar una mezcla homogénea, y obtener la información completa del residuo de serrín de los árboles de cada especie y posteriormente fueron llevados para realizar el secado a una temperatura ambiente de $25 ^\circ C$ del cantón Pastaza. El secado en horno a $120 ^\circ C$ de las partículas de serrín (Calderón y Solís, 2012).

Para el secado de las muestras fueron llevadas a un horno industrial de Marca American Range, automatizado con una regulación de temperatura $\pm 5 ^\circ C$, y que fue fijado con una humedad relativa de 90 % (HR), con temperatura de $120 ^\circ C$. Para el examen de estas muestras antes mencionadas que fueron puestas en una malla para evitar que se esparza en el horno y controlando su humedad y tiempo promedio de 150 minutos, y una vez terminado se pesó cada

muestra en una balanza analítica digital de Marca Pioneer con una precisión de 0,001 g alcanzando un peso constante.

En la experimentación se consideraron 6 niveles de tiempo y 3 réplicas dando un total de 18 corridas experimentales, en relación con los análisis físicos y con un peso de las muestras de 2 kg, que fueron colocadas en las bandejas del interior de un horno industrial para el secado mediante la norma COPANT-maderas 458. Y realizado con la siguiente metodología (Garay, 2012), según las gráficas (1-6) de los análisis inmediato y elemental.

2.6. Determinación de la humedad

La muestra fresca inmediatamente fue pesada y determinada su humedad al ambiente del 90 % (HR) y según la norma chilena (NCh176/1, 1984). Se consideró la siguiente fórmula para la humedad inicial de la madera en fresco.

$$CH = CHC_{Fresco} - W_{H_2O} / W_{Wfresco} \quad (4)$$

Una vez puestas las muestras presecadas en lonas de plástico, posteriormente fueron llevadas a la estufa, basándose en las Normas ASTM D 346-04 (American Society for Testing and Materials [ASTM], 1998).

2.7. Métodos para determinación del potencial de carbono

La caracterización física y química, se realizó con base en las especificaciones técnicas del Comité Europeo para la Estandarización (CEN) y otras como se muestra en la tabla 1, así como las normas utilizadas, instrumentos, herramientas y equipos.

Tabla 1. Análisis químicos y térmicos de los residuos forestales

n.º	Análisis	Descripción	Normas
1	Análisis Proximal e Inmediato	Cenizas Humedad Volátiles Carbono fijo	UNE-EN ISO 18122 (Asociación Española de Normalización [UNE], 2016a). UNE-EN ISO 18134-3 (Asociación Española de Normalización [UNE], 2016b). UNE-EN ISO 18123 (Asociación Española de Normalización [UNE], 2016c). Calculado
2	Análisis elemental	Analizador elemental MACRO UEB (C, H, N, S)	ASTM C -114 (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2004). UNE-EN ISO 16948 (Asociación Española de Normalización [UNE], 2015)
3	Análisis Térmico	Calorímetro adiabático Automático 6400 PCS (Mg/kg)	DIN EN 61010 (UNE, 2011). UNE-EN ISO 18125 (Asociación Española de Normalización [UNE], 2018).

2.7.1. ANÁLISIS APROXIMADO O INMEDIATO

El análisis de la muestra fue de 1 gramo a temperaturas y tiempos, controlados. En un equipo de la serie 340 totalmente automáticos de segunda generación de analizadores, termogravimétricos, lo que permitió la determinación de los contenidos de sólidos y cenizas estas sustancias, con rangos de temperaturas de +50 °C hasta 1000°C y que se puede realizar con varios gases para este proceso.

Por medio del análisis aproximado o inmediato de los residuos forestales mediante la siguiente formulación del por ciento: Cenizas, material volátil y carbono fijo.

$$\text{Para el \% de cenizas} \quad A_d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \times \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (3)$$

$$\text{Para el \% de volátiles} \quad V_d = \left[\frac{100(m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - M_{ad} \right] \times \left[\frac{100}{100 - M_{ad}} \right] \quad (4)$$

$$\text{Para el \% de carbono fijo} \quad C_f = T_{Al} - V_d - A_d \quad (5)$$

Dónde:

A_d = % Cenizas
 m_1 = masa del plato vacío
 m_2 = masa del plato y la muestra
 m_3 = masa del plato y ceniza
 m_{ad} = porcentaje de humedad de la muestra
 V_d = % Cenizas
 m_1 = masa del crisol vacío
 m_2 = masa del crisol y la muestra antes
 m_3 = masa del plato y contenido después
 T_{Al} = Porcentaje total

Se consideró el cien por ciento de la muestra para lograr obtener los resultados del análisis aproximado, PrepASH como una solución estándar por el método ASTM D 5142 y fue determinado bajo atmosfera protectora de nitrógeno (ASTM, 2017).

2.7.2. ANÁLISIS ELEMENTAL

La muestra se preparó de acuerdo al tamaño de 1 mm o menos, según la Norma FprEN 14780. Con un contenido de humedad descrito en la Norma EN 14774-3, usando una porción de la muestra que fueron secados en una estufa y posteriormente realizando la evaluación del contenido de carbono fijo. Una vez analizado en el analizador elemental las propiedades químicas de CHN.

Previa calibración fueron obtenidos los resultados en base seca, con tres replicas y según las siguientes ecuaciones.

$$\text{Para el contenido de carbono} \quad C_d = C_{ad} \times \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (6)$$

$$\text{Para el contenido de nitrógeno} \quad N_d = N_{ad} \times \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (7)$$

$$\text{Para el contenido de hidrogeno} \quad H_d = \left[H_{ad} - \frac{M_{ad}}{8,937} \right] \times \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (8)$$

Dónde:

d = es base seca

ad = según se ha determinado

Mad = es el contenido de humedad de la muestra para análisis general.

Estas ecuaciones antes descritas permitieron obtener los resultados de los análisis del porcentaje de carbono, nitrógeno e hidrógeno, que fueron calculados con base a la Norma EN15296, y comparados con los datos analíticos obtenidos según el método de la Norma INTERNATIONAL ESTÁNDAR ISO 5725-2 UNE-EN, (2011). Desarrollado para estos análisis químicos CHNS, que fueron realizados en el equipo MACRO cube V3.1.3 (f4922ac) 2014-07-14, ser. N:20144056 Elementar Analysensysteme GmbH. en la Universidad Estatal de Bolívar y obteniendo resultados confiables.

Mediante esta metodología se pudo relacionar entre H/C versus O/C que fue usado para clasificar y comparar la biomasa con otros combustibles la base del carbono obtenido (Bergman et al., 2005). Como un elemento importante para la valoración del valor calórico (Rivera y Uceda, 2014). Y la comparación de la composición de C, H, O que reflejan en el potencial de biomasa residual de las diferentes especies como combustible antes mencionados (Bustamante y Ciro, 2016).

2.8. Análisis estadístico del potencial de residuos de especies forestales

Esta investigación del potencial de biomasa y el secado fue realizada con muestras de tamaño representativo con el objetivo de sustentar las variables de estudio en relación con el peso total del árbol, de la materia fresca y del secado.

Se aplicó dos tipos de estadística descriptiva y la estadística inferencial.

Los datos del potencial de biomasa residual fueron realizados a partir del valor promedio "en SITU" del inventario de los árboles. Para conocer su peso y fue en base a la densidad de la madera en fresco de las especies forestales, posteriormente se utilizaron gráficos de dispersión, y se procedió a trabajar con la herramienta Excel y pruebas de significancia y regresión. Nombre del archivo SWIN.exe. para la estimación o inferencia, y además cuantificar la probabilidad. Para poder extrapolar las conclusiones (Gutiérrez-Pulido y Salazar, 2012). De esta manera, se ha permitido desarrollar el modelo matemático a través de las herramientas y programas estadísticas (Infostat/L) y StatGraphics Centurion-StatFolio 2018.

3. Resultados

Los residuos obtenidos de las siguientes especies forestales: *Piptocoma discolor*, *Cecropia peltata* L., *Inga edulis* Mart., *Jacaranda mimosifolia* D.Don., *Miconia crocea* y *Morella pubescens*, se utilizaron para obtención del carbono como energía limpia. Que fueron de los 11 aserraderos, debido a sus propiedades físicas, químicas y térmicas de cada especie, y sus variaciones del potencial de biomasa fresca y residual, que fueron evaluados para conocer su potencial de biomasa y de carbono como energía limpia renovable para la Amazonía ecuatoriana.

3.1. Potencial de biomasa disponible

La cantidad de residuos generados de las cinco especies forestales en fresco y seco de los troncos, que son transportados a los aserraderos, donde se procede a realizar el aserrado de las diferentes partes de la madera y quedando una gran cantidad de residuos de aserraderos

y otra parte en bosque secundario de la provincia de Pastaza de la Amazonía ecuatoriana, que se puede aprovechar como fuente de energía limpia y se menciona en siguientes tablas 1-2 del potencial de biomasa.

Tabla 1. Total, de árboles aserraderos anualmente, peso/árbol en toneladas (t)

Nombre común	Árboles	W.kg/árbol	Total, Kg	Total, t
<i>Piptocoma discolor.</i>	62104916	320.15	19882888857.00	19882888.86
<i>Cecropia peltata L.</i>	887012	280.45	248762515.40	248762.51
<i>Inga edulis Mart.</i>	591465	350.49	207302567.90	207302.56
<i>Jacaranda mimosifolia D.Don.</i>	438228	350.45	153577002.60	153577.00
<i>Miconia Ruiz & Pav.</i>	288090	450.86	129888257.40	129888.25
<i>Myrica pubescens Humb. & Bonpl. ex Willd.</i>	204684	450.86	92283828.24	92283.82

Tabla 2. Cantidad total de biomasa residual fresca de cinco especies forestales

Nombre común	Total, (t)	Aprovechable 30 (%)	No aprovechable 70 (%)	Total, biomasa anual (t)
<i>Piptocoma discolor.</i>	19882888.86	5964866.65	13918022.20	13918022.20
<i>Cecropia peltata L.</i>	248762.51	74628.75	174133.76	174133.76
<i>Inga edulis Mart.</i>	207302.56	62190.77	145111.79	145111.79
<i>Jacaranda mimosifolia D.Don.</i>	153577.00	46073.10	107503.90	107503.90
<i>Miconia Ruiz & Pav.</i>	129888.25	38966.47	90921.78	90921.78
<i>Myrica pubescens Humb. & Bonpl. ex Willd.</i>	92283.82	27685.14	64598.67	64598.67

La cantidad de biomasa total y residual por especie en toneladas de materia fresca. Esta evaluación fue realizada en los aserraderos, como se demuestra en la tabla 2, dando un total 14.500.292.20 toneladas de las seis especies sin embargo se pueden observar que el mayor porcentaje se encuentra en el *Piptocoma discolor.* (Pigüe) 46.98 %, y seguidamente por el *Cecropia peltata L.* (guarumo) 5.56 %, *Inga edulis Mart.* (guabo) 4.54 %, *Jacaranda mimosifolia D.Don.* (jacaranda) 3.91 %, *Miconia Ruiz y Pav.* (colca) 3.17 % y *Myrica pubescens Humb. y Bonpl. ex Willd.* (laurel) 2.74 %, con mayor representativa para el aprovechamiento en los aserraderos que proviene los árboles del bosque secundario de la provincia de Pastaza.

3.2. Materia residual seca

La cantidad de biomasa de materia seca para fines energéticos según el contenido de humedad; indicamos esta cantidad de residuo que se echa a perder al ambiente en la provincia de Pastaza en la siguiente tabla.

Tabla 3. Total, de la biomasa seca que produce anualmente en toneladas (t)

Nombre común	Biomasa residual fresca (t) anual	Contenido de humedad de materia fresca (%)	Contenido biomasa o materia seca (%)	Total, de biomasa residual seca (t)
<i>Piptacoma discolor.</i>	13918022.20	62.63	37.37	5201164.90
<i>Cecropia peltata L.</i>	174133.76	53.54	46.46	80902.55
<i>Inga edulis Mart.</i>	145111.80	5.70	48.30	70089.00
<i>Jacaranda mimosifolia D.Don.</i>	107503.90	54.49	45.51	48925.03
<i>Miconia Ruiz & Pav.</i>	90921.78	52.05	47.95	43596.99
<i>Myrica pubescens Humb. & Bonpl. ex Willd.</i>	11927987.60	55.54	44.46	5303183.29

La biomasa fresca de las cinco especies forestales está representada por fases sólida de hemicelulosa, celulosa y lignina; fase líquida agua; fase gaseosa aire y vapor de agua según la estructura porosa de la madera, el analizar estas proporciones de la biomasa y su orden del mecanismo de secado fue según la experimentación realizados por (González y Campo, 2021).

3.3. Caracterización física, química y de carbono de los residuos maderables

Las propiedades físicas, químicas y el contenido de carbono de los residuos de las cinco especies maderables, muestran su importancia para su aprovechamiento como energía limpia, los resultados obtenidos presentan los siguientes valores significativos de la evaluación realizada con fines energéticos. En cambio, la carbonización, si presenta sus diferencias significativas en base seca. Las diferencias de las densidades de los análisis de las muestras de madera fresca y seco al ambiente con una humedad promedio de 8.0 % y con una desviación estándar en fresco de 0.5 %, como se muestra en la tabla 4. En el caso de la humedad se observa una homogeneidad en la pérdida de peso en el proceso de secado al ambiente. Y el análisis de las cenizas se observa diferencias de acuerdo a las especies donde podremos dar a conocer en la discusión la factibilidad de aprovechar para la producción de energía limpia según su contenido.

Tabla 4. Porcentaje de la humedad y cenizas en base ambiente y seca

Nombre Científico	Densidad Promedio	Humedad	En base fresca		En base seca	
			%		%	
		fresco y seco (g/cc)	Promedio %	Promedio	Desviación	Promedio
<i>Cecropia peltata L.</i>	0.699-0.449	8.62	1.29	0.07	1.41	0.07
<i>Inga edulis Mart.</i>	1.012-0.797	7.47	0.75	0.01	0.81	0.01
<i>Jacaranda mimosifolia D.Don.</i>	0.707-0.527	7.03	0.80	0.04	0.86	0.05
<i>Miconia Ruiz & Pav.</i>	1.40-1.061	7.98	0.96	0.03	1.05	0.03
<i>Myrica pubescens Humb. & Bonpl. ex Willd.</i>	1.099-0.928	8.93	1.80	0.09	1.98	0.10
Promedio Total	0.984-0.752	8.00	1.07	0.05	1.22	0.05

ANÁLISIS INMEDIATO

Los análisis de la conversión de la biomasa en cuanto a volátiles, carbono, cenizas y su poder calorífico superior se muestra las diferencias de los residuos forestales en la siguiente tabla 5. Sin embargo, el contenido de cenizas de algunas especies se encuentra en valores superiores al 1 %, lo que puede llevar a otro tipo de aprovechamiento a nivel de la industria.

Tabla 5. Porcentaje de análisis cenizas, volátiles y carbono fijo

Nombre Científico	% Cenizas	% Volátiles	% Carbono fijo	PCS [MJ/kg]
<i>Cecropia peltata L.</i>	1.41	83.86	14.73	20.05
<i>Inga edulis Mart.</i>	0.81	82.98	16.21	20.20
<i>Jacaranda mimosifolia D.Don.</i>	0.86	85.85	13.29	19.93
<i>Miconia Ruiz & Pav.</i>	1.05	84.36	14.59	19.51
<i>Myrica pubescens Humb. & Bonpl. ex Willd.</i>	1.98	82.50	15.52	18.91

Este análisis fue llevado a temperaturas (de 900 ± 5 °C) por un tiempo de 7 minutos), con respecto al estudio de las cinco especies con procedimientos y técnicas según las normativas expuestas en la metodología. Todo esto fue basado en la obtención del carbono fijo y su poder calorífico para determinar el potencial energético que brinda estos residuos forestales que se echa a perder en los aserraderos y en el campo sin dar ningún uso en la provincia de Pastaza.

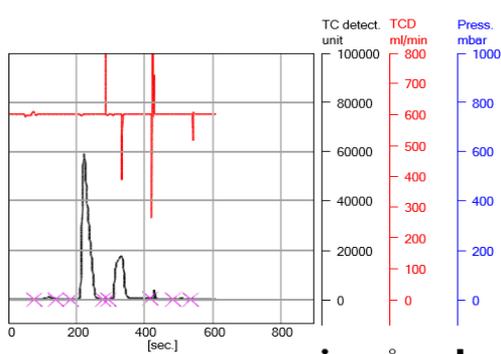
Tabla 6. Potencia de biomasa residual de materia seca y GWh y anualmente

Nombre común	Total, de biomasa residual seca (t)	Promedio PCS [MJ/Kg]	Mj	GWh
<i>Piptocoma discolor.</i>	5201164.89	19.05	99082.19	0.037744
<i>Cecropia peltata L.</i>	80902.54	19.92	1611.57	0.000452
<i>Inga edulis Mart.</i>	70088.99	20.20	1415.79	0.000393
<i>Jacaranda mimosifolia D.Don.</i>	48925.03	19.51	954.52	0.000267
<i>Miconia Ruiz & Pav.</i>	43596.99	18.91	824.41	0.000231
<i>Myrica pubescens Humb. & Bonpl. ex Willd.</i>	5303183.28	20.05	106328.82	0.029772
			Total GWh	0.058860
			Total, GWanual	515.62

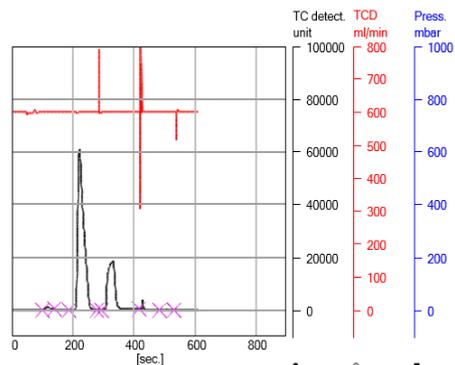
Según el cálculo de la cantidad de biomasa residual que se presenta en la tabla 5, esto permitiría generar un total de 515.62 GW anualmente en términos eléctricos, lo que podría ayudar a satisfacer las demandas eléctricas para la región amazónica.

ANÁLISIS ELEMENTAL

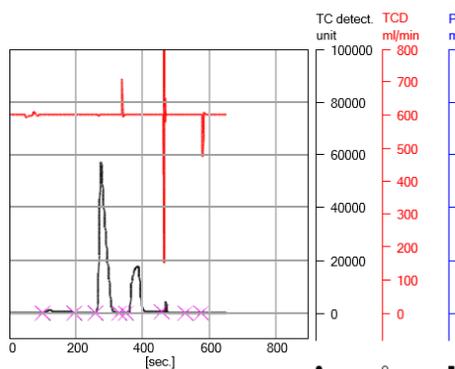
El análisis elemental fue realizado con tres replicas, utilizando diferentes técnicas para la obtención de los datos de su composición química. Al comparar estos análisis con otras composiciones de la madera varia de una especie a otra y dentro de la misma especie debido a su estructura química. Según las gráficas del presente estudio nos muestra sus diferencias son significativas.



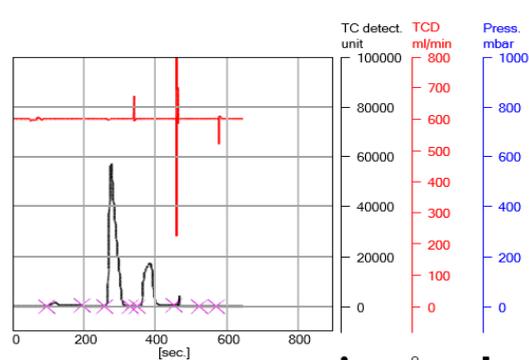
Gráfica 1. Análisis de laurel



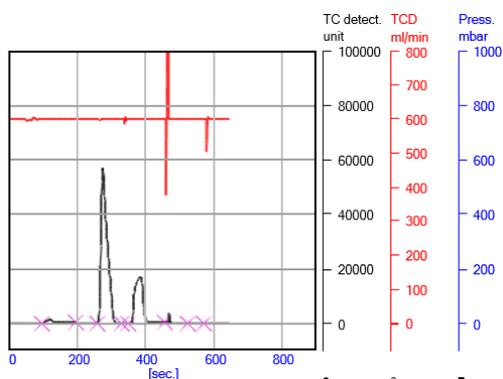
Gráfica 2. Análisis de guabo



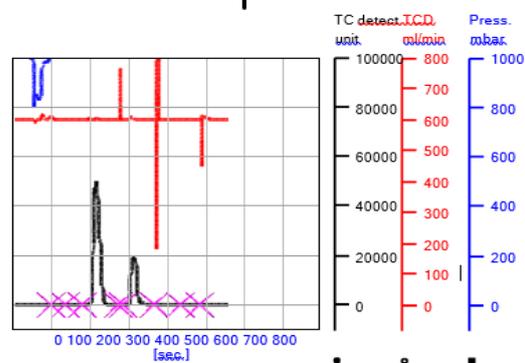
Gráfica 3. Análisis del guarumo



Gráfica 4. Análisis de jacaranda



Gráfica 5. Análisis de colca



Gráfica 6. Análisis de pigüe

Se tomo en consideración el estudio del pigüe, por su alto porcentaje en residuos sólidos para su aprovechamiento energético, como se observa las diferencias en relación con los compuestos de este análisis elemental siendo: N, C, H, S y O, según las gráficas 1-6, con picos diferentes debido a su propia naturaleza de cada especie y la temperatura utilizada para su degradación de los compuestos hemicelulosa, celulosa y lignina, que permitió obtener los porcentajes antes mencionados de los seis residuos forestales en la siguiente tabla 7.

Tabla 7. Análisis elemental de los residuos forestales

Nombre Científico	N [%]	C [%]	H [%]	S [%]	C/N ratio	C/H ratio	O [%]
<i>Cecropia peltata L.</i>	0.45	52.72	8.32	0.10	116.36	6.34	37.3
<i>Inga edulis Mart.</i>	0.53	52.86	8.16	0	99.75	6.48	37.70
<i>Jacaranda mimosifolia D.Don.</i>	0.85	52.15	8.38	0	62.97	6.22	37.83
<i>Miconia Ruiz & Pav.</i>	1.18	51.75	8.3	0	43.85	6.24	37.80
<i>Myrica pubescens Humb. & Bonpl. ex Willd.</i>	0.79	49.47	7.32	0.01	60.81	6.75	40.61

Según esta información se muestra el análisis del contenido de carbono fijo principalmente para el aprovechamiento de energía limpia a partir de estos residuos forestales.

3.4. Contenido de carbono de residuos forestales

El análisis del contenido porcentual de carbón de los residuos de las cinco especies forestales derivada del programa térmico según las gráficas de la 1 a la 6 las dos etapas de degradación térmico de los materiales lignocelulósicos que representa son: para *Cecropia peltata L.* (laurel) 1er etapa 220 - 300°C, 2da etapa 300 - 360°C, carbono fijo 14.73%, *Inga edulis Mart.* (guabo) 1era etapa 210 - 260°C y 2da etapa 300 - 350°C, carbono fijo 16.21 %, *Jacaranda mimosifolia D.Don.* (guarumo) 1era etapa 280 - 320°C, y 2da etapa 350 - 400°C, carbono fijo 13.29 %, *Jacaranda mimosifolia D.Don.* (jacaranda) 1era etapa 280 - 320 °C, 2do pico 360 - 400 °C, carbono fijo 14.59%, colca 1era etapa 280-320 °C y 2da etapa 360 - 400 °C, 16.33 %. Y mayor temperatura fue el porcentaje de volátiles de cada una de las muestras de los residuos. Toda esta información está basada en los promedios de las tres repeticiones que fueron analizadas.

4. Discusión

Las variaciones de potencial de biomasa fresca total debido a su potencial productivo y a su extensión de bosque secundario de 100987.00 ha, que genera la parte residual de las cinco especies forestales y otra la especie que suma de mayor con su porcentaje mayoritario en la cantidad de biomasa residual 13918022.20 Tn, por ocupar un 46.97 % y seguido como se indica en la tabla 1- 5 con el porcentaje bajo de 5.36 % y de igual similitud de las otras especies, debido a su crecimiento rápido del *Piptocoma discolor*, que le ubica en el primer lugar como una especie nativa del bosque secundario por su potencial productivo (González y, que esta producción se echa a perder, en el bosque y en los diferentes aserraderos y sin brindar ninguna alternativas industrial, he aquí nace esta necesidad de aprovechar esta biomasa con fines energéticos, debido a que las otras especies que le siguen una propiedad de crecimiento lento que son similares a otras especies (Hurtado y Guayara, 2013), el volumen de producción de biomasa maderable

8754 m³ que representa el 30 % y la diferencia residual corresponde al 70 % de producción anual del *Piptocoma discolor* (Villalba, 2019); sin embargo, no se descarta esta especie con bajo porcentaje de población que por su propiedades maderables son aprovechadas por la industria de la madera y quedando un volumen residual representativo como recursos renovables natural (UNESCO, 2014). Según las estadísticas de las otras provincias como se muestra son bajas en relación al potencial de residuos en una cantidad de 608.63 Tn de masa forestal anualmente en zona urbana de Cuenca (Yáñez-Lñiguez y Esteban, 2020).

La eliminación de la humedad promedio de equilibrio de los residuos de las especies forestales se encuentra en un 8.0 %, se debe a su periodo de la eliminación de la humedad del ambiente y temperatura de 25-30°C y el secado en horno 105°C, similares a los estudios de etapas de secado que van desde el punto B hasta el punto D, considerando sus cuatro etapas de evaporación del agua para estos fines secado de biomasa a) el agua libre o capilar, b) el agua latente (de impregnación, absorción, retenida o higroscópica), c) vapor de agua en las cavidades celulares o lúmenes y d) el agua fija o de constitución que forma parte de las fibras (Rojas-Vargas, 2016). Con parámetros similares a los comportamientos descritos por (González y Campo, 2021). En el análisis inmediato, las diferencias que se muestran en base a los porcentajes de los compuestos de la tabla 4, cenizas, volátiles, carbono fijo y su poder calorífico de los residuos de las biomásas maderables, de acuerdo a las temperaturas en rangos desde los 280 - 500 °C, utilizas concuerdan con estudios demostrados (Suárez-Patlán y Sandoval-García, 2018), en base a estos resultados se las cinco tipos de residuos se puede evidenciar el 16.21 % de carbono fijo y su poder calorífico superior de 20.20 (Mj/kg), siendo el más alto *Inga edulis Mart.* (guabo), esto se debe a que su contenido en cenizas equivale al 0.81 % siendo el valor más bajo dentro del grupo, según la velocidad de degradación demostrado por estudios recientes (Alvarado, 2018). Otra de las características de estos residuos de la biomasa maderable, debido a su bajo contenido en cenizas y porque otras investigaciones similares benefician para la perspectiva industrial o energética de producción limpia (Arroyo-Vinueza y Reina-Guzmán, 2016). Los residuos que se encuentra por debajo del 1 % en cenizas y de volátiles (60-80 %) de estos residuos, lo que evidencia claramente de reducir la formación de incrustaciones en los equipos industriales (Quesada y Bigñot, 2019).

Los resultados de los análisis térmicos y químicos, de acuerdo a la tabla 7. Influye el poder calorífico superior en su eficiencia energética (Sánchez y Fuquen González, 2014). A diferencia con otras biomásas similares reportados (Portero, 2018). Esto permitirá la producción, manejo y aprovechamiento de estos residuos forestales, así como hacen de presentarse en otras plantaciones que permita satisfacer la demanda energética (Vignote, 2016). A continuación, en las gráficas 1-6, se evidencia las curvas (TDC) de la codigestión-aisladas CHNS. Otros estudios del análisis elemental, según las características físico químicas de la madera y carbono de Pino, Abeto, Nogal, Álamo y Roble, de estas ocho especies vegetales cuentan con mínimo y máximo de carbono de 49.50-53.30 %, Hidrogeno 5.70- 6.50 %, Nitrógeno 0.10-0.20 %, Oxígeno de 40.30-43.10 % y Cenizas 0.20-3.30 % según la literatura en base seca (Rivera y Uceda, 2014). Nuestros análisis inmediato y elemental de los residuos forestales que se muestran en la tabla 5-7. Mantienen una similitud con las propiedades físicas, químicas y térmicas para los fines energéticos (González y Zúñiga, 2022), de igual manera otras semejanzas con respecto a su contenido de carbono y los otros componentes físico químicos estudiados en especies vegetales de la Amazonía peruana (Rivera y Uceda, 2014).

5. Conclusiones y recomendaciones

En cuanto a la densidad de los residuos de la madera varía según su especie y sin embargo en relación con los componentes de cenizas mantienen una diferencia significativa *Cecropia peltata* L., *Miconia Ruiz y Pav.*, y *Myrica pubescens* Humb. y Bonpl. ex Willd, por encima del 1 %, no son factibles para el uso industrial y sin embargo las otras tres especies como, *Piptocoma discolor*, *Inga edulis* Mart. y *Jacaranda mimosifolia* D.Don. son valores que se encuentra por debajo del 1 % lo que significa de gran importancia para el aprovechamiento industrial porque evita la acumulación o incrustación de las cenizas en las tuberías de las calderas para la generación de vapor y energía limpia.

Los residuos maderables de las seis especies representan un potencial de biomasa residual de 14.500.292.12 t, y el carbono fijo en un promedio de 14.78 %, en base seca. En cuanto a su rendimiento de acuerdo con sus componentes de hemicelulosa, celulosa y lignina, guardan una similitud entre las otras especies.

Según la cantidad de residuos y su poder calorífico superior en términos energéticos, de estas seis especies en promedio representaría un potencial de energía 515.62 GW eléctricos térmicos anualmente, lo que podría ayudar a satisfacer las demandas eléctricas de las áreas de vulnerables y de difícil acceso en la región amazónica.

Se recomienda para el aprovechamiento industrial el *Piptocoma discolor*, *Inga edulis* Mart. y *Jacaranda mimosifolia* D.Don. por la cantidad de residuo y por su porcentaje bajo en cenizas que permitirá generar una energía limpia.

Bibliografía

- Agostinho-Da, Silva, D., Otomar-Caron, B., Sanquetta, C, R., Behling, A., Schmidt, D., Bamberg R., Eloy, E., Dalla-Corte, A,P., 2014. Ecuaciones para estimar el poder calorífico de la madera de cuatro especies de árboles DOI: 10.5154/r.rchscfa.2013.09.035/
- Altamirano, A., Schlegel, B., Thiers, Ó., Miranda, A., Pilquinao, B., Orrego, R. y Rocha, C. (2015). Disponibilidad y potencial energético de la biomasa del bosque nativo para el desarrollo de la dendroenergía en el centro-sur de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 36(2), 223-237. doi:10.4067/S0717-92002015000200008/
- Alvarado, J., y Rutiaga, J. (2018). Estudio de cinética en procesos termogravimétricos de materiales lignocelulósicos. *Maderas.Ciencia y tecnología*, 20(2), 221-238. doi:10.4067/S0718-221X2018005002601/
- Álvarez, E., Benítez, D., Velásquez, C. y Cogollo, Á. (2013). Densidad básica del fuste de árboles del bosque seco en la costa caribe de Colombia. *IntRopica*, 1-12. https://www.researchgate.net/publication/272823581_Stem_basic_density_of_dry_forests_trees_in_the_Colombian_Caribbean_coast/
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (1998). D346 Muestreo Carbón. https://www.academia.edu/8946698/standard_method_for_moisture_analysis_of_particulate_wood_fuels/
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2004). Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement. Obtenido de <https://civiledu.co/wp-content/uploads/2021/08/C-114.pdf/>
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2017). Standard Test Methods for Proximate Analysis of the Analysis Sample of Coal and Coke by Instrumental Procedures <https://tienda.aenor.com/norma-astm-d5142-02a-020740>.
- Arroyo-Vinueza, J, S., y Reina-Guzmán, W. S. (2016). Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor. *INGENIUS*, 20-29. doi:10.17163/ings.n16.2016.03/

- Asociación Española de Normalización [UNE]. (2007). Caracterización de residuos. Toma de muestras de residuos. Esquema para la preparación y aplicación de un plan de muestreo. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0038279>
- Asociación Española de Normalización [UNE]. (2011). Requisitos de seguridad de equipos eléctricos de medida, control y uso en laboratorio. Obtenido de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0047601>
- Asociación Española de Normalización [UNE]. (2015). Biocombustibles Sólidos - Determinación del contenido total de carbono, hidrógeno y nitrógeno. Obtenido de [https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0055295#:~:text=ISO%2016948%3A2015-,Biocombustibles%20s%C3%B3lidos,\(ISO%2016948%3A2015\)](https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0055295#:~:text=ISO%2016948%3A2015-,Biocombustibles%20s%C3%B3lidos,(ISO%2016948%3A2015)).
- Asociación Española de Normalización [UNE]. (2016a). Biocombustibles Sólidos - Determinación del contenido de ceniza (ISO 18122:2015). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?Tipo=N&c=N0056486>
- Asociación Española de Normalización [UNE]. (2016b). Biocombustibles Sólidos - Determinación del contenido de humedad. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0056325>
- Asociación Española de Normalización [UNE]. (2016c). Biocombustibles Sólidos - Determinación del contenido en materia volátil. Obtenido de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0056450/>
- Asociación Española de Normalización [UNE]. (2018). Biocombustibles Sólidos - Determinación del poder calorífico (ISO 18125:2017). Obtenido de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060319>
- Bustamante García, V., Carrillo Parra, A., Prieto, Ruiz, J. A., Corral-Rivas, J.J. y Hernández, Díaz, J. C. (2016). Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión. 7(38), 5-24. <https://www.redalyc.org/pdf/634/63450027007.pdf/>
- Calderon, R. D., y Dalila, E. (Febrero de 2012). Cuantificación del carbono almacenado en tres fincas en tres estados de desarrollo del bosque de pino. Managua, Nicaragua. <https://repositorio.una.edu.ni/1158/>
- Chuncho, G., Chuncho, C., y Aguirre, Z. (2019). *Anatomía y morfología vegetal*. Universidad Nacional de Loja., <https://unl.edu.ec/sites/default/files/archivo/2019-12/ANATOMÍA Y MORFOLOGÍA VEGETAL.pdf/>
- Garay, R., y Henríquez, M. (2012). RATAMIENTO QUÍMICO DE ACETILACIÓN EN MADERA DE PINUS RADIATA CHEMICAL ACETYLATION TREATMENT IN RADIATA PINE WOOD. *Ciencia y Tecnología de la Madera*, 1-12. doi:10.4067/S0718-221X2012000100009
- González, J. E., Oliva M. D., Zambrano V. D., Ledesma, R. D, Bonilla, M. J., Casco G. E, C. y Zúñiga, É.E. (2022). Modelación y simulación computacional de fluido del Piptocoma discolor (pigüe) para la optimización de la combustión en el Ecuador. *Enfoque UTE*, 13(2), 48-67. doi:10.29019/enfoqueute.795/
- González, J.E., Papue, A., González, V., Borja, A. y Oliva, D. (2018). Crecimiento y Conservación de Piptocoma discolor (Pigüe) en la Provincia de Pastaza. *CFORES CIENCIAS FORESTALES*, 6(3): 366-379, 14. Obtenido de <http://scielo.sld.cu/pdf/cfp/v6n3/2310-3469-cfp-6-03-366.pdf>
- González, J., Coronel, B., Quevedo, V., Uvidia, H., Oliva, D., Morón. J. y Campo, M. (2021). Biomass Potential and Kinetics of Drying Model of Piptocoma discolor (pigüe) as a Source of Renewable Energy Source in Ecuador. *Enfoque UTE* 12(1), 74-90. doi:10.29019/enfoqueute.695/
- Gual-Díaz, M., Rendon-Correa, A., y Mariaca, R. (2020). Especies vegetales con uso combustible por comunidades rurales mexicanas. *Etnobiología*, 18(3), 113-135. Obtenido de <https://revistaetnobiologia.mx/index.php/etno/article/view/388/383>
- Gutiérrez-Pulido, H., y Salazar, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. MC Graw Hill. https://www.researchgate.net/publication/31775471_Análisis_y_Diseño_de_Experimentos_Ed/
- Hurtado, E., y Guayara, Á. (2013). Potencial de uso de Piptocoma discolor (Kunth) Pruski en Sistemas Silvopastoriles. *Ingenierías & Amazonía*, 6(1), 23-30. <https://core.ac.uk/download/pdf/288214962.pdf/>
- INAMHI, I. N. (2015). *Anuario Meteorológico*. INAMHI https://www.inamhi.gob.ec/meteorologia/boletines/bolet_anu.pdf/

- Legarda, I. E. (2019). Centros de servicios, una oportunidad de negocios en la industria de la madera del Ecuador. Guayaquil: Universidad Especialidades Espiritu Santo. <http://repositorio.uees.edu.ec/bitstream/123456789/3072/1/LEGARDA%20IZQUIERDO%20EMILIO%20JOSE.pdf>
- MAE, M, D. (2014). *Evaluación Nacional Forestal Resultados*. Ministerio de Ambiente del Ecuador. Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). <http://geonetwork.ambiente.gob.ec/documents/10179/185860/MAE+2014a.+Evaluacion+Nacional+Forestal+-+Resultados.pdf/3733cfe0-c2e5-4813-95af-8197533bd3a3;jsessionid=5rK0xP7SlgcwsdNHYZzQP7Go?version=1.0/>
- Manrique, S., Ojeda, M., Sánchez, J., Alonso, A. y Garrido, S. (2021). *Sistemas de biomasa y bioenergía: Casos ejemplares en Iberoamérica. Hacia la sustentabilidad bioenergética territorial*. Red Iberoamericana de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T) constituida bajo la promoción del Programa. (Ed.) https://www.researchgate.net/publication/353924493_Sistemas_de_Biomasa_y_Bioenergia_Casos_Ejemplares_En_Iberoamerica_Hacia_la_sustentabilidad_bioenergetica_territorial/
- Márquez-Montesino, F., Carballo-Abreu, L. R., Álvarez-Olivera, P. A. y Castillo-Ramos, R. (2009). Estudio de las posibilidades energéticas de la madera de Jambolán (*Syzygium Cumini*), del Municipio de Pinar del Río, Cuba. *AVANCES*, 1- 9. http://www.ciget.pinar.cu/Revista/No.2009-3/articulos/Estudio_posibilidades_energ_madera_jambol.pdf.
- Norma Chilena Oficial [NCh176/1]. (1984). Madera - Parte 1: Determinación de humedad Norma oficial Chilena <https://www.coursehero.com/file/42582400/NCh0176-1-1984pdf/>.
- Pantoja-Bucheli, A. D., Castillo-Muñoz, J. F., y Guerrero-Ordoñez, J. (2016). Metodología para el aprovechamiento del potencial energético con biomasa forestal en el departamento de Nariño: Caso de estudio. *Ingeniería Solidaria*, 12(20), 43-59. doi:10.16925/in.v19i20.1415/
- Patiño Martínez, P. (2 de Junio de 2014). Biomasa Residual vegetal: Tecnologías de transformación y estado actual. *Innovaciencia*, 2(1): 45-52, 8. doi:10.15649/2346075X.255/
- Pérez, F, M. (2020). Guía técnica para clasificación de residuos. España. Obtenido de <https://agqlabs.es/wp-content/uploads/GUIA-PARA-CLASIFICACION-DE-RESIDUOS-PPT-WEBINAR.pdf/>
- Portero, H. (2018). Estudio experimental de peletizado en planta piloto y de combustión en caldera de biomasa baja potencia. (Tesis Doctoral). Ciudad Real.: Universidad de Castilla-La Mancha. <https://ruidera.uclm.es/xmlui/bitstream/handle/10578/18416/TESIS%20Portero%20Gonz%c3%a1lez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Quesada, O., Cantos, M., Duharte, W., Pozo, D., & Bigñot, L. (2019). Efecto de la velocidad de calentamiento y la biomasa en la cinética de su pirólisis. *Revista Cubana de Ingeniería Química*, 31(3), 1-18. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443561090012>.
- Rimarachín, M, M. (2017). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar el contenido de biomasa total y la captura de dióxido de carbono en una plantación forestal de *Eucalyptus torelliana* en el sector Indoche Distrito y Provincia de Moyobamba, Región. Obtenido de <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/2844549>
- Rivera, P., & Uceda, M. (2004). Características físico - químicas de la madera y carbon de once especies forestales peruanas. (F. d. CEDINFOFOR, Ed.) *Revista forestal de Perú*, 14 (2), 1-8. Obtenido de <http://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/rfp/article/viewFile/137/135>
- Rivera, P., y Uceda, C. M. (2014). Características físico químicas de la madera y carbón de once especies forestales de la Amazonía Peruana. *Revista Forestal del Perú*, 14(2), 1-8. doi:10.21704/rfp.v14i2.137/
- Rojas-Vargas, A. (2016). Balance de energía en un horno de secar madera. *Tecnología Química*, 36(1), 1-13. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/4455/445543786003/html/>
- Saldarriaga, E. J. (2015). Avances en el modelado de la combustión de Biomasa en Spouted bed cónico. https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/15799/TESIS_JUAN%20FERNANDO_SALDARRIAGA%20_ELORZA.pdf?sequence=1/

- Sánchez, C., y Fuquen González, H. (2014). Eficiencia Energética. (3, Ed.) DESARROLLO TECNOLÓGICO E INNOVACIÓN EMPRESARIAL, 1. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/333089139_EFICIENCIA_ENERGETICA.
- Standards: Regulations and Style Guidelines [TAPPI T], 2. (1985). Carbohydrate composition of extractive-free wood and wood pulp by gas-liquid chromatography. Technical Association of the Pulp & Paper Industry. Obtenido de https://infostore.saiglobal.com/en-us/Standards/TAPPI-T-249-1985-1062627_SAIG_TAPPI_TAPPI_2471653/
- Suárez-Patlán, E. E., Carrillo-Ávila, N., Fuentes-López, M. E. y Sandoval-García, J. (2018). Calidad química del carbón vegetal de dos especies maderables bajo diferentes condiciones de pirólisis controlada. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 4(14), 10-15. https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Ciencias_Ambientales_y_Recursos_Naturales/vol4num14/Revista_de_Ciencias_Ambientales_y_Recursos_Naturales_V4_N14_2.pdf/
- Texto unificado de legislación secundaria de medio ambiente [TULSMA]. 2017 capítulo IV De Los Estudios Ambientales. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/TULSMA.pdf>.
- Uceda-Castillo, M. E. (1985). Determinación del Poder Calorífico de 20 especies forestales de Amazonía Peruana. *Forestal del Perú*, 12, 1-20. [http://cedinfor.lamolina.edu.pe/Articulos_RFP/Vol12_no1-2_84_\(16\)/vol12_art8.pdf/](http://cedinfor.lamolina.edu.pe/Articulos_RFP/Vol12_no1-2_84_(16)/vol12_art8.pdf/)
- UNESCO. (2014). Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo: agua y energía, resumen ejecutivo. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000226962/>
- Vignote, S. (2016). Procesos termoquímicos de la madera y en general de la biomasa. https://www.researchgate.net/publication/310697694_PROCESOS_TERMOQUIMICOS_DE_LA_MADERA_Y_EN_GENERAL_DE_LA_BIOMASA/link/583566d808aef19cb82269ee/download/
- Villalba, V. (2019). Determinación de la viabilidad técnica y económica de la combustión del Pgüe (Piptocomma discolor) para su uso como combustible en la Provincia de Pastaza: Puyo: Universidad Estatal Amazónica. <https://repositorio.uea.edu.ec/handle/123456789/792>
- Yáñez-Iñiguez, L., Urgilés-Urgilés, E. y Zalamea-León, E. (2020). Potencial de los residuos forestales para la contribución a la matriz energética urbana. *Revista La Granja*, 32(2), 165-202. doi:10.17163/lgr.n32.2020.04/

Análisis numérico del funcionamiento de un Convertidor de Energía de las Olas (WEC) usando CFD

Numerical analysis of operation of a Wave Energy Converter (WEC) using CFD

Cristian Andrade-Terán¹, Esteban Valencia², Edgar Cando^{3,4}

Resumen

El presente estudio analiza numéricamente, mediante CFD, el funcionamiento de un convertidor de energía de las olas WEC (por sus siglas en inglés) con condiciones de mar locales. La dinámica del dispositivo causada por la propagación de las olas fue caracterizada en el *software* comercial ANSYS Fluent, aplicando criterios de reducción de dominio, celdas estructuradas y malla dinámica con 6DOF. Realizando simulaciones a escala 1:5 de un dispositivo real instalado en altamar la predicción de la dinámica del fluido fue lograda con un error de entre 3.6 % y 4.7 % comparando la elevación de la superficie libre de las olas y entre 5 y 6 % en el desplazamiento angular del sólido en relación con el experimental. Para el análisis, del modelo INOCAR-SWAN se extrajo datos en puntos cercanos a Esmeraldas y al golfo de Guayaquil, detallando la factibilidad de generación de energía del dispositivo en estas zonas. Mejores resultados en cuanto a la dinámica del dispositivo fueron obtenidos en estados de mar en profundidad y períodos de olas más largos, presentando potencia mecánica promedio entre 0.165 kW y 0.22 kW.

Palabras clave

CFD; energías renovables; NTW; VOF; WEC

Abstract

The present study numerically analyzes, using CFD, the operation of a wave energy converter (WEC) with local sea conditions. The dynamics of the device caused by the propagation of the waves was characterized in the commercial software ANSYS Fluent applying domain reduction criteria, structured cells, and dynamic mesh with 6DOF. Performing 1:5 scale simulations of a real device installed offshore the prediction of the fluid dynamics was achieved with an error between 3.6 % and 4.7 % comparing the elevation of the free surface of the waves and between 5 and 6 % in the angular displacement of the solid in relation to the experimental. For the analysis, data was extracted from the INOCAR-SWAN model at points near Esmeraldas and the Gulf of Guayaquil, detailing the feasibility of generating energy from the device in these areas. Better results in terms of device dynamics were obtained in sea states with greater depth and longer wave periods, presenting average mechanical power between 0.165 kW and 0.22 kW.

Keywords

CFD; NTW; renewable Energy; VOF; WEC

- 1 Escuela Politécnica Nacional, EPN, Departamento de Ingeniería Mecánica, Quito-Ecuador [cristian.andrade01@epn.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0002-0220-7481>].
- 2 Escuela Politécnica Nacional, EPN, Departamento de Ingeniería Mecánica, Quito-Ecuador [esteban.valencia@epn.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0002-6496-9908>].
- 3 Escuela Politécnica Nacional, EPN, Departamento de Ingeniería Mecánica, Quito-Ecuador [edgar.cando@epn.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0002-8738-7994>].
- 4 Universidad Internacional del Ecuador, UIDE, Escuela de Ingeniería Mecatrónica, Quito, Ecuador. [edgar.cando@epn.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0002-8738-7994>].

1. Introducción

La capacidad de producir energía a partir de recursos renovables es una línea de investigación en creciente desarrollo, la cual busca dejar la dependencia de recursos fósiles y tecnologías que contaminan al medioambiente. Enmarcados en el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 7 para energía asequible y no contaminante, la energía proveniente de mares y océanos posee un enorme potencial que podría ser explotado de una manera más eficiente y económica. Además, los patrones existentes en el océano son más predecibles que otras fuentes de energía renovables de naturaleza estocástica (Bellec, 2017). Sin embargo, es necesario que en los próximos años exista un crecimiento acelerado en cuanto a tecnología para que este tipo de energía contribuya de forma importante en el cuidado ambiental y el desarrollo sostenible (Chowdhury et al., 2021). La implementación de modelos matemáticos y simulación numérica para diseñar y predecir el funcionamiento de mecanismos de transformación de energía es una técnica muy utilizada en la actualidad, ayudando a mejorar la eficiencia y rendimiento de estos.

Con el objetivo de modelar y predecir el comportamiento de las olas en el mar se crean los llamados Numerical Wave Tanks (NWT), herramienta que con una creciente accesibilidad a dispositivos con alto poder computacional se vuelve muy útil en la ingeniería marina para diversos campos de estudio (Marques et al., 2018). Estos proporcionan una valiosa herramienta de pruebas en la experimentación y optimización de dispositivos generadores de energía, además de ser de alta fiabilidad cuentan con una buena rentabilidad por no requerir de costos de instalación física. De acuerdo con Windt et al. (2018) con la tecnología en constante crecimiento, los modelos numéricos pueden ser mejorados y optimizados para reducir tiempo de simulación y costo computacional.

Varios estudios han utilizado la dinámica de fluidos computacional para desarrollar modelos numéricos para dichos tanques. Alamian et al. (2015) presentaron un modelo de tanque de olas para estudiar olas regulares generadas por un pistón en un tanque 2D, por medio del método BEM, el cual ayudó mucho para calibrar tanques experimentales. Kim et al. (2016) utilizando CFD realizaron estudios de cargas de olas sobre estructuras submarinas fijas, implementando un NWT con gran éxito. Bruinsma et al. (2018) estudiaron la interacción fluido-estructura para estructuras flotantes con amarre. Para esto utilizaron un NWT donde la propagación se realizó mediante teoría de olas Lineal y 2nd Order Stokes. Otros estudios se centraron en optimizar tanques numéricos para mejorar la predicción del comportamiento de las olas al implementar diferentes técnicas de simulación y de mallado (Sun et al, 2016; Penalba et al, 2018; Chen, et al., 2019). En los últimos años se han utilizado modelos CFD para caracterizar la interacción fluido-sólido en dispositivos de generación energía que utilizan aire, con resultados satisfactorios y que han ayudado en el diseño de dichos mecanismos (Andrade-Terán, 2022; Rodríguez et al, 2021).

En el estudio de convertidores de energía a partir de las olas llamados 'dispositivos WEC', por sus siglas en inglés (Wave Energy Converter), en español denominados 'tecnología undimotriz'; los NWT se introducen como una técnica útil y fiable para simular el funcionamiento de los convertidores. Zhi et al. (2018) aplicaron la técnica de NWT en el estudio del funcionamiento de un Overtopping Wave Energy Converter (OWEC) utilizando CFD con olas regulares mostrando resultados con alta fiabilidad respecto al experimental. E. J. Ransley ha participado en múltiples estudios (Ransley, 2015; Ransley, Greaves, Raby, Simmonds y Hann, 2017; Ransley, et al., 2017) de modelos numéricos para predecir el funcionamiento de WEC en diferentes condiciones. En dichos estudios se utilizaron modelos con malla dinámica aplicando 6DOF y modelos multifási-

cos VOF para la interacción aire-agua en el tanque numérico, tomando como principal modelo de WEC el WaveStar Machine uno de los dispositivos más prometedores para la transformación de energía a partir de las olas, que fue ideado en el año 2000 por los entusiastas de la navegación Niels and Keld Hansen y que ha sido desarrollado constantemente en las últimas décadas (Piera, 2019). Sin embargo, en Latinoamérica han sido escasos los estudios referentes a este tipo de tecnología y esfuerzos por asimilar propuestas existentes. Por lo tanto, el propósito de este estudio es realizar simulaciones de la dinámica existente cuando interactúa el WEC del tipo WaveStar Machine con un flujo de olas controlado, para predecir el funcionamiento del convertidor en condiciones típicas de la región.

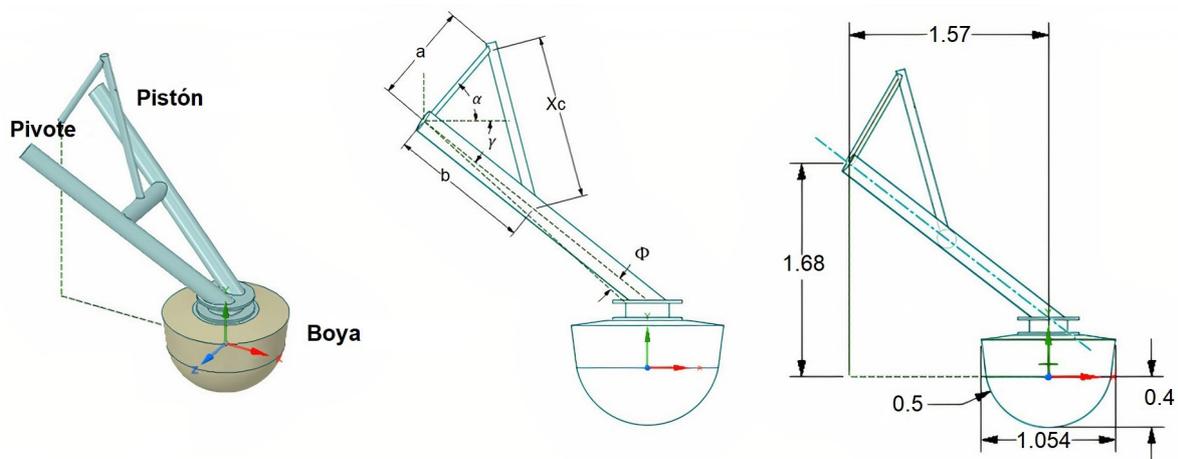
2. Metodología

Para analizar la interacción fluido-sólido en la transformación de energía proveniente de las olas, se reproduce un modelo numérico CFD basado en el modelo físico instalado en Coast Ocean Wave Basin (University of Plymouth, 2021) escalado 1:5. Del modelo operacional INOCAR-SWAN (Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador, 2022) se obtienen datos típicos de estados de mar en las costas ecuatorianas, para ser estudiados. Varios períodos de olas son simulados partiendo del reposo, para analizar la evolución en el tiempo del flujo y el desplazamiento que se provoca en el WEC por los diferentes estados de olas.

2.1 Geometría dispositivo y tanque de olas

Las pruebas se realizan tomando como dispositivo generador un WEC del tipo Wavestar Machine, el cual consiste en un absorbedor flotante hemisférico, un pistón hidráulico, un rotor y una estructura fija al fondo del mar o a una plataforma flotante (Jakobsen et al., 2016). El movimiento del flotador mientras sube y baja por las olas se transfiere a través de la hidráulica al rotor para producir electricidad (Kramer, Laurent y Peter, 2011). La geometría del dispositivo utilizada se basa en el modelo instalado en la Universidad Plymouth con las dimensiones descritas en los trabajos de Ransley et al. (2017) y de Windt et al. (2020) de un brazo simple del Wavestar Machine, como muestra la figura 1.

Figura 1. Dimensiones y ángulos de interés de un brazo del WEC tipo Wavestar Machine

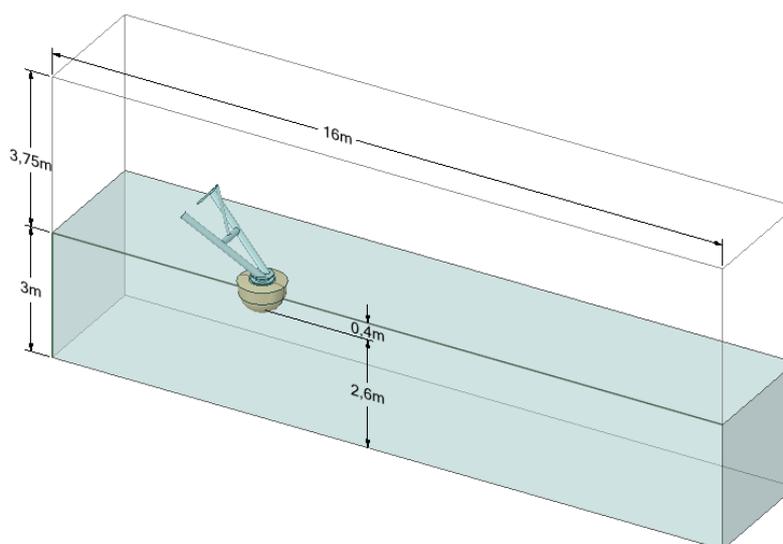


El dispositivo mecánicamente opera bajo las siguientes condiciones físicas y mecánicas (se toma como origen de coordenadas el centro geométrico de la boya):

- Centro de gravedad: (-0.17; 0.35; 0) m
- Centro de rotación: (-1.57; 1.68; 0) m
- Masa total: 220 kg
- Inercia aproximada: 124 kg m²

El tanque de olas, figura 2, donde se colocará el WEC para las simulaciones geométricamente es modelado con las siguientes dimensiones: 16 m de largo, 3 m de profundidad, 3.75 m de altura libre y 6 m de ancho. El dominio computacional del tanque es simplificado implementando un eje de simetría en la dirección de no incidencia de las olas. El sistema de conversión de energía será dispuesto en el tanque numérico, aplicando la simplificación propuesta por Windt et al. (2020) donde se coloca geométricamente solo la boya flotante, ya que es la única parte del WEC que entra en contacto directamente con el fluido; esta se encuentra instalada estratégicamente 4.97 m de la entrada del flujo y 2.6 m del fondo del tanque en la posición de flotabilidad estable, 0.4 m de la boya sumergida.

Figura 2. Geometría del tanque de Olas Simulado



2.3 Simulación numérica

Numéricamente se modela la propagación de olas sobre el dispositivo generador de energía simulando la interacción fluido-sólido. Inicialmente el WEC es fijado en la posición de flotabilidad estable para simular el flujo de olas con la boya como obstáculo, para así conseguir datos necesarios para validar la dinámica del fluido y optimizar el cálculo del NWT. Luego se habilita un único grado de libertad rotacional en el eje z al WEC, para simular el movimiento que causan las olas al sólido.

2.3.1 ECUACIONES DE GOBIERNO

El flujo transitorio en el NWT es resuelto por simulación numérica directa (DNS) mediante ecuaciones de conservación de masa (Ecuación 1) y de cantidad movimiento (Ecuación 2) para flujo laminar.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0 \quad 1$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \vec{F} \quad 2$$

Además, un modelo multifásico de volumen de fluido (VOF) es utilizado para caracterizar la interacción de las fases (aire-agua) en la superficie libre en donde se tiene $\alpha = 1$ cuando la celda está llena de agua y $\alpha = 0$ llena de aire. La ecuación 3 es la que rige la variación de fracción de volumen.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla(\vec{v} \alpha) = 0 \quad 3$$

Donde:

\mathbf{p} : es la presión estática [Pa] $\in \mathbb{R}^3$

\vec{F} : son las fuerzas gravitacionales y fuerzas externas ejercidas [N] $\in \mathbb{R}^3$.

\vec{v} : velocidad del fluido [m/s] $\in \mathbb{R}^3$.

ρ : densidad [kg/m³].

t: tiempo [s].

α : fracción de volumen.

μ : viscosidad del fluido [Pa s].

La teoría Second Order Stokes es utilizada para la generación de olas en el modelo multifásico VOF, esta se rige por la ecuación diferencial parcial de Laplace, ecuación 4 (Maâtoug y Ayadi, 2016).

$$\zeta(X, t) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^i b_{ij} \xi^i \cos(j\alpha) \quad 4$$

Donde:

X: coordenada horizontal de incidencia directa para la ola

k : número de ola angular [rad/m], $k = (\frac{2\pi}{\lambda})$ donde λ es la longitud de ola

ξ : corresponde a la inclinación de la ola [rad].

α : fracción de volumen.

DINÁMICA DEL SÓLIDO

La teoría 6DOF calcula movimientos tridimensionales a partir de las fuerzas y momentos aplicados a la superficie (ANSYS Inc., 2013). El movimiento del WEC en el tanque se modela limitando

a un único grado de libertad rotacional con respecto al eje Z, la expresión que rige esta teoría está descrita por la ecuación 5.

$$\dot{\vec{\omega}}_B = L^{-1}(\sum \vec{M}_B - \vec{\omega}_B \times L \vec{\omega}_B) \quad 5$$

Donde:

L : es el tensor de inercia.

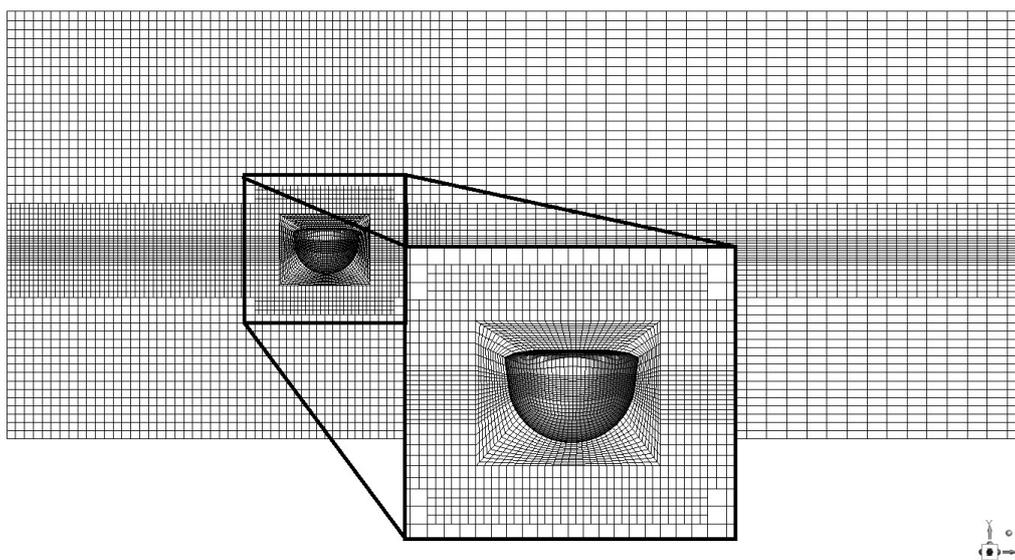
\vec{M}_B : el vector de momento del cuerpo [Nm].

$\vec{\omega}_B$: es la velocidad angular del cuerpo [rad/s].

2.3.2 MALLA

La malla propuesta presenta refinamiento en el área de influencia de las olas y las zonas cercanas al sólido para lograr mejor precisión del flujo y disminuir la cantidad de celdas necesarias para caracterizar el fenómeno. Esta se construye mediante celdas hexaédricas estructuradas mediante la técnica de mallado por bloques utilizando ANSYS ICEM CFD, la malla obtenida es mostrada en la figura 3.

Figura 3. Malla utilizada para la simulación del tanque con el WEC instalado



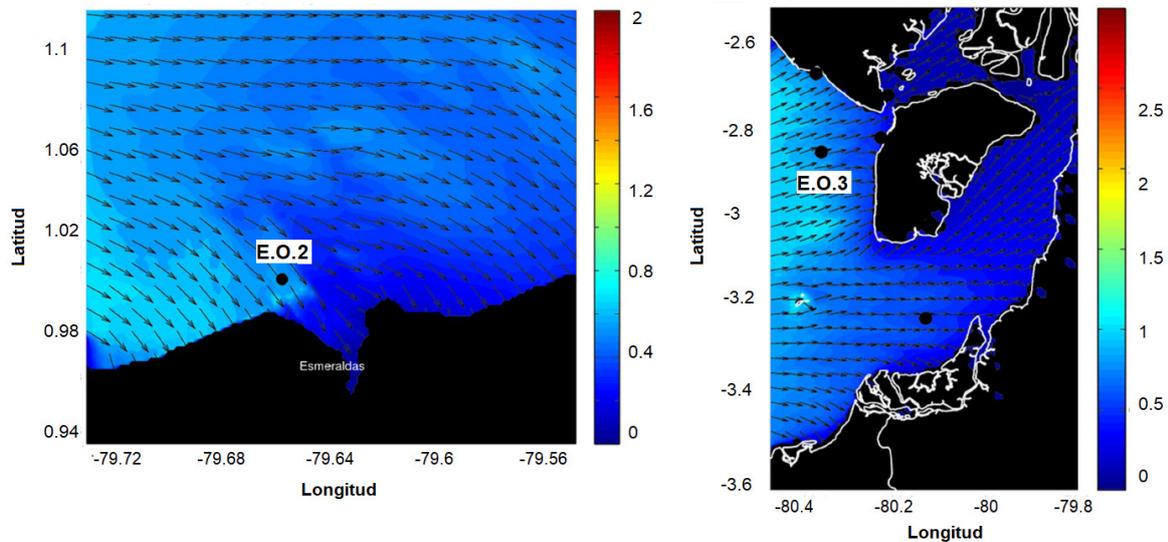
Virtualmente se establece una región de malla deformable suficiente para un libre movimiento de la boya y otra región con las celdas cercanas al sólido que siguen el movimiento pasivamente sin deformarse. Aplicando técnicas de Smoothing y Layering se permite la deformación de las celdas con el movimiento de la boya, sin perder la calidad de la malla. La discretización estructurada por bloques permite calidad alta en la malla, donde únicamente el 0.006 % son celdas con calidad mínima de entre 0.35 a 0.5, el resto de la malla presenta calidad superior a 0.55; estas celdas poseen un índice de ortogonalidad superior al 0.49. La independencia de malla se realizó monitoreando un punto en el dominio del NTW aguas arriba de la boya, logrando independencia en cuanto a presión en el punto monitoreado con una malla con 239 832 celdas y 256 779 nodos.

2.3.3 CONFIGURACIÓN DE SOLUCIÓN

Las simulaciones CFD han sido resueltas utilizando ANSYS Fluent con doble precisión para control de decimales. El método utilizado para el acople Presión-Velocidad en el esquema PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) activando skewness-neighbor con correcciones, para mejorar la convergencia cuando se deforme la malla. En la discretización espacial se empleó: el esquema PRESTO! para la presión, Second Order Upwind para el momento y un esquema Compressive para la discretización de la fracción de volumen. La pared superior del tanque se establece como salida libre a la presión atmosférica, simulando un tanque abierto. Para la condición de entrada se activa la teoría de OpenWave, estableciendo un estado inicial tipo Flat para un tanque sin olas al iniciar la simulación. La superficie libre del líquido en 0 m y el fondo del tanque a -3 m permitiendo 3.75 m para el flujo e interacción del aire. La condición de salida del flujo se establece con Pressure-outlet activando Open Channel manteniendo el fondo del tanque a -3 m y nivel de agua en 0 m.

Las condiciones para E.O.2 y E.O.3 son escaladas 1:5 de los datos reales obtenidos tanto para la altura significativa como para el período promedio de los estados de mar típicos durante el mes de abril. Datos recolectados de las boyas virtuales en las zonas cercanas a las costas de Esmeraldas y al golfo de Guayaquil, respectivamente, figura 4.

Figura 4. Puntos del modelo INOCAR-SWAN utilizados para estados de oleaje E.O.2 y E.O.3



Los estados de oleaje utilizados, enlistados en la tabla 2, se establecen en las condiciones de contorno mediante Second Orden Stokes parametrizando las condiciones de mar necesarias.

Tabla 1. Condiciones de oleaje para las pruebas escaladas del modelo INOCAR-SWAM

	Tipo	Altura de las olas (H)	Longitud (λ)	Período (T)
Estado de control	E.O. 1	0.15 m	3.06 m	1.4 s
Boya Esmeraldas	E.O. 2	0.11 m	4 m	1.5 s
Boya G. Guayaquil	E.O. 3	0.18 m	1.5 m	0.98 s

2.4 Transmisión del movimiento

Con el WEC libre se controla un grado de libertad rotacional al registrar la posición angular (θ) del centro de gravedad de toda la estructura cada time step respecto de la posición inicial del WEC. Dicho movimiento de la boya provoca el desplazamiento del cilindro hidráulico (X_c) el cual se comprime y se extiende con el flujo de las olas transmitiendo aceite a presión al rotor. La ecuación 5, es la utilizada para trasladar geoméricamente el movimiento de la boya hacia el pistón hidráulico. Las dimensiones y ángulos de interés considerados en el cálculo están presentados en la figura 1.

$$X_c(t) = 1.84 - \sqrt{\left(a^2 + b^2 - 2 \cos\left(\gamma' \frac{\pi}{180}\right)\right)}$$

6

Donde:

$$a = 1.385 \text{ [m]}$$

$$b = 0.89728 \text{ [m]}$$

$$\Phi = 5.23^\circ$$

$$\varphi = 71^\circ$$

$$\beta(t) = 38.1^\circ + \Phi - \theta$$

$$\gamma(t) = \beta - \Phi$$

$$\gamma'(t) = \varphi + \gamma$$

3. Resultados y discusión

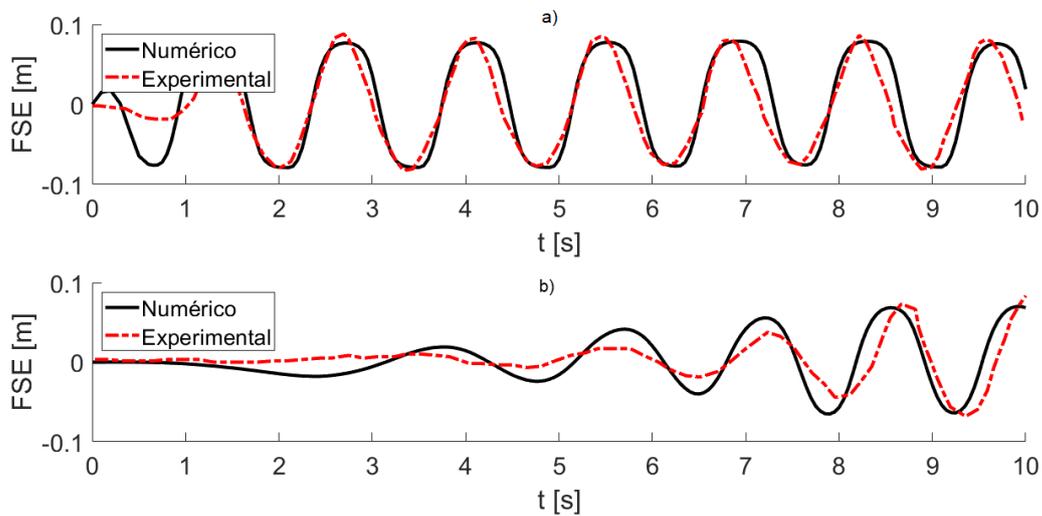
El tanque inicialmente con aguas tranquilas con la boya en su estado estable de flotabilidad es irradiado con olas durante 10s, logrando extender la propagación de las olas a lo largo de todo el tanque, necesario para analizar la dinámica del conjunto fluido-sólido.

3.1. Validación

La elevación de la superficie libre (FSE), a través del tiempo del WEC fijado en la posición estable, simulando el estado E.O. 1 obtenida de la simulación numérica es comparada con las pruebas de flujo realizadas experimentalmente, como se muestra en la figura 5. Se toma como puntos de control dos puntos del dominio computacional, los cuales se encuentran a 4.77 m aguas arriba (figura 5a) y 2.04 m aguas abajo (figura 5b) respecto al centro geométrico de la boya. En rojo entrecortado se encuentran los datos del estudio experimental y en línea negra continua, datos del numérico realizado en el presente estudio.

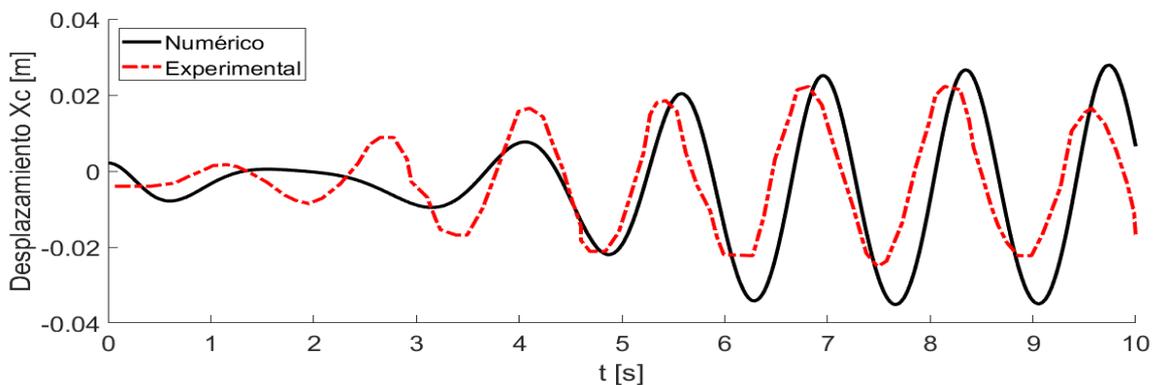
Se puede observar que las curvas obtenidas son muy similares a las presentadas a partir de las pruebas experimentales, demostrando que todas las simplificaciones realizadas al modelo numérico no disminuyen la precisión y confiabilidad del cálculo. Los resultados presentan un error de predicción respecto al modelo experimental de entre 3.6 y 4.7 % en el flujo de olas E.O. 1, comparando los máximos y mínimos de los valores obtenidos. La propagación de las olas hasta encontrarse con la boya muestra una congruencia temporal de décimas de segundo, variación de altura de olas de menos de 1 cm y luego de la boya la dispersión es mínima siendo el error de flujo aceptable para el estudio.

Figura 5. FSE numérico y experimental: a) aguas arriba, b) aguas abajo



La ecuación 5 es aplicada para calcular el desplazamiento del cilindro hidráulico X_c , transformando el desplazamiento angular libre de la estructura, a un solo punto de absorción de energía. La figura 6, presenta una comparación de los datos obtenidos para el desplazamiento del cilindro en la simulación E.O. 1 con los datos del experimental (Ransley et al., 2017).

Figura 6. Desplazamiento del cilindro pistón X_c , experimental y numérico

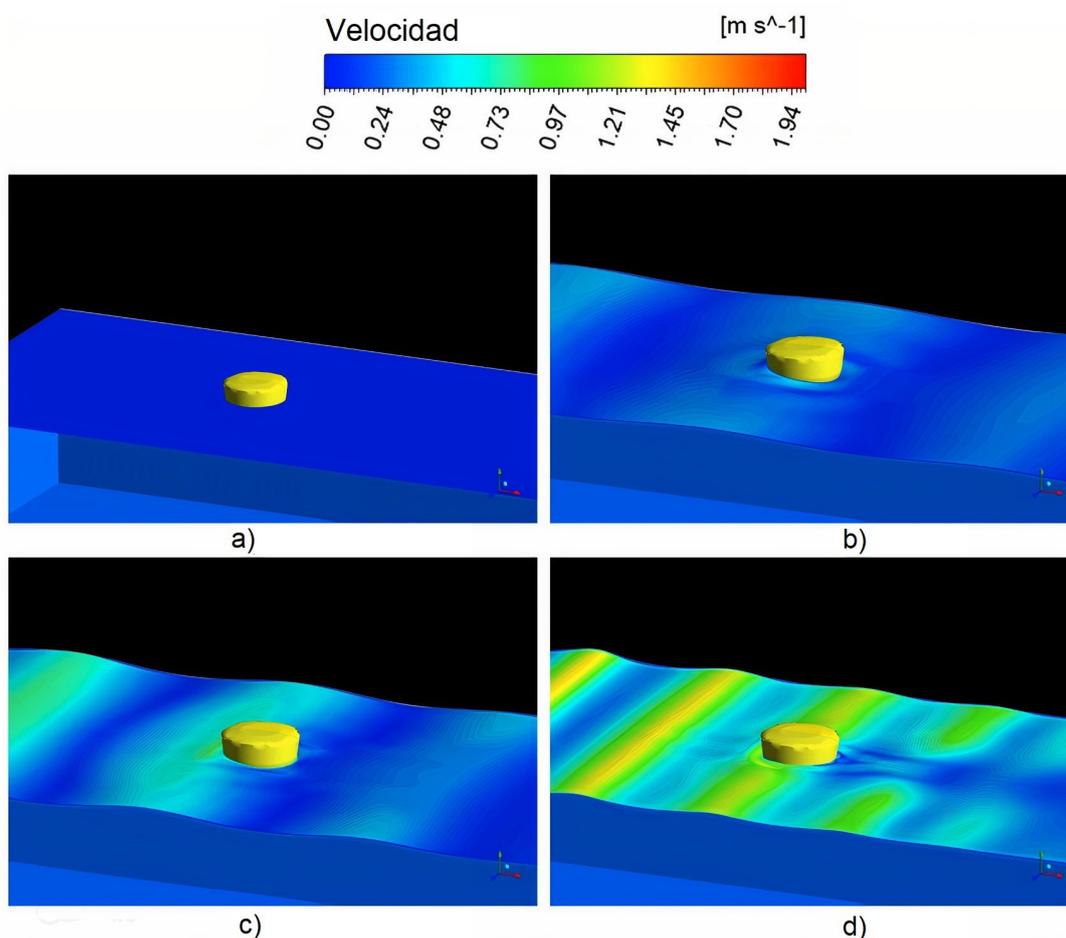


El desplazamiento del cilindro X_c en el numérico muestra un ligero desfase temporal respecto al experimental, en cuanto a la amplitud existe un error máximo del 6 %. En un lapso aproximado de 3s, los resultados oscilan de una forma irregular, esto se debe a que el dispositivo no alcanza la estabilidad al iniciar la simulación (Ransley et al., 2017).

3.2 Respuesta del dispositivo a diferentes estados de olas

El libre movimiento del brazo del WEC con centro de giro en el punto pivote por la interacción con el fluido es ilustrado en la figura 7, donde se establece una isosurface bajo el criterio $VOF = 0,5$. Esta representa la elevación de la superficie libre del agua (FSE), mostrando contornos de velocidad del fluido alrededor de la boya.

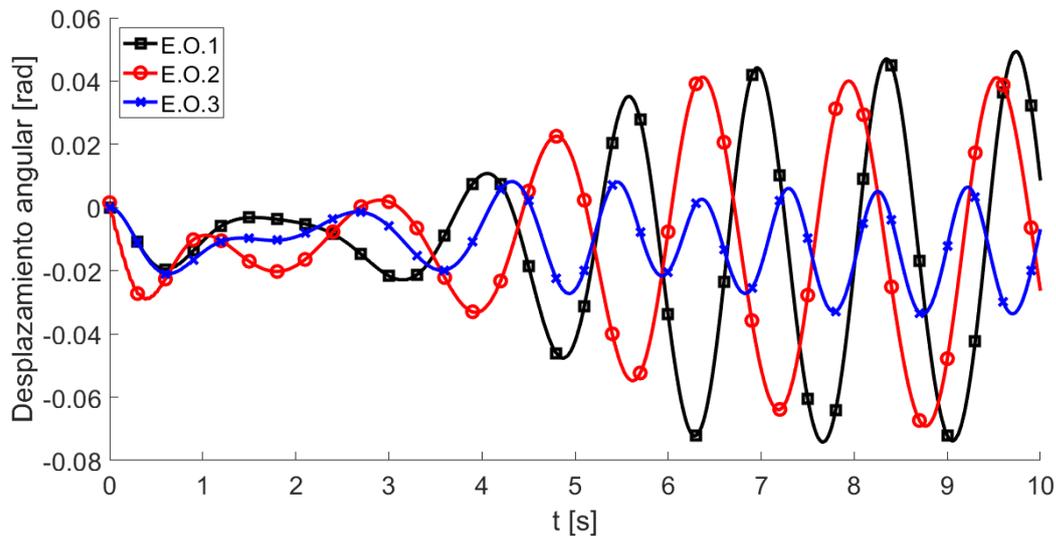
Figura 7. Contornos de velocidad: a) Reposo, b) E.O. 1, c) E.O.2 y d) E.O.3



Como se observa en la figura 7, existe mayor velocidad de flujo en el estado de olas 3 (E.O. 3) donde existe mayor altura en las olas con períodos más cortos. Para los estados 1 y 2 (E.O. 2) se observa flujo con menor velocidad, donde la altura de las olas es menor en períodos más largos. Sin embargo, el desplazamiento que provocan los estados E.O.1 y E.O.2 son superiores a los provocados por las olas del E.O.3, como lo demuestra la gráfica en la figura 8. Esto podría deberse a que un flujo muy rápido no permite desarrollar completamente la propagación de la ola. Períodos muy bajos provocan desorden en las olas, mientras que períodos largos permiten a la ola mantener mayor energía mientras se desplazan (Kayac Autovaciable, 2019).

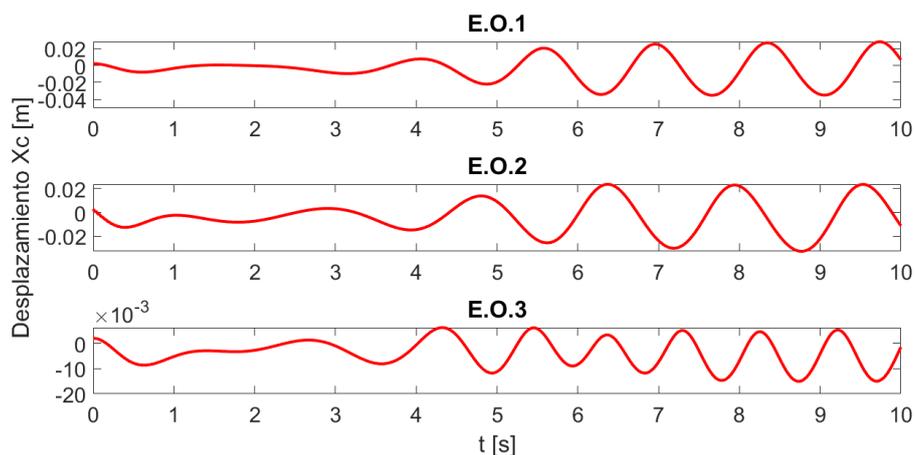
La respuesta del dispositivo, al impacto de las Olas sobre la boya, se ve reflejado en el desplazamiento angular (θ) del brazo del WEC con respecto al punto pivote. Durante las simulaciones se ha registrado a través del tiempo este desplazamiento (figura 8), partiendo desde el punto de flotabilidad estable se presenta la oscilación del brazo para cada prueba durante los 10 s simulados.

Figura 8. Desplazamiento angular del centro de gravedad respecto al punto pivote



Estos resultados sugieren mejor desempeño del convertidor con los estados 1 y 2, los cuales presentan olas con períodos más largos. Asimismo, este desplazamiento angular es trasladado al movimiento lineal del cilindro hidráulico (Ecuación 5), donde se denota mejor transformación de energía desde las olas en E.O.1 y E.O.2 que en E.O.3. La figura 9 muestra el desplazamiento que se genera en el cilindro hidráulico X_c , en respuesta al movimiento del WEC provocado por el paso de los diferentes tipos de olas estudiadas, denotando las condiciones más favorables para la transformación de la energía a partir de las olas.

Figura 9. Desplazamiento del cilindro hidráulico X_c para estados E.O.1, E.O.2 y E.O.3



El flujo de olas E.O.2 provoca un desplazamiento del pistón X_c en promedio 5.5 % superior al dato del estado de control E.O.1, significando energéticamente una potencia superior en dicho porcentaje por cada flotador que se instale en el sistema del WEC. Por otro lado, el estado E.O.3 muestra un decaimiento en promedio del 67 % en la dinámica del pistón absorbedor por lo que se reduciría significativamente la potencia hidráulica del mismo.

3.3 Transferencia de energía

La potencia (P_o), por metro de columna de agua, existente en los estados de mar estudiados se calculan utilizando la ecuación 6 (Perez, 2018). La potencia mecánica en el brazo del WEC en respuesta, es calculado aplicando la ecuación 7, considerando el valor del momento (M) ejercido respecto al punto pivote y la velocidad angular del brazo analizada a partir del desplazamiento (Fernández et al., 2018).

$$P_o = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \quad 7$$

$$P_M = M \frac{d\theta}{dt} \quad 8$$

Donde:

H: Altura de Ola.

T: Período de Ola.

La tabla 2 presenta la potencia disponible de las olas en los estados E.O.1, E.O.2 y E.O.3 y la potencia mecánica del brazo del WEC provocada por dichos estados.

Tabla 2. Potencial disponible a partir de las olas

Tipo	Potencia disponible (P_o)	Desplazamiento máximo provocado	Potencia mecánica (P_M)
E.O. 1	0.31 kW/m	0.07 rad	0.22 Kw
E.O. 2	0.17 kW/m	0.06 rad	0.165 Kw
E.O. 3	0.31 kW/m	0.03 rad	0.08 Kw

El dispositivo con el estado de mar E.O.3 presenta menor potencia mecánica a pesar de existir propagación de olas con altura significativa superior al resto. El estado de mar E.O.2 aporta una de potencia de oleaje inferior, sin embargo, la potencia mecánica generada en el brazo del WEC para este estado es 50 % superior a la existente con el estado E.O.3.

5. Conclusiones y recomendaciones

La metodología de simulación numérica utilizada permitió obtener alta precisión en los resultados del desplazamiento del sólido y mínima distorsión en la propagación de las olas. Obteniendo así resultados con alta fiabilidad en el estudio del funcionamiento del WEC, presentando un error de predicción de milímetros en la propagación de las olas y de 1 a 2 cm en la dinámica del pistón actuador. Esta precisión en los resultados permitió analizar la generación de energía que se conseguiría con el WEC funcionando bajo las condiciones en las costas de Ecuador.

Las simulaciones denotan que el flujo de olas con altura significativa alta y períodos más largos favorecen la transformación de energía undimotriz. El mayor desplazamiento del pistón absorbedor de energía en los estados E.O.1 y E.O.2 lo demuestran. En estos, el brazo del WEC presenta un desarrollo completo de la dinámica con desplazamiento angular entre 3 y 4 ° y

hasta 4 cm de desplazamiento en el cilindro hidráulico a escala 1:5. También se observa que, a pesar de presentar una alta disponibilidad energética proveniente de las olas, un estado de mar con flujo muy rápido (olas de períodos cortos y altura pronunciada) no asegura la generación de energía elevada. Estos estados ocurren en puntos con poca profundidad de mar, como lo es el punto estudiado cerca al golfo de Guayaquil, presentando aproximadamente un 50 % de potencia mecánica inferior al punto en la Costa de Esmeraldas.

Es recomendable realizar más estudios de funcionamiento, replicando el presente estudio, en diferentes zonas de la región en Sudamérica para poder empezar a explotar el potencial existente en los océanos y mares. A la par es necesario realizar estudios del impacto que causaría el dispositivo al ecosistema donde se lo instale, ya que le principal objetivo es desarrollar dispositivos de generación de energía con mínimo impacto ambiental.

Bibliografía

- Alamian, R., Shafaghat, R. y Ketabdari, M. (2015). Wave simulation in a numerical wave tank, using BEM. *AIP Conf. Proc.*, 1(1648), <https://doi.org/10.1063/1.4912978/>
- Andrade-Terán, C. (2022). Simulación numérica de la interacción fluido-estructura para predecir la respuesta de aerogeneradores sin palas a vibraciones inducidas por el viento en ciudades compactas. *Enfoque UTE*, 13(2), 1-16. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.796>
- ANSYS Inc. (2013). ANSYS Fluent Theory Guide. U.S.A. Southpointe.
- Bellec, M. (2017, septiembre 28). Wave vs tidal energy: new developments in hydropower. (E. McDonnell, Ed.) *Conect Global*. Retrieved from <https://medium.com/@CUBECconnects/wave-vs-tidal-energy-new-developments-in-hydropower-e23382ad5ef/>
- Bruinsma, N., Paulsen, N. y Jacobsen, N. (2018). Validation and application of a fully nonlinear numerical wave tank for simulating floating offshore wind turbines. *Ocean Engineering*, 147, 647-658. doi:10.1016/j.oceaneng.2017.09.054/
- Chen, H., Qian, K., Zhihua, M., Wei, B., Ye, L., Derek, C. y Clive, M. (2019). Application of an overset mesh based numerical wave tank for modelling realistic free-surface hydrodynamic problems. *Ocean Engineering*, 97-117. doi:10.1016/j.oceaneng.2019.02.001/
- Chowdhury, M., Rahman, K. y Selvanathan, V. e. (2021). Current trends and prospects of tidal energy technology. *Environment, Development and Sustainability* (23), 8179-8194. doi:10.1007/s10668-020-01013-4/
- COAST Laboratory. (2021). *Ocean Basin*. (University of Plymouth) Recuperado el Febrero de 2021, de COAST Laboratory-Facilities: <https://www.plymouth.ac.uk/schools/school-of-engineering-computing-and-mathematics/coast-laboratory/coast-laboratory-facilities>
- Fernández, Z. F., Rincon, A., Ayuso, J., Hernández, R., & Cueto, J. L. (2018). *Metodología para medir la potencia absorbida en el eje z del sistema mano-brazo debida a impactos*. Cadiz: XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18.
- Jakobsen, M., Scott, B., Iglesias, G. y Kramera, M. (2016). Characterization of loads on a hemispherical point absorber wave energy converter. *International Journal of Marine Energy*, 13, 1-15. doi:10.1016/j.ijome.2016.01.003/
- Kayac Autovaciable. (2019, Octubre 15). *Que es y cómo afecta el período a las olas*. Retrieved from <https://kayacautovaciable.com.ar/meteorologia/que-es-y-como-afecta-el-periodo-a-las-olas/>
- Kim, S., Kim, K., Park, J., Jeon, G. y Chun, H. (2016). Numerical simulation of wave and current interaction with a fixed offshore substructure. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 8(2), 188-197. doi:10.1016/j.ijnaoe.2016.02.002/
- Kramer, M., Marquis, L. y Frigaard, P. (2011). Performance Evaluation of the Wavestar

- Prototype. En A. S. Bahaj (Ed.), 9th ewtec 2011: Proceedings of the 9th European Wave and Tidal Conference, Southampton, UK, 5th-9th September 2011 University of Southampton.
- Maâtoug, A. M. y Ayadi, M. (2016). Numerical simulation of the second-order Stokes theory using finite difference method. *Alexandria Engineering Journal*, 55(3), 3005-3013. doi:10.1016/j.aej.2016.04.035/
- Marques, F., Gameiro, A. y Ferreira, A. (2018). Numerical simulation of regular waves: Optimization of a numerical wave tank. *Ocean Engineering*, 170, 89-99. doi:10.1016/j.oceaneng.2018.10.002/
- Penalba, M., Davidson, J., Windt, C. y Ringwood, J. V. (2018). A high-fidelity wave-to-wire simulation platform for wave energy converters: Coupled numerical wave tank and power take-off models. *Applied Energy*, 655-669. doi:10.1016/j.apenergy.2018.06.008/
- Perez, J. (2018). Cuantificación del potencial energético undimotriz en las costas del Caribe colombiano. *Espacios*, 39, 8. doi:10.17081/invinno.5.2.2758/
- Piera, V. (2019, September). *Wavestar, the platform that create clean energy from the waves*. Retrieved from SmartGreen Post.
- Ransley, E., Greaves, D., Raby, A., Simmonds, D., Jakobsen, M., & Kramer, M. (2017). RANS-VOF modelling of the wavestar point absorber. *Renew Energy*(109), 49-65. doi:10.1016/j.renene.2017.02.079
- Ransley, E. (2015). *Survivability of wave energy converter and mooring coupled system using cfd* (Ph.D. thesis). School of Marine Science and Engineering, University of Plymouth.
- Ransley, E., Greaves, D., Raby, A., Simmonds, D., & Hann, M. (2017). Survivability of wave energy converters using CFD. *Renew Energy* (109), 235-247. doi:10.1016/j.renene.2017.03.003/
- Rodríguez, C. V., Ríos, A. y Luyo, J. E. (2021). CFD Design of Urban Wind Turbines: A Review and Critical Analysis. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 11(2), 618-637.
- SAT-INOCAR. (Abril de 2022). INOCAR-SWAM. (Instituto oceanográfico de la armada del Ecuador) Obtenido de https://www.inocar.mil.ec/modelo_olas/index.php/
- Sun, L., Zang, J., Chen, L., Eatock, R. y Taylor, P. (2016). Regular waves onto a truncated circular column: A comparison of experiments and simulations. *Applied Ocean Research*, 650-662. doi:10.1016/j.apor.2016.03.011/
- Windt, C., Davidson, J. y Ringwood, J. V. (2018). High-fidelity numerical modelling of ocean wave energy systems: A review of computational fluid dynamics-based numerical wave tanks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 610-630. doi:10.1016/j.rser.2018.05.020/
- Windt, C., Davidson, J., Ransley, E. J. y Greaves, D. (2020). Validation of a CFD-based numerical wave tank model for the power production assessment of the wavestar ocean wave energy converter. *Renewable Energy* (146), 2499-2516. doi:10.1016/j.renene.2019.08.059/
- Zhi, H., Zhen, L. y Hongda, S. (2018). Numerical study on overtopping performance of a multi-level breakwater for wave energy conversion. *Ocean Engineering*, 150, 94-101. doi:10.1016/j.oceaneng.2017.12.058/0

Impacto del uso de herramientas tecnológicas en la producción acuícola

Impact of the use of technological tools aquaculture

Jhordani Guélac-Gómez¹, Jeison Elí Sánchez-Calle², Miguel Angel Valles-Coral³

Resumen

La acuicultura peruana está en auge, por tanto, amerita implementar su tecnificación desde una perspectiva sostenible y competitiva. El objetivo esta investigación es identificar el panorama actual de la acuicultura peruana y los factores que limitan su desarrollo; asimismo, analizar los beneficios del uso de herramientas tecnológicas en la acuicultura. Para ello, se aplicó una metodología de revisión basado en tres fases: i) elaboración de la pregunta de investigación; ii) búsqueda de documentos; y iii) revisión y selección de estudios. Se utilizó un motor de búsqueda google académico, bases de datos Scopus, ScienceDirect, Web of Science (WOS), Scielo y Redalyc. La revisión permitió afirmar que, la acuicultura en el Perú se desarrolla en pocas regiones y con escasas especies. Según PNIPA, los factores que limitan su desarrollo están relacionados al incumplimiento de normas sanitarias vigentes, embarcaciones no inscritas en Registros Públicos y la ausencia de controles de acreditación para pescadores artesanales.

La tecnificación en el proceso de alimentación permite reducir costos operativos. Los sensores permiten visualizar la variación de los parámetros en tiempo real reduciendo el índice de mortalidad en los peces. El conteo y clasificación automática reduce el estrés del pez y evita el perjuicio económico de la producción. Se concluye que, para lograr la tecnificación acuícola, se deben realizar trabajos articulados entre gobierno y productores, implantando políticas y estrategias que garanticen mayor rentabilidad y sostenibilidad en el tiempo.

Palabras clave

Acuicultura; automatización; innovación; proceso acuícola; productividad; Tecnologías de la información

Abstract

Peruvian aquaculture is booming, so it deserves to be technified from a sustainable and competitive perspective. The objective of the review was to identify the current panorama of Peruvian aquaculture and the factors that limit its development, as well as to analyze the benefits of the use of technological tools in aquaculture. To this end, a review methodology was applied based on three phases: i) development of the research question; ii) document search; and iii) review and selection of studies. The search engine used was Google Scholar, Scopus, ScienceDirect, Web of Science (WOS), Scielo and Redalyc databases. The review showed that aquaculture in Peru is developed in few regions and with few species. According to PNIPA, the factors limiting its development are related to noncompliance with current sanitary regulations, vessels that are not registered in public registries, and the absence of accreditation controls for artisanal fishermen.

Technification of the feeding process reduces operating costs. Sensors make it possible to visualize the variation of parameters in real time, reducing the fish mortality rate. Automatic counting and classification reduces fish stress and avoids economic damage to production. The conclusion is that, in order to achieve aquaculture technification, the government and producers must work together, implementing policies and strategies that guarantee greater profitability and sustainability over time.

Keywords

Aquaculture; aquaculture process; automation; innovation; information technology, productivity

1 Universidad Peruana Unión, Tarapoto, Perú [jhordani.gomez@upeu.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0002-6897-3250>].
2 Universidad Peruana Unión, Tarapoto, Perú [jeisonsanchez@upeu.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0001-8039-7682>].
3 Universidad Peruana Unión, Tarapoto, Perú [miguel.valles@upeu.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0002-8806-2892>].

1. Introducción

En la última década, la actividad con mayor expansión en el mundo ha sido la acuicultura (Naspirán-Jojoa et al., 2022), superando el ritmo de crecimiento anual de otras producciones, convirtiéndose en el 50 % de los productos con mayor consumo en la actualidad (Perretta et al., 2019).

La acuicultura se define como una actividad de producción, basada en el uso de recursos naturales para la crianza de organismos acuáticos, en el cual se incluyen peces, moluscos, crustáceos y plantas acuáticas (Sarmiento et al., 2019).

La incorporación progresiva de la tecnología en el desarrollo y producción acuícola ha permitido implementar nuevas formas para contribuir al desarrollo sostenido de este sector (Nederlof et al., 2021). Tovar et al. (2019) afirman que la producción acuícola se ha convertido en una de las principales fuentes de divisas después de la producción petrolera y merece mayor atención tanto técnica, tecnológica y de control ambiental.

Las herramientas tecnológicas facilitan y permiten optimizar los procesos, logrando mayor productividad y gestión eficiente de la producción acuícola (Del Carpio-Gallegos y Miralles, 2019).

En el continente asiático, la acuicultura está en constante desarrollo, por la implementación de políticas y un régimen de economía abierta del mercado, en el que se plantean propuestas que favorecen al productor, al consumidor y al cuidado del medio ambiente (Cuéllar Lugo et al., 2018).

Fukushima et al. (2016) sostienen que China es un país promotor e impulsor de sistemas acuícolas, a raíz de esto han logrado detectar fallas o cambios en el sistema productivo en tiempo real, logrando optimizar la toma de decisiones en el monitoreo y control del proceso.

El continente americano no es ajeno a la tecnología, ya que a través de empresas privadas se invierte en áreas de investigación, desarrollo e innovación, los cuales tienen como objetivo crear productos y servicios óptimos para el sector acuícola (Reyna et al., 2019).

Las innovaciones, sin duda, permiten la optimización de recursos y procesos productivos (Cargnin et al., 2022), que a la larga benefician al productor, obteniendo mejores resultados en la producción, incrementando su productividad y rentabilidad (Fukushima et al., 2016).

En regiones del Perú, los procesos como el recambio de agua, alimentación y otras labores propias de la actividad se manejan de forma tradicional (Gómez et al., 2022); es decir, manual; generando un monitoreo y control deficiente del proceso (Fukushima et al., 2016).

Si bien es cierto el Estado peruano cuenta con programas que facilitan al productor regular y promover el desarrollo sostenible de la actividad acuícola (Zárate et al., 2018), en gran parte de las regiones del país, específicamente en zonas de la Sierra y Selva, la comercialización de peces es limitada, debido que los productores no satisfacen los estándares de comercialización que el mercado demanda (Fukushima et al., 2016), esto es que no se tiene un adecuado monitoreo y control de factores biológicos, efectos de cultivo, cosecha y procesamiento, que la Red Nacional de Información Acuícola (RINA) lo promueve a través la cooperación de instituciones del sector público y privado.

En países desarrollados, a través de la implementación de alimentadores automáticos, monitoreo y control de parámetros físico-químicos del agua y algoritmos de conteo y clasificación de los peces han logrado la optimización del tiempo, bajos costos y la disminución de errores sistemáticos (Silva de Abreu et al., 2020).

Lo anterior, impulsa a investigar y reflexionar acerca de herramientas tecnológicas implementadas en países desarrollados con éxito en el sector acuícola; y que de cierta manera,

su planificación estratégica sirva de apoyo para el desarrollo pesquero en el Perú (Rojas-Molina et al., 2017).

Teniendo en cuenta los antecedentes, esta revisión se planteó identificar el panorama actual de la acuicultura en el Perú y los factores que limitan su desarrollo. Así mismo, se analizó los beneficios que tiene el uso de herramientas tecnológicas en la alimentación, el control de los parámetros físico químicas del agua, el conteo y clasificación de peces en la acuicultura.

2. Metodología

Se aplicó una metodología de revisión bibliográfica adaptado de Castiblanco Montañez et al. (2022) y Angraini et al. (2019), que se basa en tres fases para la búsqueda y análisis de la literatura: i) elaboración de la pregunta; ii) búsqueda de documentos; y iii) revisión y selección de estudios (tabla 1).

Tabla 1. Fases de la búsqueda y análisis de la literatura.

FASES	MÉTODO	RESULTADO
I	Elaboración de la pregunta	¿Cuál es el panorama actual de la acuicultura en el Perú?, ¿Cuáles son los factores que han limitado su desarrollo? ¿Cuáles son los beneficios que tiene el uso de herramientas tecnológicas en la alimentación, el control de los parámetros físico químicas del agua, el conteo y la clasificación de peces en la acuicultura?
II	Búsqueda de documentos	Se realizó a partir de la combinación de las palabras claves definidas con la combinación de conectores lógicos "AND" y "OR" y revisión de artículos científicos en bases de datos de Scopus, ScienceDirect, Web of Science (WOS), Scielo, Redalyc y Google académico Se consideró los artículos publicados entre el 2016 y 2022, en idioma español, inglés y portugués.
III	Revisión y selección de estudios	Se obtuvo un total de 53 artículos, entre los cuales comprenden publicaciones nacionales e internacionales Los documentos tomados para esta revisión están clasificados como artículos de revistas indexadas, los cuales fueron importados a la plataforma Mendeley Desktop, para luego ser leídos, y subrayados los párrafos más importantes aplicando la técnica de paráfrasis para un mejor entendimiento

Fuente: Adaptado de Castiblanco Montañez et al. (2022) y Angraini et al. (2019)

3. Resultados y discusión

Los resultados del presente estudio se disponen en el orden siguiente: panorama actual de la acuicultura en el Perú y los factores que limitan su desarrollo, beneficios del uso de las herramientas tecnológicas en la acuicultura, es decir, en la alimentación de los peces, control de los parámetros físico-químicas del agua, y en el conteo y clasificación de peces.

Panorama actual de la acuicultura en el Perú y factores que limitan su desarrollo

El emprendimiento acuícola no ha sido ajeno en el Perú, en los últimos años se ha logrado un crecimiento significativo, a pesar que esta actividad se desarrolla en pocas especies y en pocas regiones (Berger, 2020). Existen grandes expectativas para que el crecimiento de esta actividad se convierta en un desarrollo diversificado, sostenido y competitivo (Canales-Gómez et al., 2022), dado que el país posee una de las biodiversidades más grandes del mundo (Ornelas-Luna et al., 2017).

A pesar de su crecimiento, la acuicultura en el Perú refleja la ausencia de programas para la búsqueda e implantación de nuevos avances y mejoras encaminadas a la modernización y adopción de nuevas tecnologías (León-Mendoza, 2019). En ese sentido, el Programa Nacional de Innovación en Pesca y Acuicultura (PNIPA), describe los principales factores que limitan su desarrollo (tabla 2).

Tabla 2. Principales factores que limitan el desarrollo acuícola en el Perú

FACTORES	CONSECUENCIA
<ul style="list-style-type: none"> • Incumplimiento de normas sanitarias vigentes en la infraestructura para la manipulación y comercialización de los productos hidrobiológicos • Deficiente condiciones higiénico-sanitarias • Embarcaciones no inscritas o indebidamente inscritas en registros públicos • Ausencia de controles de acreditación para pescadores artesanales 	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento de la pesca y comercialización ilegal • Productos no certificados para consumo humano

Fuente: Adaptado de Ramírez-Gastón et al. (2018)

Zafra-Trelles et al. (2017) sostienen que para lograr una acuicultura competitiva y sostenible se requiere del impulso del gobierno y que los productores asuman el reto de tecnificar sus procesos. Según el Ministerio de la Producción (PRODUCE), diversas Instituciones Nacionales desarrollan programas dirigidos a mejorar y dar valor a la acuicultura (Arqueros et al., 2017), en este contexto es importante la adopción de tecnologías y la generación de innovaciones, el desarrollo de capacidades técnicas, el mejoramiento de regulación sanitaria y la automatización de los procesos que intervienen en la acuicultura peruana (Perrotini Hernández y Vázquez-Muñoz, 2018).

Beneficios del uso de herramientas tecnológicas en la producción acuícola

ALIMENTADORES AUTOMÁTICOS

Uno de los procesos fundamentales en la acuicultura es la alimentación, siendo vital para lograr el engorde y la salud óptima del pez (Bonilla-Castillo et al., 2018; Contreras et al., 2018). La deficiente alimentación causa enfermedades y cuyo efecto repercutirá en la rentabilidad de la producción (Constanza et al., 2020; Oliveira et al., 2016; Victoriano et al., 2017).

En España, las empresas acuícolas adoptan estrategias proactivas, basándose en políticas de investigación y desarrollo I+D (Amaro-Rosales y De Gortari-Rabiela, 2016). Ejemplo de

ello, la implementación de comedores automáticos que permiten al acuicultor reducir costes de producción y un manejo eficiente del alimento balanceado (Flores y Aracena, 2018).

El continente americano no es indiferente a la tecnificación, por ejemplo, en México se desarrolló un dispositivo electrónico AQ1 (alimentador automático), el cual consiste que a través de la emisión de sonidos del camarón, el dispositivo activa los dispositivos, logrando disminuir el consumo indiscriminado de materias primas (García et al., 2019 ;Larios, 2017;Beltran Meza, 2017; Pinto et al., 2020).

En el Perú la actividad pesquera predominante es la artesanal, el problema que afronta la acuicultura peruana está relacionada con la alimentación, dado a que representa el mayor costo operativo (Martínez-Yáñez et al., 2018). Bajo este contexto, se busca la disminución de costos de producción y generar un impacto significativo en la rentabilidad (Carpio y Tito, 2017; Perevochtchikova et al., 2019).

Existen pocas empresas en el Perú que desarrollan proyectos tecnológicos, por lo que es necesario identificar estrategias eficientes para el desarrollo de esta actividad (Berger, 2020).

Monitoreo y control de parámetros físico-químicos del agua

Los dispositivos más utilizados en la acuicultura son los sensores, indispensables para medir las variables fisicoquímicas de los estanques de crianza de los peces (Rojas-Molina et al., 2017). Es de gran importancia llevar un adecuado control y monitoreo de la temperatura, el oxígeno disuelto, el PH, entre otros, debido a que son factores indispensables para monitorear la salud del pez (Valera y Valverde, 2018).

Conocer en tiempo real los parámetros de la calidad del agua es fundamental, ya que los operadores de las granjas acuícolas requieren de información confiable y oportuna de las variables físico-químicas para planificar y ajustar los controles necesarios (Dussán et al., 2016).

La tecnología actualmente es costosa y dependiente de muchas plataformas, por lo que se requiere desarrollar prototipos eficientes, simples de implementar y de bajo costo (Alvarado-Medellin et al., 2019).

Una alternativa para resolver este problema es el IoT (Internet de las cosas), cada vez más común en todos los ámbitos, gracias a la penetración de Internet y las plataformas WiFi que facilitan y abaratan la implementación con soluciones informáticas (González et al., 2012).

En Venezuela, investigaciones realizadas por Oviedo-Lopera et al. (2020) y Contreras et al. (2018), han logrado desarrollar un sistema de monitoreo remoto de calidad del agua basado en IoT (Internet de las cosas) a bajo costo, usando *hardware* y *software* abierto, el sistema está diseñado a partir de un kit embebido NodeMCU usado de modo *sleep* para ahorrar energía, el cual es capaz de tomar lecturas de variables meteorológicas, como luz solar, humedad relativa y temperatura del aire, así como también, variables físico químicas del agua, tales como: pH, oxígeno disuelto, temperatura y nivel de agua. Con lo cual se logró resolver la inexactitud de mediciones realizados de forma manual.

En Colombia, Dussán et al. (2016) y Reyes (2018) implementaron un prototipo electrónico para monitorear los parámetros físico químicos del agua, logrando disminuir los índices de mortalidad de tilapia, debido a cambios bruscos de temperatura y oxígeno disuelto en el agua. El prototipo está elaborado con un sistema de adecuación de señales para sensores, las cuales llegan a un microprocesador ATMEGA 328P, que realiza el proceso de adquisición y conversión de datos análogos a digitales. Los datos son enviados a una interfaz gráfica soportada en un móvil, a través de un módulo Bluetooth HC-05, en donde el usuario puede visualizar el comportamiento de

las variables de cultivo. El sistema es alimentado por paneles solares, el cual destaca por aprovechar las energías renovables, para evitar la contaminación por uso de energías convencionales.

El Gobierno peruano a través de sus programas de pesca e innovación acuícola promueven y apoyan al desarrollo del sector, orientándolo hacia la diversificación y al desarrollo de cadenas de valor inclusivas y la seguridad alimentaria (Amaro-Rosales y De Gortari-Rabiela, 2016). Sin embargo, a pesar del esfuerzo, no todas las regiones son beneficiadas con estos programas, ya que en gran parte del país no se logran tecnificar sus procesos, entre ellos, el monitoreo y control de parámetros físico-químicos del agua, generando la muerte de los alevines (Rojas-Molina et al., 2017).

En virtud de lo anterior, es recomendable trabajar con herramientas tecnológicas que faciliten el monitoreo y control del proceso, esto con el fin de ayudar al productor a explotar todos los recursos favorables que posee el Perú, como sus recursos hídricos y climas tropicales. Se debe tomar como referencia a Colombia, dado a sus realidades similares, ya que ha logrado tecnificar sus procesos con la ayuda de herramientas tecnológicas.

Tomando en cuenta el modelo colombiano, la acuicultura en el Perú debe seguir un proceso ordenado y las tecnologías que se adapten deben ser eco amigables con el medio ambiente (Escárcega, 2020).

Algoritmos de conteo y clasificación

Dentro de la actividad acuícola es indispensable conocer la densidad poblacional de la producción, para garantizar el crecimiento, engorde y cumplimiento de estándares de calidad y comercialización de peces (Zafra et al., 2019; Zárate et al., 2018).

La comercialización de alevines es realizada manualmente, en esta etapa se evidencia la gran importancia que tiene el conteo de peces (Bedoya Pérez y Sánchez Jaramillo, 2010).

Existen diferentes técnicas de conteo: conteo de forma manual, en el cual con la ayuda de un elemento de medida con volumen conocido, se logra sacar una relación volumen-cantidad (Bernal-Buitrago et al., 2019). Este método presenta una desventaja para la producción, puesto que disminuye la precisión al momento de determinar la cantidad exacta de alevines, debido a que no todos los alevines son homogéneos, además ocasiona lesiones y enfermedades, puesto que existe una manipulación directa durante el procedimiento (Cuéllar Lugo et al., 2018).

Otro sistema de conteo es utilizando sensores infrarrojos, el cual permite contabilizar los alevines que cruzan a través de un conducto. Este método presenta un error común, debido que no puede contabilizar los alevines que pasan sobrepuestos (Luo et al., 2016).

En Colombia, Crespo-Guerrero (2016) implementó un sistema automático de conteo de alevines de tilapia roja usando técnicas de visión artificial, se realizó la obtención de imágenes por medio de una cámara web de alta definición, y finalmente se determina y visualiza la cantidad de alevines por medio de una interfaz gráfica. El sistema fue desarrollado para brindar una alternativa práctica y eficiente a los métodos manuales usados tradicionalmente.

En Brasil, França et al. (2019) utilizaron técnicas de visión por computadora, esta técnica puede significar fácil para los seres humanos, pero es considerablemente difícil para una computadora. El enfoque propuesto desarrolló una tubería de procesamiento basada en la identificación de peces utilizando el seguimiento de manchas y la mezcla de gaussianos y luego se realizó el seguimiento utilizando el filtro Kalman para desambiguar las superposiciones de peces.

En el Perú, especialmente en áreas rurales, el método para contar alevines es el manual, este proceso esta propenso a errores, omisión ocasional de peces y fatiga del personal (Calle

et al., 2020). La estimación inexacta afecta tanto a la planta de incubación como al cliente, la cual da lugar a una alimentación inexacta del pez o un pago excesivo del cliente (Abdo-de la Parra et al., 2019).

Por lo expuesto anteriormente se recomienda la implementación de técnicas de visión artificial que permitan un conteo rápido y robusto con menos propensión a errores, la escasa tecnificación del proceso se debe al desinterés del productor y a la baja capacitación que este tiene con respecto a herramientas que le faciliten tecnificar sus procesos.

Para facilitar la tecnificación del proceso se recomienda replicar las técnicas de conteo que se utilizan en Colombia, el cual es un referente, las técnicas deben ser eficientes y adaptarse a las necesidades de los piscicultores, de esa manera lograr su consolidación y mejora.

5. Conclusiones y recomendaciones

Realizar la presente revisión permitió afirmar que, la acuicultura en el Perú es desarrollada en pocas regiones y con escasas especies. El principal problema se atribuye a la ausencia de programas que busquen la implantación de nuevos avances y mejoras encaminadas a la modernización y adopción de nuevas tecnologías. Según PNIPA, los factores que limitan su desarrollo están relacionados al incumplimiento de normas sanitarias vigentes en la infraestructura para la manipulación y comercialización de los productos hidrobiológicos, deficientes condiciones higiénico-sanitarias, embarcaciones no inscritas o indebidamente inscritas en Registros Públicos y la ausencia de controles de acreditación para pescadores artesanales.

Países que aplicaron tecnología en sus procesos acuícolas lograron optimizarlos, aumentando el nivel de su productividad y rentabilidad, posicionándose como referentes en el sector.

La tecnificación en el proceso de alimentación acuícola ha permitido reducir costos operativos en cuanto al suministro de esta, puesto que la variación afecta sustancialmente el costo de producción, en tal sentido deben suministrarse manteniendo una técnica automatizada dentro de valores recomendados, garantizando la eficiencia del proceso. Los sistemas inteligentes son vitales para la obtención de parámetros físico químicos del agua, ejemplo de ello, los sensores permiten visualizar la variación de los parámetros en tiempo real, logrando eficazmente el monitoreo y control, reduciendo el índice de mortalidad en los peces. En el proceso de conteo y clasificación se ha logrado identificar la importancia del uso de técnicas automatizadas, ya que facilitan al productor en la comercialización. No obstante, la técnica manual aplicada en el proceso genere estrés desencadenando y perjuicio económico.

Finalmente, se concluye que, para lograr la tecnificación del proceso, se debe realizar un trabajo articulado entre productores, gobierno y entidades acuícolas permitiendo implantar políticas y estrategias que garanticen mayor rentabilidad y sostenibilidad en el tiempo.

Bibliografía

- Abdo-de la Parra, M. I., Rodríguez-Montes de Oca, G. A., Rodríguez-Ibarra, L. E., Román-Reyes, J. C. y Velasco-Blanco, G. (2019). Efecto de la temperatura sobre la tasa de consumo del vitelo y gota de aceite en las larvas del pargo flamenco *Lutjanus guttatus* (Perciformes: Lutjanidae). *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 54(1), 28-34. <https://doi.org/10.22370/rbmo.2019.54.1.1463>
- Alvarado-Medellin, P., Aguilar-Escarcia, S. P., Ramírez-Aguilera, A. M. y Ortiz-Gómez, R. (2019). Sistema dinámico para el monitoreo y control de redes inalámbricas de sensores que operan bajo el

- protocolo de comunicación ZigBee. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 20(1), 0-0. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n1.003>
- Amaro-Rosales, M., y De Gortari-Rabiela, R. (2016). Políticas de transferencia tecnológica e innovación en el sector agrícola mexicano. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*, 13(3), 449. <https://doi.org/10.22231/asyd.v13i3.406>
- Angraini, Alias, R. A. y Okfalisa. (2019). Information security policy compliance: Systematic literature review. *Procedia Computer Science*, 161, 1216-1224. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.11.235>
- Arqueros, M., Sánchez-Tuesta, L. y Prieto, Z. (2017). Diferenciación genética de tilapia roja y gris (*Oreochromis niloticus*) mediante microsatélites y marcadores SCAR como indicadores del sexo genético. *Revista Peruana de Biología*, 24(3), 255-262. <https://doi.org/10.15381/rpb.v24i3.13900>
- Bedoya Pérez, J., y Sánchez Jaramillo, C. (2010). Efectos hidrodinámicos sobre la producción de azadiractina en un biorreactor de tanque agitado. *Revista Politécnica*, 6(10), 109-121. <https://biblat.unam.mx/hevila/Revistapolitecnica/2010/no10/12.pdf>
- Beltrán Meza, M. (2017). Innovación en el sector acuícola. *Ra Ximhai*, 13(3), 351-364. <https://doi.org/10.35197/rx.13.03.2017.20.mb>
- Berger, C. (2020). La acuicultura y sus oportunidades para lograr el desarrollo sostenible en el Perú. *South Sustainability*, 1, 1-11. <https://doi.org/10.21142/ss-0101-2020-003>
- Bernal-Buitrago, G. F., Valderrama, J. A., Monroy-Suárez, D., Manrique-Perdomo, C., & Medina-Robles, V. M. (2019). Parámetros genéticos para características de crecimiento, canal, calidad y espinas intramusculares en cachama blanca (*Piaractus brachypomus*). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 22(1). <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1182>
- Bonilla-Castillo, C. A., Agudelo, E., Gómez, G. y Duponchelle, F. (2018). Population dynamics of *Prochilodus nigricans* (Characiformes: Prochilodontidae) in the Putumayo River. *Neotropical Ichthyology*, 16(2), 1-12. <https://doi.org/10.1590/1982-0224-20170139>
- Calle, C., Salas, R., Oliva, S., Barboza, E., Silva, J., Iliquín, D. y Rojas, N. (2020). Land suitability for sustainable aquaculture of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in molinopampa (Peru) based on RS, GIS, and AHP. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/ijgi9010028>
- Canales-Gómez, E., Díaz-Gómez, R., Cervantes-Ríos, J. y Téllez-López, J. (2022). Mapeo y amenazas de los servicios ecosistémicos culturales de la pesca artesanal para el desarrollo regional en una subcuenca antropizada del occidente de México. *Eure*, 48(143), 1-26. <https://doi.org/10.7764/eure.48.143.10>
- Cargnin, G., Adorian, T. J., Dalcin, M. O., Oliveira, F., Betine, A., Bender, B., Rodrigues, F. y Ferigollo, G. (2022). Tecnologia para valorização de subproduto de arroz com potencial de aplicabilidade na piscicultura. *Research, Society and Development*, 11(12), 1-9. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i12.34944>Tecnologia
- Carpio, E., y Tito, E. (2017). Escalas productivas y nivel de riesgo del productor de trucha, puno-Perú. *COMUNICACIÓN: Revista de Investigación en Comunicación y Desarrollo*, 8(2), 81-93. <http://www.scielo.org.pe/pdf/comunica/v8n2/a02v8n2.pdf>
- Castiblanco Montañez, R. A., Coronado Veloz, C. M., Morales Ballesteros, L. V., Polo González, T. V. y Savaedra Leyva, A. J. (2022). Hemorragia postparto: intervenciones y tratamiento del profesional de enfermería para prevenir shock hipovolémico. *Revista Cuidarte*, 13(1), e2075. <https://doi.org/10.15649/cuidarte.2075>
- Constanza, A., Sánchez, M., & Valenzuela, C. (2020). Insectos son realmente una alternativa para alimentación de animales y humanos. *Revista Chilena de Nutrición*, 47(6), 1029-1037. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182020000601029>
- Contreras, C., Molina, J. A., Osmá, P. y Zambrano, D. (2018). Construcción de un Sistema de Adquisición y Transmisión Remota de la Calidad del Agua Basado en el Internet de las Cosas (IoT) para la acuicultura. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology, 2018-July(November)*, 0-6. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.367>

- Crespo-Guerrero, J. M. (2016). Experiencias de investigación geográfica en el estudio de la pesca comercial ribereña en las áreas naturales protegidas de Baja California Sur (México). *Investigaciones Geográficas*, 90, 176-185. <https://doi.org/10.14350/rig.56674>
- Cuéllar Lugo, M. B., Asiain Hoyos, A., Juárez Sánchez, J. P., Reta Mendiola, J. L. y Gallardo López, F. (2018). Evolución normativa e institucional de la Acuicultura en México. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*, 15(4), 541-564. <https://doi.org/10.22231/asyd.v15i4.906>
- Del Carpio-Gallegos, J., y Miralles, F. (2019). Análisis cualitativo de los determinantes de la innovación en una economía emergente. *Retos*, 9(17), 161-175. <https://doi.org/10.17163/ret.n17.2019.10>
- Dussán, S., Vanegas, O., Chavarro, A. y Molina, J. (2016). Diseño e implementación de un prototipo electrónico para monitoreo de parámetros físico-químicos en cultivo de tilapia a través de una aplicación móvil. *Informador Técnico*, 80(1), 49. <https://doi.org/10.23850/22565035.322>
- Escárcega, S. (2020). ¿Cultivo de peces marinos? Hablemos de larvicultura en estanques. *Revista Digital Universitaria*, 21(2). <https://doi.org/10.22201/codeic.16076079e.2020.v21n2.a3>
- Flores, S., y Aracena, D. (2018). Sistema de monitoreo remoto de acuicultura en estanques para la crianza de camarones. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 26, 55-64. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052018000500055>
- França, P. L., Garcia, V., Da Silva, A., Lewandowski, T., Detweiler, C., Gonçalves, A. B., Costa, C. S., Naka, M. H., y Pistori, H. (2019). Automatic live fingerlings counting using computer vision. *Computers and Electronics in Agriculture*, 167, 105015. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105015>
- Fukushima, M., Alva, R., Castillo, G., Calderón, C., Shimokawa, L. y Fukushima, J. (2016). Adaptación de nuevas tecnologías para implementación del módulo demostrativo en el cultivo de tilapia en la libertad. *Scientia Agropecuaria*, 7(3), 321-331. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2016.03.21>
- García, L., Miranda, A., Coelho, M. G., Huerta, J. A. y Osuna, P. (2019). Biofloc technology (BFT) applied to tilapia fingerlings production using different carbon sources: Emphasis on commercial applications. *Aquaculture*, 502, 26-31. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.11.057>
- Gómez, G., Navarro Barranzuela, J. A. y Marchena Ojeda, L. M. (2022). Crowdfunding as a financing alternative for MSMEs in Peru. *Revista de Ciencias de La Administración y Economía*, 12(23), 161-177. <https://doi.org/10.17163/ret.n23.2022.10>
- González, J., Nuñez, B. y Viloria, P. (2012). Sistema de monitoreo en tiempo real para la medición de temperatura. *Scientia et Technica*, 50(50), 5. <https://www.redalyc.org/pdf/849/84923878019.pdf>
- Larios, R. P. (2017). Inversión y rentabilidad de proyectos acuícolas en el Perú. *Ingeniería Industrial*, 35, 113-137. <http://www.redalyc.org/pdf/3374/337453922006.pdf>
- León-Mendoza, J. C. (2019). Emprendimiento empresarial y crecimiento económico en Perú. *Estudios Gerenciales*, 35(153), 429-439. <https://doi.org/10.18046/j.estger.2019.153.3331>
- Luo, S., Li, X., Wang, D., Li, J. y Sun, C. (2016). Automatic Fish Recognition and Counting in Video Footage of Fishery Operations. *Proceedings - 2015 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks, CICN 2015*, 296-299. <https://doi.org/10.1109/CICN.2015.66>
- Martínez-Yáñez, A., Albertos-Alpuche, P., Guzman-Mendoza, R., Robaina-Robaina, L., Alvarez-Gonzalez, A. Díaz-Plascencia, D. (2018). Production and chemical composition of hydrophytes cultivated in aquaponics. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(14), 247. <https://doi.org/10.19136/era.a5n14.1447>
- Naspirán-Jojoa, D. C., Fajardo-Rosero, A. G., Ueno-Fukura, M., Collazos-Lasso, L. F., Naspirán-Jojoa, D. C., Fajardo-Rosero, A. G., Ueno-Fukura, M. y Collazos-Lasso, L. F. (2022). Perspectivas de una producción sostenible en acuicultura multitrofica integrada (IMTA): Una revisión. *Revista de La Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, 69(1), 75-97. <https://doi.org/10.15446/rfmvz.v69n1.101539>
- Nederlof, M. A. J., Verdegem, M. C. J., Smaal, A. C. y Jansen, H. M. (2021). Nutrient retention efficiencies in integrated multi-trophic aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 14(3), 1194-1212. <https://doi.org/10.1111/raq.12645>

- Oliveira, F. A., Argentim, D., Novelli, P. K., Agostinho, S. M. M., Agostinho, L. M. y Agostinho, C. A. (2016). Automatic feeders for Nile tilapia raised in cages: Productive performance at high feeding frequencies and different rates. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinaria e Zootecnia*, 68(3), 702-708. <https://doi.org/10.1590/1678-4162-7882>
- Ornelas-Luna, R., Aguilar-Palomino, B., Hernández-Díaz, A., Hinojosa-Larios, J. Á. y Godínez-Siordia, D. E. (2017). Un enfoque sustentable al cultivo de tilapia. *Acta Universitaria*, 27(5), 19-25. <https://doi.org/10.15174/au.2017.1231>
- Oviedo-Lopera, J. C., Oviedo-Carrascal, A. I., Carmona-Rodríguez, C. S., Velez-Saldarriaga, G. L. y Reina-Alzate, J. (2020). Diseño de un sistema acuapónico monitoreado mediante internet de las cosas e inteligencia artificial. *Espacios*, 41(47), 56-73. <https://doi.org/10.48082/espacios-a20v41n47p05>
- Perevochtchikova, M., Hernández Flores, J. A. y Ávila-Foucat, V. S. (2019). Recursos naturales y diversificación productiva en cuatro localidades rurales del Estado de Oaxaca, México. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 15(81), 1-23. <https://doi.org/10.11144/javeriana.cdr15-81.rndp>
- Perretta, A., Antúnez, K. y Zunino, P. (2019). Resistencia a los antimicrobianos en bacterias aeromonadales móviles aisladas de peces cultivados en Uruguay. *Veterinaria (Montevideo)*, 55(211). <https://doi.org/10.29155/vet.55.211.1>
- Perrotini Hernández, I., y Vázquez-Muñoz, J. A. (2018). El supermultiplicador, la acumulación de capital, las exportaciones y el crecimiento económico. *El Trimestre Económico*, 85(338), 411. <https://doi.org/10.20430/ete.v85i338.542>
- Pinto, P. H. O., Rocha, J. L., do Vale Figueiredo, J. P., Carneiro, R. F. S., Damian, C., de Oliveira, L. y Seiffert, W. Q. (2020). Culture of marine shrimp (*Litopenaeus vannamei*) in biofloc technology system using artificially salinized freshwater: Zootechnical performance, economics and nutritional quality. *Aquaculture*, 520, 734960. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.734960>
- Ramírez-Gastón, J., Sandoval Méndez, N. y Vicente Cárdenas, K. (2018). Sistema Nacional de Innovación en Pesca y Acuicultura, fundamentos y propuestas 2017-2022. En *Programa Nacional de Innovación en Pesca y Acuicultura*. <https://www.pnipa.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/PESCA-Y-ACUICULTURA-3-1.pdf>
- Reyes, L. (2018). Suitable densities for polyculture systems of commercial species of *Oreochromis* spp. and *Cyprinus carpio* in crafted confinement systems in artificial lakes in Santiago de Cali (valle del Cauca, Colombia). *Idesia*, 36(1), 73-82. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292018000100073>
- Reyna, P. C., Romero, E. y Lorenzo, J. A. (2019). Comportamiento espacial de la pesca artesanal en el litoral de Veracruz, México. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 54(2), 180. <https://doi.org/10.22370/rbmo.2019.54.2.1889>
- Rojas-Molina, L. Y., Tique-Pinto, V. H. y Bocanegra-García, J. J. (2017). Uso de herramientas tecnológicas en la producción piscícola: Una revisión sistemática de literatura. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 17(2), 56. <https://doi.org/10.19053/1900771x.v17.n2.2017.7183>
- Sarmiento, J., Niembro, A. y Civitaresi, M. (2019). La producción piscícola en Patagonia Norte: Un primer análisis a partir del enfoque de cadenas de valor. *Pilquen*, 22, 13-25. <http://www.scielo.org.ar/pdf/spilquen/v22n1/v22n1a02.pdf>
- Silva de Abreu, J., Madeira Di Beneditto, A. P., Silva Martins, A. y Antunes Zappes, C. (2020). Artisanal fishing in the municipality of Guarapari, state of Espírito Santo, Brazil: An approach to the perception of fishermen working in small-scale fishing. *Sociedade & Natureza*, 32, 56-71. <https://doi.org/10.14393/sn-v32-2020-46923>
- Tovar, J. P., Solórzano, J. D. los S., Badillo, A. y Rodríguez, G. O. (2019). Internet de las cosas aplicado a la agricultura: estado actual. *Lámpakos*, 22, 86-105. <https://doi.org/10.21501/21454086.3253>
- Valera, A., y Valverde, J. (2018). Determination of the cause of mortality in a giant freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* nursery in Costa Rica: Case analysis. *Revista de Investigaciones Veterinarias Del Peru*, 29(2), 666-675. <https://doi.org/10.15381/rivep.v20i2.14522>

- Victoriano, R., Silva, A., Vega, A., Araya, M. y Cornejo, L. (2017). Efecto del Aumento de la Temperatura, Frecuencia de Alimentación y Ración de Alimento en el Crecimiento de Juveniles de Turbot *Psetta maxima*. *International Journal of Morphology*, 30(3), 902-907. <https://doi.org/10.4067/S0717-95022012000300023>
- Zafra-Trelles, A., Díaz, M., Dávila, F., Bopp, G., Vela, K., Belén, L., Castillo, J. y Colchado, J. (2017). Cultivo de microalgas marinas potenciales para la acuicultura del litoral entre Puerto Salaverry y Puerto Chicama, La Libertad, Perú. *Arnaldoa*, 24(2), 567-582. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.242.24209>
- Zafra, A., Zafra, A., Dias, M., Dávila, F., Fernández, R., Vela, K. y Guzmán, H. (2019). Conversión y eficiencia alimenticia de *Oreochromis aureus* var. *suprema* (Cichlidae) con diferente alimento balanceado en sistema cerrado, Trujillo, La Libertad, Perú. *Arnaldoa*, 26(2), 815-826. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.262.26219>
- Zárate, I., Sánchez, C., Palomino, H. y Smith, C. (2018). Caracterización de la crianza de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) en la provincia de Chincheros, Apurímac, Perú. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 29(4), 1310. <https://doi.org/10.15381/rivep.v29i4.15196>

Modelación hidrológica de la cuenca urbana del río Bélico en la ciudad de Santa Clara, Cuba

(Hydrological modeling of the urban basin of the Bélico river in the city of Santa Clara, Cuba)

Carlos Lázaro Castillo García¹, Víctor Manuel Carvajal González²

Resumen

Las inundaciones urbanas son un fenómeno asociado a grandes precipitaciones, relativamente, en cortos períodos de tiempo, las causas que las provocan son disímiles y generalmente vienen acompañadas por una deficiente planificación urbana. La ciudad de Santa Clara, Cuba presenta graves problemas de inundaciones cercanas a los ríos Bélico y Cubanicay debido a la disminución de la sección de sus cauces por indisciplinas urbanísticas. La presente contribución obtiene los valores del caudal máximo de escurrimiento para varias secciones de control ubicadas a lo largo de dichos ríos, usando para ello el modelo TR-55 (Technical Report 55) del Servicio de Conservación de los Recursos Naturales de Estados Unidos. Se realizan tres modelaciones asociadas a lluvias convectivas Tipo I, II, III agrupadas a los picos de las tormentas y su ubicación temporal, con lo cual se pueden definir los gastos máximos relacionados a tormentas de configuración diferentes para una probabilidad del 1 %, 2 % y 10 %. Los resultados obtenidos demuestran que la situación más crítica ocurre para la lluvia Tipo III y el valor máximo de escurrimiento para una probabilidad del 1 % en el punto de cierre de la cuenca es de 170 m³/s.

Palabras clave

Escorrentía, lluvia, inundaciones urbanas, modelación hidrológica, número de curva.

Abstract

Urban floods are a phenomenon associated with heavy rainfall in relatively short periods of time, the causes that cause them are dissimilar and are generally accompanied by poor urban planning that reduces hydraulic sections of rivers, streams, and any drainage channel. The city of Santa Clara in Cuba presents serious flooding problems near the Bélico and Cubanicay rivers due to the decrease in the section of their channels due to urban indiscipline. This contribution obtains the values of the maximum runoff flow for various control sections located along these rivers, using the TR-55 model (Technical Report 55) of the United States Natural Resources Conservation Service (NRCS), for its acronym in English, formerly named Soil Conservation Service). Three models associated with convective rains Type I, II, III associated with the peaks of the storms and their temporal location will be carried out, with which the maximum expenses associated with storms of different configuration can be defined for a probability of 1 %, 2 % and 10 %. The results obtained show that the most critical situation occurs for Type III rain and the maximum runoff value for a 1 % probability at the basin closure point is 170 m³/s.

Keywords

Rainfall; runoff; hydrological modeling; urban flooding; curve number.

1. Introducción

El constante aumento de la población y la acelerada urbanización de las ciudades incrementa el riesgo de inundaciones, que pueden ocasionar la pérdida de vidas humanas y daños a la propiedad (Hettiarachchi et al., 2019). Los problemas de planificación espacial se vuelven muy importantes para la proyección de los recursos hídricos, y los cálculos para obtener un equilibrio hi-

1 Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara, Cuba [ccgarcia@uclv.cu, <https://orcid.org/0000-0002-6430-2775>].
2 Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara, Cuba [vicarvajal@uclv.cu, <https://orcid.org/0000-0001-7533-5858>].

drológico urbano preciso aparecen como una de las disyuntivas más complejas de resolver para los ingenieros que se dedican al estudio de la hidrología urbana (Stella y Anagnostou, 2018).

Nardi et al. (2018), cita trabajos de Hollis (1975) y Leopold (1968) en los que explican que el impacto de la urbanización en la hidrología asociada a eventos máximos contiene una estrecha relación con el área impermeable y el intervalo de recurrencia de los mismos, demostrando además que el cambio de muchos parámetros hidrológicos está relacionado con el grado de urbanización de la cuenca. Las características de un hidrograma en este tipo de suelo suelen tener rasgos muy comunes como, una rama ascendente más empinada, cortos tiempos de concentración y base, aumento tanto del pico del gasto como del volumen de escorrentía, todos estos comparados con hidrogramas similares en cuencas rurales (Miller et al., 2021).

Según Boyd et al. (1993), citado en Schoener (2018), las superficies impermeables pueden ser divididas en dos categorías, las áreas impermeables directamente conectadas (DCIA, por sus siglas en inglés) que comprenden todas las superficies con una conexión directa al sistema de drenaje; y las áreas impermeables que drenan sobre superficies permeables, como por ejemplo, techos que drenan hacia patios o parcelas paisajísticas con alto grado de infiltración, son consideradas áreas impermeables desconectadas (UIA, por sus siglas en inglés). Esta clasificación es muy importante durante eventos lluviosos cortos puesto que muchas UIA pueden propagarse por superficies permeables e infiltrarse antes de llegar al sistema de drenaje. El propio Schoener (2018), citando a Lee y Heaney (2003) afirma que el 70 % del escurrimiento provocado por varios eventos lluviosos estudiados en el área residencial de Miami, provenían de DCIA.

La respuesta hidrológica de una cuenca es generalmente estimada usando un modelo hidrológico con un dato de entrada que por lo general es la lluvia. Según Wheeler et al. (2007), citado en Joshi et al. (2019), un modelo es una representación simplificada del mundo real. Los modelos hidrológicos (usualmente conocidos como modelos de lluvia-escorrentía) tienen una amplia gama de aplicabilidad que van desde el planeamiento y desarrollo de estructuras hidráulicas, defensas ante inundaciones, evaluación de la disponibilidad del agua, pronósticos climáticos y de cambio de usos del suelo y su impacto en la hidrología, estimación de flujo en cuencas no aforadas, entre otros (Deb y Kiem, 2020).

Usualmente la comunidad investigadora distingue tres tipos de modelos hidrológicos, conceptuales, físicos-basados y caja negra (Hu et al., 2018). Los modelos conceptuales, son aquellos que representan un sistema hecho por una composición de conceptos, que permiten estudiar, conocer, entender o simular un objeto que el mismo representa (Hu et al., 2018) (Fraga et al., 2019). Los modelos basados en las propiedades físicas de la cuenca son una pequeña o gran copia de las características físicas del objeto para el estudio de los procesos hidrológicos que ocurren dentro (Deb et al., 2019). Los modelos de caja negra son útiles cuando se conocen datos de entrada y algunos datos de salida que permitan calibrar el proceso sin adentrarse internamente en las complejidades del proceso hidrológico que ocurre internamente (Hu et al., 2018).

El método de Número de Curva del NRCS (NC-SCS) es ampliamente utilizado en aplicaciones de ingeniería de drenaje urbano desde 1975 (K. N, 2021) (Ross et al., 2018), desde que se expandió el método original a la aparición del TR-55 (Ormsbee et al., 2020). Según Mishra et al. (2018) la amplia aplicabilidad de los modelos asociados a la metodología NC-SCS puede ser atribuida a su sencillez, fácil uso, mayor producción de escorrentía en correspondencia con los usos del suelo y aceptación generalizada (Valle Junior et al., 2019).

Otro de los problemas comunes en la elaboración de un modelo de lluvia-escorrentía es el análisis del tiempo de concentración. Beven (2020) realiza un análisis de varias definiciones

aportadas por autores como Richards (1944), Chow (1964), Haan et al. (1994), Maidment (1993), Viessman y Lewis (1995), Musy y Higy (2004) donde se presenta que esta variable es el tiempo que demora la escorrentía superficial de una cuenca en atravesarla, desde su punto más alejado hasta su punto de cierre. Sin embargo, autores como Castillo et al. (2021) proponen con base en la Norma cubana 1239-2018 que se considere que el tiempo de concentración puede definirse a partir de la observación de la escorrentía superficial. Si se aplica una lluvia uniforme a una cuenca, las zonas más cercanas a la salida contribuyen a la escorrentía casi de inmediato. Mientras la lluvia continúa, los aportes de las zonas de aguas arriba llegan posteriormente, hasta que el flujo de todos los puntos de la cuenca se concentra en la zona baja. Por lo tanto, el tiempo de concentración se corresponde con la duración necesaria, con lluvia uniforme, para que el total de la cuenca contribuya a la escorrentía directa en el tramo final del cauce.

El estudio realizado por Castillo et al. (2021) considera fórmulas empíricas para la obtención del valor del tiempo de concentración en la Cuenca del río Bélico, sin embargo, un análisis más profundo evidencia de que las condiciones de la cuenca de estudio permite usar herramientas matemáticas más complejas para mejorar ese resultado son los casos de la utilización de las Ecuaciones de Saint Venant en 1D ya usadas por Roohi et al. (2020) en la estimación de las áreas de inundación del río Mehrian y Kader et al. (2020) en el análisis de inundaciones mediante una topografía controlada por ecuaciones.

A partir de los estudios e investigaciones realizadas en las últimas décadas y debido a la compleja situación de inundaciones que provoca la escorrentía, resultado de las intensas lluvias, de los ríos Bélico y Cubanicy en la ciudad de Santa Clara, Cuba este trabajo tiene como objetivos la obtención de los valores de caudal máximo de escurrimiento en varios puntos del cauce urbano de dichos ríos y comparar los resultados obtenidos con las aproximaciones empíricas iniciales obtenidas en Castillo et al. (2021). El estudio se elaborará con dos modelos de escorrentía, el Racional Modificado, que está normado en Cuba para cuencas pequeñas lo cual permitirá calibrar otro modelo, con la metodología del TR-55, para obtener los valores finales en una simulación con hietogramas para distintas probabilidades.

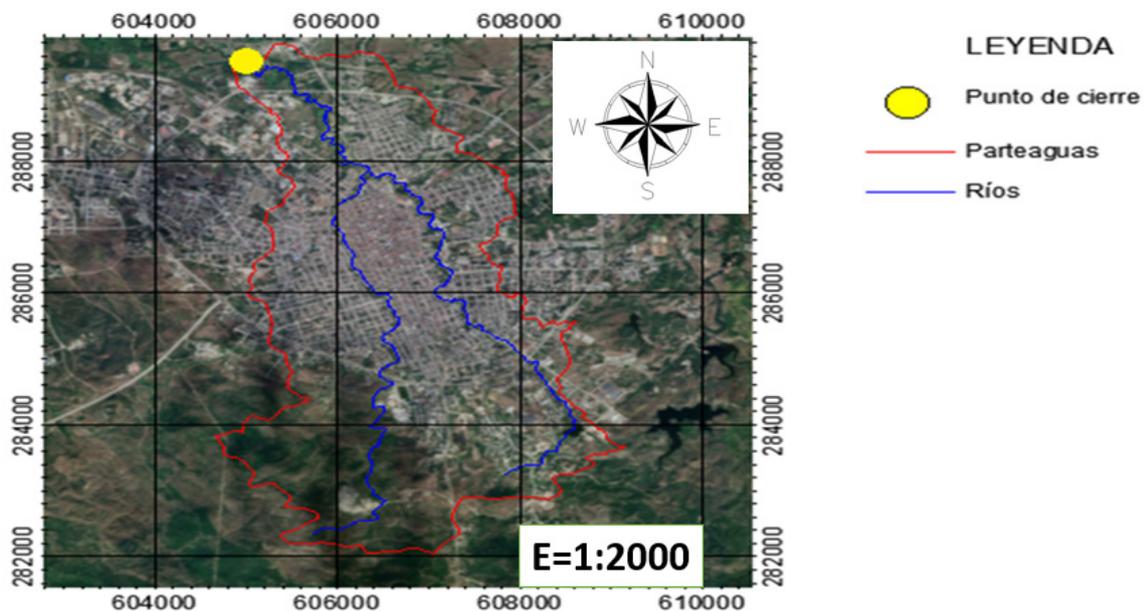
2. Materiales y métodos

La cuenca urbana del río Bélico es predominantemente llana, típica de la zona hidrológica central de Cuba y ha sido seleccionada como cuenca experimental dada su cercanía a la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, su ubicación en la ciudad de Santa Clara y a la situación actual del drenaje deficiente debido a las incorrectas políticas urbanísticas de la ciudad que han provocado la disminución de los cauces de los afluentes y ríos principales. El punto de cierre de la cuenca se define en la Circunvalación Norte, hasta este lugar la cuenca posee dos ríos o afluentes principales, el Bélico y el Cubanicy que nacen en las cercanías de la Circunvalación Sur y atraviesan el centro urbano de sur a norte como se observa en la figura 1.

Algunas de las características fundamentales de la cuenca con punto de cierre en Este: 604990 y N: 289575 de acuerdo al sistema de proyección NAD 27 Cuba Norte, del Sistema de Coordenadas Cónicas de Lambert, se presentan en la tabla 1.

A partir de la relevancia del factor Área de Aporte en la fórmula Racional; combinando la definición de microcuenca, de la cual es necesario tomar los parámetros fundamentales para la obtención de la lluvia de proyecto; además de la intervención del hombre con infraestructuras que cambian el curso del drenaje natural; surge el concepto de Área Hidrológica Urbana (AHU).

Figura 1. Cuenca de los ríos Bélico y Cubanicay de la ciudad de Santa Clara, Cuba



Fuente: Elaboración propia

Tabla 1. Características generales de la cuenca

Característica	Unidad de Medida	Valor
Macrocuenca o Cuenca Principal	S/U	Cuenca Sagua La Grande
Cuenca	S/U	Río Bélico
Subcuenca	S/U	Río Bélico
Área de Drenaje Total	km ²	19,55
Longitud Total del Río	km	11,37
Cota máxima de la vaguada	m	205,1
Cota del punto de cierre	m	99,50
Pendiente del cauce principal	m/km	6,250
Tiempo de Concentración	min	120,0

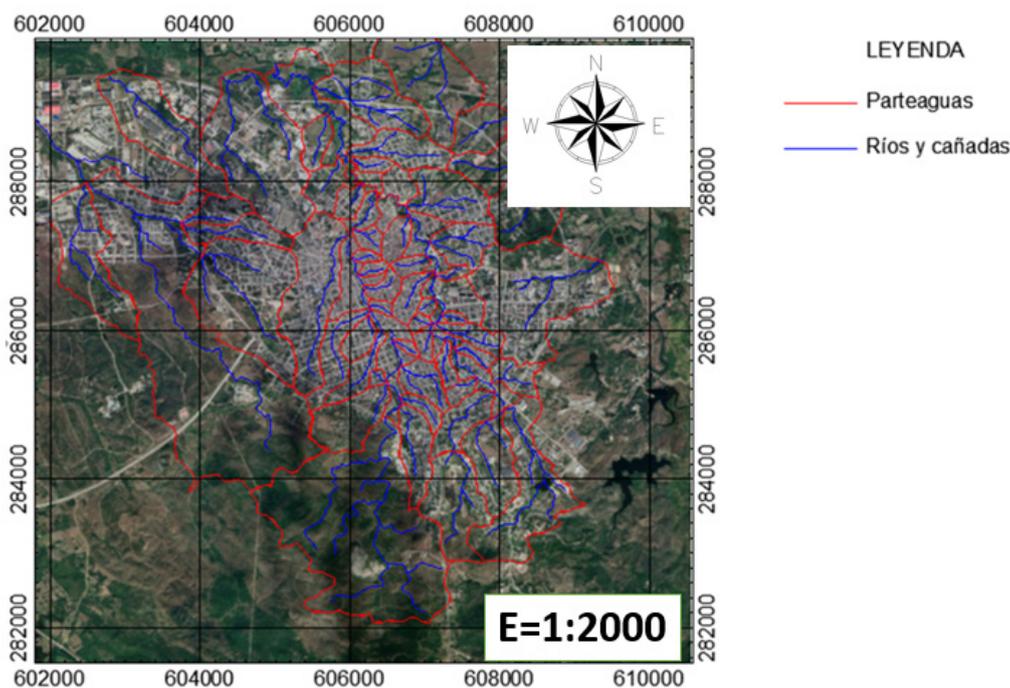
Fuente: Elaboración Propia.

Un Área Hidrológica Urbana es la adaptación del concepto de microcuenca en ambientes urbanos, se define como aquella área tributante a una vaguada principal cuyo vertimiento ocurre en el sistema fluvial primario de la cuenca o la subcuenca a la que pertenece. Se consideran AHU también a aquellas laderas de los sistemas fluviales sin presencia de vaguadas, ambas tipologías con una superficie superior a las 5 ha. La construcción del AHU tiene como premisas fundamentales que sus límites no dependen de los Consejos Populares ni de zonas específicas, su trazado se realiza a partir de la vaguada principal objeto de estudio y las obras lineales como

carreteras, autopistas y redes ferroviarias con presencia de drenajes, pueden ser consideradas límites de sectores dentro de una propia AHU.

La figura 2 muestra la discretización de la cuenca urbana del río Bético en AHU cada una con características propias relacionadas a su topología.

Figura 2. Límites de las Áreas Hidrológicas Urbanas y vaguadas tributantes a los sistemas fluviales Bético y Cubanicay



Fuente: Elaboración propia

El método racional es el más común y es utilizado por ingenieros para la obtención de los gastos máximos de escurrimiento en una cuenca urbana (Chin David, 2019). Según Dhakal et al. (2014) citados en Hasan et al. (2019) el método racional modificado ha sido aplicado para obtener valores picos de escorrentía en más de 1400 en 80 cuencas distintas en Texas.

El principio básico del método racional consiste en que el flujo máximo de escurrimiento ocurre cuando la duración de la lluvia se iguala al tiempo de concentración de la cuenca, el cual denota el tiempo que demora el flujo en moverse desde el punto más alejado de la cuenca al punto de cierre (Wang y Wang, 2018). El método computa el gasto máximo de escurrimiento de la siguiente forma:

$$Q = 16.67CIA \quad \text{Ec.1}$$

Donde Q es el caudal máximo de escurrimiento expresado en m³/s, C es el coeficiente adimensional de escurrimiento, I es la intensidad máxima para el tiempo de concentración de la cuenca en mm/min y A es el área de aporte en km² al punto de cierre.

El coeficiente C (y también el Número de Curva) se obtiene a partir de:

$$C = \frac{\sum_{j=1}^k C_j A_j}{\sum_{j=1}^k A_j} \quad \text{Ec.2}$$

Mulvany (1853), citado en Campos et al. (2020) comprende el establecimiento de límites adecuados para su aplicabilidad, a pesar de haberse aplicado de forma empírica, obtiene resultados tolerablemente cercanos a la realidad en cuencas con características promedio, ni muy montañosa ni muy llana y con ciertos límites de extensión.

Otros investigadores, a través de los años han destinado esfuerzos para construir un marco conceptual más sólido a los principios iniciales del método y para extender su uso a aplicaciones que inicialmente no fueron estudiadas. Ponce (1989) citado en Campos (et al., 2020), por ejemplo, sugiere que el método racional es basado en los principios de concentración y difusión. En el caso de la concentración sin difusión, la precipitación uniforme sobre la cuenca con una duración igual al tiempo de concentración (tormenta de diseño) crea por lo general un triángulo isósceles o una forma trapezoidal (Método Racional Modificado) dependiendo este último del tiempo de duración de la tormenta.

Wang y Wang (2018) establecen las abstracciones iniciales del método:

1. El valor de la intensidad de la lluvia es constante en el tiempo de duración y se distribuye de manera idéntica sobre toda el área de la cuenca.
2. El área de aporte es uniforme en toda la cuenca.
3. El flujo en conductos es constante (para el gasto máximo), la velocidad está en entera disposición al tiempo de concentración.
4. La impermeabilidad de la cuenca es constante durante toda la tormenta de diseño.

Algunos componentes de sistemas de manejo de aguas pluviales requieren no solo el pico del caudal máximo, sino además el hidrógrafo de escorrentía. Entre estos componentes se encuentran las lagunas de retención o rompe-picos que reciben la escorrentía superficial de una zona urbana determinada (Chin David, 2019).

El modelo del Número de Curva del NRCS permite estimar el exceso de precipitación desde su desarrollo en los años 1950 (Karpthy Nicholas y Chin David, 2019). El modelo CN es basado en la siguiente ecuación:

$$Q_A = \begin{cases} 0 & \text{para } P \leq 0.2S \\ \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} & \text{para } P > 0.2S \end{cases} \quad \text{Ec.3}$$

Donde Q_A es la profundidad de la escorrentía; P es la profundidad de la lluvia; y S es Máxima Retención Potencial. La ecuación 3 asume que la abstracción inicial es $0.2S$, aunque esta consideración está actualmente en revisión (Karpthy Nicholas y Chin David, 2019). La máxima retención potencial S es un parámetro abstracto que depende del tipo de suelo y uso del suelo en la cuenca. El CN se relaciona con S de la siguiente forma:

$$CN = \frac{25400}{254+S} \quad \text{Ec.4}$$

Moglen et al. (2018) exponen la metodología del TR-55 para hallar el gasto máximo de escurrimiento:

$$Q_p = q_u A Q_p \quad \text{Ec.5}$$

Donde Q_p es el gasto máximo de escurrimiento en m^3/s , que es el pico de descarga unitaria en unidades de $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{cm})$ y A en km^2 .

El número de curva varía de acuerdo con el tipo de suelo y su uso por tanto en caso de cuencas urbanas se debe establecer las áreas residenciales, comerciales, industriales en cada cuenca o área hidrológica urbana (Yogi et al., 2021), incluso es un parámetro que puede variar regionalmente como lo demuestra (Lian et al., 2020) en un estudio con más de 600 eventos de lluvia escorrentía en China. La tabla 2 muestra la clasificación de los usos del suelo usadas en esta contribución.

Tabla 2. Grupo de suelo establecidos por Canholi (2014).

Grupo de suelo	Características
A	Arena y grava profunda ($h > 1.50$ m), muy permeable, con una alta tasa de infiltración, incluso cuando está saturada. Contenido de arcilla de hasta 10 %
B	Suelos arenosos, poco profundos ($h < 1.50$ m) y permeables. Contenido de arcilla entre 10 % y 20 %
C	Suelo poco profundo con capas subterráneas que impiden el flujo de agua hacia abajo. Arcilla contenida entre 20 % y 30 %
D	Suelo con nivel freático alto, con capas de arcilla cerca de la superficie, o suelos poco profundos sobre capas impermeables. Contenido de arcilla por encima del 30 %

Walega et al. (2020) y Poudel et al. (2020) utilizaron el modelo TR-55 para distintas cuencas experimentales, el primero en un estudio que abarcó tres cuencas de la región del sudeste de los Estados Unidos y el segundo en una cuenca del estado de Arizona, en ambos estudios se concluye con resultados individuales, que permiten al investigador corroborar la utilización del modelo distintas prestaciones. Yao et al. (2018) por su parte realizan un estudio muy detallado de la ciudad de Beijing en China, donde identifica mediante el uso de *software* GIS los usos del suelo con especial detalle. Mientras Hu et al. (2021) comparan los resultados obtenidos con la metodología de CN ante un modelo TVGM_Urban. Finalmente, y de manera subjetiva, como expresa Ballinas-González et al. (2020) la efectividad de un modelo hidrológico depende en muchas ocasiones de las habilidades del modelador de representar el fenómeno lo más adecuado a la realidad, con el alto grado de incertidumbre que esto conlleva.

Tormenta de diseño

La estación meteorológica Yabú (Código 78343) se encuentra en la provincia de Villa Clara, Cuba, localizada en los $22^\circ 26' \text{ N}$ y $79^\circ 59' \text{ W}$, a 116.44 m sobre el nivel medio del mar, con presencia de un relieve llano, a aproximadamente 7 km del centro de la ciudad de Santa Clara, su privilegiada posición en la misma permite tener un certero comportamiento de las variables climáticas que afectan el lugar Castillo (2022a), (Castillo (2022b). Para la obtención del valor de la intensidad promedio con la cual se elabora la tormenta de diseño, se utiliza la ecuación 6 luego de haber realizado un estudio de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia en la estación con pluviogramas comprendidos desde los años 1990 hasta el 2019.

$$I = \frac{135.57^{0.1309}}{(D^{1.092} + 61.58)}$$

Ec.6

Donde:

I: Intensidad de la precipitación media en mm/min (para 1 %=0.998, 5 %=0.809, 10 %=0.739)

T: Período de retorno en años

D: Duración de la tormenta en minutos (con la adopción del modelo racional y cumpliendo uno de sus principios D=120 min)

Las tormentas de diseño utilizadas en esta contribución se muestran en la tabla 3:

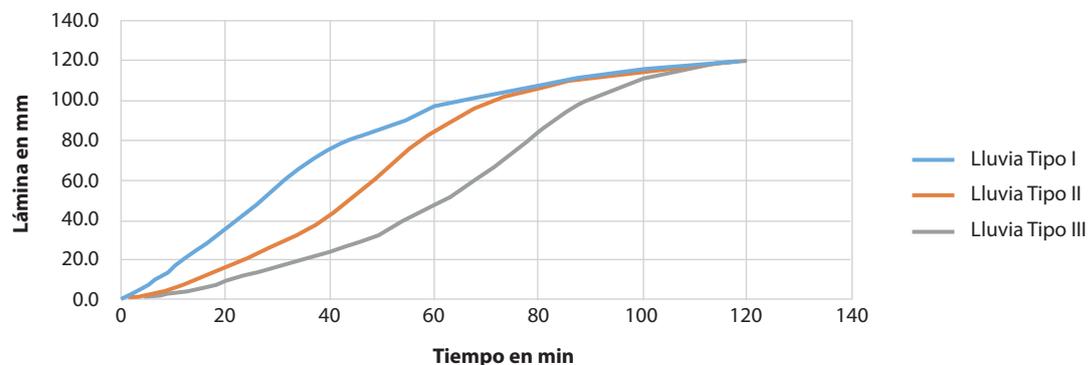
Tabla 3. Tormentas de diseño usadas en la modelación de la cuenca de estudio

Tipo	Lámina en mm	Duración en h	Período de Retorno en años	Intensidad máxima en mm/min	Tiempo donde ocurre la In. Máxima en h	Coefficiente de retardo de la tormenta (r)
Tipo I	121.2	2	100	4.95	0.17-0.25	0.10
Tipo I	110.4	2	50	4.52	0.17-0.25	0.10
Tipo I	88.80	2	10	3.63	0.17-0.25	0.10
Tipo II	121.2	2	100	1.92	0.75-0.83	0.40
Tipo II	110.4	2	50	1.75	0.75-0.83	0.40
Tipo II	88.80	2	10	1.42	0.75-0.83	0.40
Tipo III	121.2	2	100	2.08	1.67-1.75	0.85
Tipo III	110.4	2	50	1.90	1.67-1.75	0.85
Tipo III	88.80	2	10	1.52	1.67-1.75	0.85

Fuente: Elaboración propia

Las lluvias son distribuidas en el tiempo mediante la metodología de Huff (Castillo García, 2022b), la figura 3 muestra las curvas de masa acumulativas de las tormentas de Tipo I, II y III para una probabilidad del 1 %

Figura 3. Distribución temporal de las tormentas de diseño de 1 % para la modelación de la cuenca en estudio

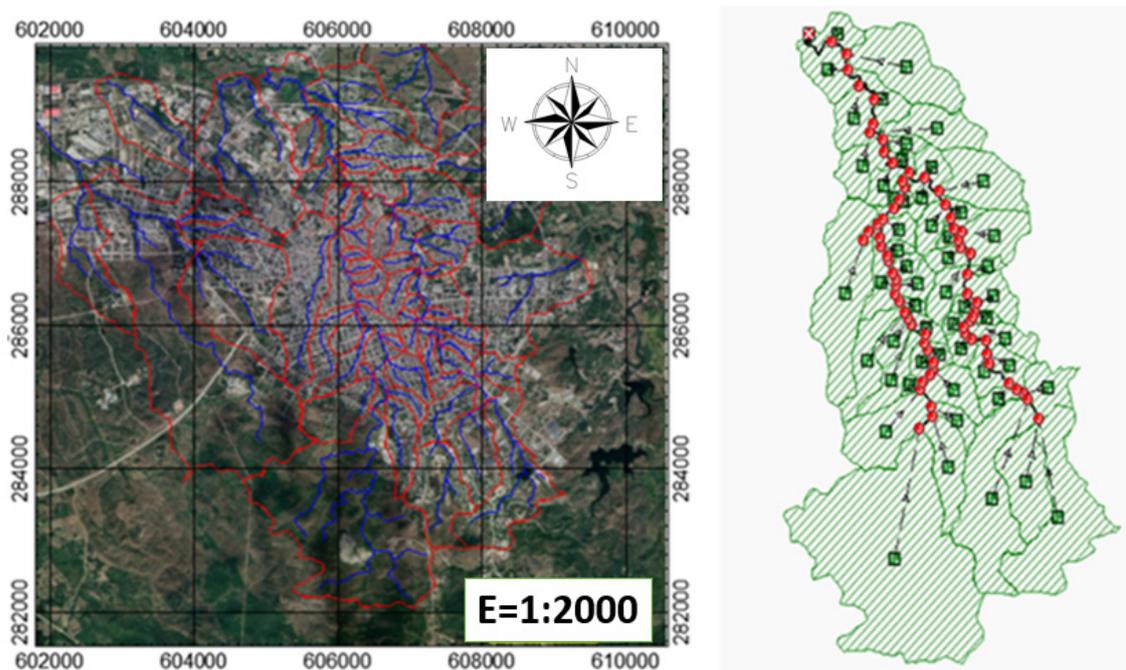


Fuente: Castillo García, 2022b

Modelación de la cuenca y el cauce

A partir de los datos obtenidos del procesamiento geoespacial de la base de datos cartográfica, el uso del concepto de Área Hidrológica Urbana y el trazado de las mismas, se realiza la modelación hidrológica de la cuenca mediante el *software* Storm Sanitary Analysis v2015 como se muestra en la figura 4, se conforman un total de 54 AHU que tributan a los cauces principales de la cuenca, de ellas solo 6 son laderas sin cauces. Cada una de estas áreas hidrológicas tienen características propias inherentes a su cauce hasta los vertimientos en el río y tienen parámetros hidrológicos distintos. Si bien el tiempo de concentración obtenido en Castillo (2021) es una aproximación empírica de acuerdo a los parámetros característicos del río principal, es de esperar que los resultados obtenidos en este trabajo difieran puesto que en esta oportunidad se discretiza la cuenca total en unidades mucho más pequeñas.

Figura 4. Discretización del modelo de escorrentía en Áreas Hidrológicas Urbanas mediante software GIS y Storm Sanitary Analysis



Fuente: Elaboración propia

El cálculo del tiempo de concentración de cada AHU se realiza por la formulación de la FAA ecuación 7, el cual tiene en cuenta parámetros como longitud del cauce, pendiente media y el Coeficiente C de Escurrimiento (Fórmula Racional), el 70 % del área de la cuenca es urbanizada y presenta una alta impermeabilidad, por tanto, esta formulación permite considerar el efecto del grado de impermeabilización en el cauce de cada cañada tributante a los ríos Bético y Cubanicay. La tabla 4 muestra un resumen de las AHU con mayor área de la cuenca.

$$0.3788(1.1 - C)L^{0.5}S^{-0.332}$$

Ec.7

Tabla 4. Resumen de las características hidrológicas de las Áreas hidrológicas Urbanas con mayor tamaño

Elemento	Descripción	Área	Pendiente	Longitud	C	Tiempo
		(ha)	(%)	(m)		(hh:mm:ss)
AHU-ZC.VB:01	Nacimiento del Bélico	423.26	1.5600	3 974.83	0.41	01:51:40
AHU-ZC.VC:01	Nacimiento del río Cubanicay	134.53	1.6100	2 701.30	0.46	01:32:33
AHU-ZC.VC:03	Sakenaff Zona Hospitalaria	130.12	5.6500	2 681.04	0.65	00:42:40
AHU-ZW.VB:08	Condado-Calle Real	128.95	1.2800	2 325.82	0.72	00:55:01
AHU-ZE.VB:05	Libertad-Guamajal	87.77	1.5000	1 603.24	0.55	01:02:43
AHU-ZW.VB:01	Lacteo	65.78	2.6700	1 386.07	0.42	00:59:31
AHU-ZC.VC:02	Escuela de Medicina	65.49	2.0900	1 657.52	0.50	01:02:18
AHU-ZE.VC:09	Taller de Locomotoras	62.47	1.0100	1 085.10	0.62	00:51:22

Fuente: Elaboración propia

Tanto los coeficientes C de escurrimiento como el Número de Curva escogido para la cuenca se obtienen a partir del análisis de la superficie del terreno y utilizando las tablas y recomendaciones de la NC 1239-2018 y del Reporte Técnico 55 del SCS en correspondencia a un tipo de suelo C con un valor de impermeabilidad medio-alto debido a la presencia en la ciudad de afloraciones de roca serpentina impermeable, la tabla 5 resume estas consideraciones.

Tabla 5. Coeficientes de escurrimiento y Número de Curva asociados a áreas urbanizadas

Tipo de Desarrollo	C	CN	Imagen Típica
Zonas completamente urbanizadas con calles asfaltadas y sin presencia de vegetación	0.7-0.9	85-99	
Zonas urbanizadas con calles sin asfaltar y con presencia de vegetación	0.5-0.7	75-85	
Zonas no urbanizadas con presencia abundante de vegetación	0.3-0.5	60-75	

Fuente: Elaboración propia a partir de recopilación de autores.

La modelación de los cauces principales, dígase los ríos Bélico y Cubanicay debe cumplir varias pautas que simplifiquen la complejidad del mismo, las características reales del cauce parten de una urbanización que ha reducido las secciones de inundación de los mismos a límites en algunos casos alarmantes, la presencia de sólidos y escombros devenidos de la indisciplina y la falta de control de las autoridades, la presencia de obras de cruce sobre los mismos, en muchos casos reducidas por la acumulación de sedimentos. Debido a la dificultad de poder representar todos los fenómenos que afectan el tránsito de la avenida en este modelo hidrológico y respondiendo también a un objetivo que es encontrar los gastos máximos e hidrogramas de avenida en varios puntos del cauce dentro de la ciudad para en próximas investigaciones profundizar en el tránsito de la misma sobre el cauce, los autores proponen:

1. La modelación se realizará para un período de 10 horas con la entrada de la lluvia de 2 horas de duración y con la lámina especificada.
2. Se considera al cauce con una geometría trapezoidal con una sección variable pero que siempre será capaz de transportar el pico de la avenida, esta suposición, aunque realmente no se cumple, permite conocer cuál sería el hidrograma de entrada a un tramo y su correspondiente tránsito sin considerar efectos de arrastre de sedimentos, acumulación en obras de cruce, taponamientos del cauce y otros fenómenos que deben ser investigados posteriormente.
3. El coeficiente de rugosidad n de Manning para todos los tramos será de 0.04, también es una simplificación no real, pero que permite concentrar el tránsito en un valor medio en todo el río.
4. Los resultados obtenidos de esta modelación no pueden ser utilizados hasta que no se hayan comprobado los efectos de todas las variables limitantes expuestas con anterioridad, sin embargo, si son la entrada a modelos de tránsito de avenidas como HEC-RAS o Iber.

Bajo estas suposiciones podemos considerar que los resultados obtenidos en esta investigación solo tienen en cuenta la morfología de las Áreas Hidrológicas y sus tiempos de respuesta, no así el caso del tránsito de la avenida a las cuales se le aplicará condiciones controladas que reduzcan la complejidad del problema y permitan obtener hidrogramas en distintos puntos para realizar modelaciones hidráulicas y de esta forma obtener realmente el comportamiento del sistema fluvial.

3. Resultados y discusión

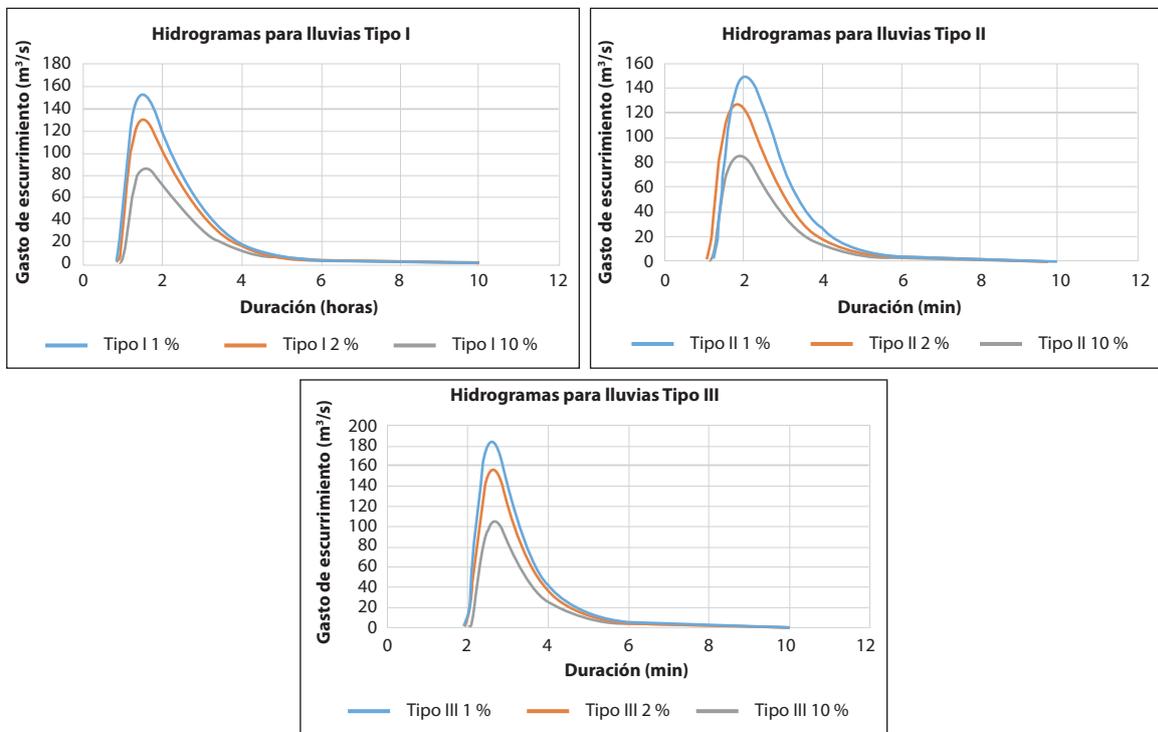
Para la simplificación de los resultados obtenidos la tabla 6 muestra los puntos de cierre que son analizados en esta contribución, destacar que algunos de ellos como el Puente de la Cruz (PC-17) y la unión de los ríos Bélico y Cubanicay son lugares considerados como Puntos Críticos debido a las inundaciones recurrentes en la zona.

Tabla 6. Puntos de cierre donde se obtienen los hidrogramas de diseño

Nombre del Punto	Descripción	Coordenada X	Coordenada Y	Río
PC-22	Puente del río Bélico en Circunvalación Sur	606483.69	284833.69	Bélico
PC-03	Puente sobre la doble Vía del Hospital Nuevo	607778.65	285304.49	Cubanicay
PC-38	Puente de la Calle Marta Abreu	606077.47	286826.05	Bélico
PC-17	Puente de la Cruz	606955.03	287204.40	Cubanicay
PC-21	Unión de los ríos Bélico y Cubanicay	606353.29	287876.83	Bélico
PC-49	Puente Peatonal de la antigua Planta de Tratamiento	605876.76	288451.40	Bélico
PV	Punto de cierre de la Cuenca	604990.20	289575.35	Bélico

Fuente: Elaboración propia

El PV o punto de cierre de la cuenca en general, se localiza a las afueras del perímetro urbano de la ciudad, la figura 5 muestra los hidrogramas resultantes para las distintas probabilidades de diseño obtenidos a partir de la modelación con Storm Sanitary Analysis.

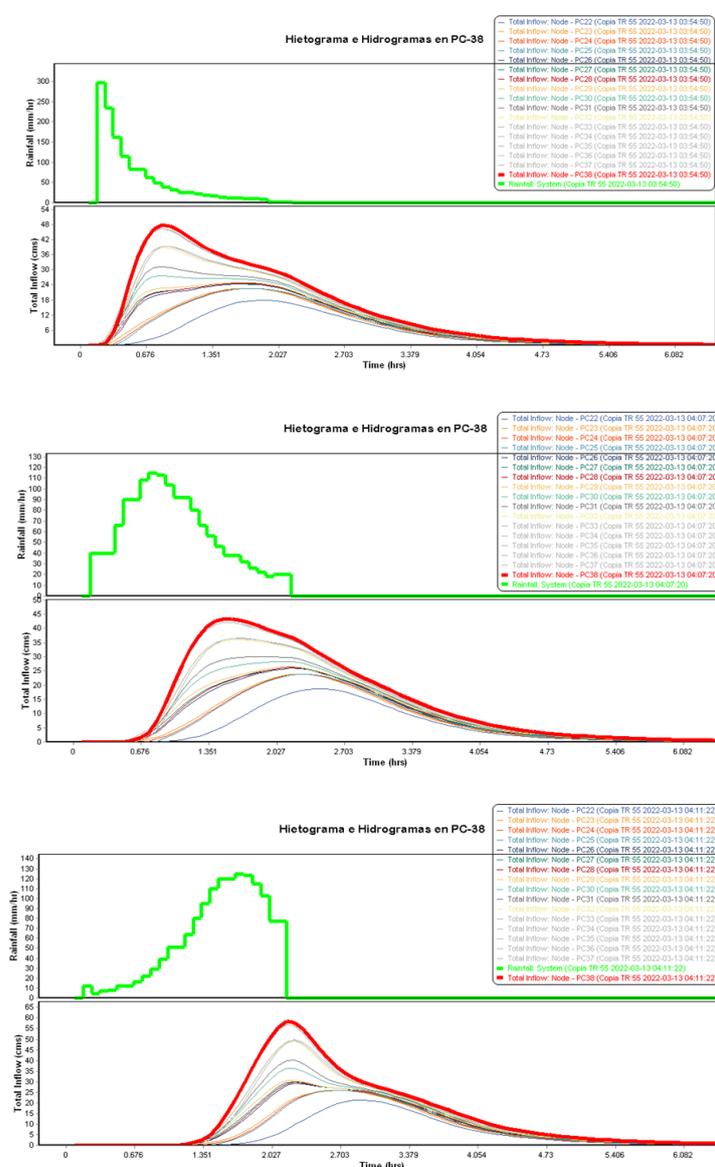
Figura 5. Hidrogramas resultantes para los distintos tipos de lluvia y probabilidad de diseño

Fuente: Elaboración Propia

El resultado del análisis de la figura 5 demuestra que las lluvias Tipo I y Tipo II no tienen grandes diferencias en sus hidrogramas, solo las asociadas al desfase del tiempo al pico generado por un coeficiente r mayor, sin embargo, si se aprecia una notable diferencia en el pico entre las lluvias Tipo I y II con respecto a la Tipo III del orden de los $20 \text{ m}^3/\text{s}$, esta diferencia puede deberse a varios factores, sobre todos factores físicos de la propia cuenca y sus áreas hidrológicas. Esta conclusión permite inferir que para lluvias donde el pico del aguacero se produzca en su etapa final la reacción de la cuenca y su sistema fluvial provoca un mayor gasto de escurrimiento, lo cual la convierte para una probabilidad determinada en la lluvia más peligrosa.

La figura 6 propone una comparación entre los hidrogramas obtenidos en el PC 18 para las lluvias de Tipo I, II y III con una probabilidad del 1 %.

Figura 6. Hidrogramas resultantes del PC-38 para 1% de probabilidad de diseño



Fuente: Elaboración Propia mediante Storm Sanitary Analysis

En el análisis hidrológico y las aplicaciones relevantes (por ejemplo, en la operación de alerta temprana de inundaciones), el tiempo de retardo juega un papel importante en el proceso hidrológico (Wu, 2016).

Wu (2016) cita a Hall (1984) quien realizó un resumen de siete definiciones del tiempo de retardo basado en la diferencia de tiempo entre la lluvia y el escurrimiento de eventos. En general, el tiempo de retardo se define como la diferencia de tiempo entre los centroides de los períodos efectivos de una precipitación específica derivada de un hietograma y el momento en el que ocurre la descarga máxima.

La tabla 7 muestra los resultados de los tiempos de concentración para la ciudad de Santa Clara, utilizando los distintos métodos de empíricos. Se puede observar que las estimaciones del tiempo de concentración son muy diferentes entre sí ya que cada autor estima su ecuación para cuencas con características muy peculiares. Castillo et. al (2021)

Tabla 7. Tiempos de concentración obtenidos en Castillo et. al (2021)

Método	Tiempo en (min)
Kirpich-Pensylvania	37.98
Carter	52.52
Kerby-Hathaway	73.39
FAA	124.27
Kirpich-Tennessee	125.33
California	127.54
Cuerpo de Ingenieros	133.61
Chow	171.29
Bransby-Williams	218.85
SCS Lag	350.94

Utilizando los métodos de Hall (1984) citados en Wu (2016) se obtienen los tiempos de retardo modelados en la cuenca para los distintos tipos de lluvias y distintas probabilidades, la tabla 8 muestra los resultados obtenidos con la ayuda de software CAD.

Tabla 8. Obtención de los tiempos de retardo del modelo TR-55 para el punto de cierre de la cuenca

t-lag(h)	1%			2%			10%		
	Tipo-I	Tipo-II	Tipo-III	Tipo-I	Tipo-II	Tipo-III	Tipo-I	Tipo-II	Tipo-III
t-lag 1	1.56	2.14	2.58	1.60	2.16	2.61	1.67	2.23	2.66
t-lag 4	1.43	1.43	1.09	1.47	1.45	1.11	1.55	1.52	1.17
t-lag 5	1.25	1.85	2.40	1.26	1.93	2.41	1.35	1.94	2.50
t-lag 6	1.08	1.51	1.75	1.10	1.37	1.50	1.10	1.59	1.67
t-lag 7	1.12	1.13	0.91	1.13	1.22	0.92	1.22	1.22	1.00

Fuente: Elaboración Propia.

Los tiempos de la tabla 8 son menores que los hallados por Castillo et. al (2021) por lo general. El tiempo de retardo en las formulaciones 1, 5 y 6 es directamente proporcional al coeficiente de retardo de la lluvia (tiempo al pico de la lluvia/tiempo total de la lluvia). En caso de las formulaciones 4 y 7 se aprecia como la lluvia tipo III presenta una disminución del tiempo de retardo, siendo esta la de mayor pico de descarga. Se logró comprobar que el tiempo de retardo en el modelo TR 55 no está influenciados drásticamente por ninguna de las probabilidades de ocurrencia valoradas.

4. Conclusiones y recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en el análisis de la modelación hidrológica en la cuenca los autores arriban a las siguientes conclusiones.

- Las lluvias utilizadas son representativas de toda la cuenca de 20 km² aproximadamente, lo cual, aunque es una hipótesis conservadora, permite obtener un valor de escurrimiento crítico para la probabilidad deseada.
- Se obtuvieron los valores de gasto máximo de escurrimiento para los distintos puntos de control, distintos tipos de lluvia y diferentes probabilidades, dando como resultado que la lluvia de Tipo III es que más gasto pico provoca.
- Una comparación de los tiempos de concentración sin considerar el tránsito interrumpido de la avenida por obras antropogénicas, da como resultado que los valores oscilen entre la 1 h y 3 h correspondientes con los resultados obtenidos en otras contribuciones.
- El gasto máximo e hidrogramas de diseño obtenidos en este trabajo no pueden ser usados para la elaboración de planos de inundación sin antes transitarlos por el río.

Bibliografía

- Ballinas-González, H. A., Alcocer-Yamanaka, V. H., Canto-Rios, J. J. y Simuta-Champo, R. (2020). Sensitivity Analysis of the Rainfall-Runoff Modeling Parameters in Data-Scarce Urban Catchment. *Hydrology*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/hydrology7040073>
- Beven, K. J. (2020). A history of the concept of time of concentration. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24(5), 2655-2670. <https://doi.org/10.5194/hess-24-2655-2020>
- Campos, J. N. B., Studart, T. M., Souza Filho, F. D. y Porto, V. C. (2020). On the Rainfall Intensity-Duration-Frequency Curves, Partial-Area Effect and the Rational Method: Theory and the Engineering Practice. *Water*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/w12102730>
- Castillo, C., Abreu Franco, D. E. y Álvarez González, M. (2021). Evaluación de distintas fórmulas empíricas para el cálculo del tiempo de concentración en la cuenca urbana del río Bélico y Cubanicy, ciudad de Santa Clara. *Enfoque UTE*, 12, 51-64. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.729>
- Castillo, C., Domínguez, I. y Martínez, Y. (2022). Modelos paramétricos de distribución temporal de precipitaciones en la estación meteorológica Yabú de la provincia Villa Clara, Cuba. *Tecnologías y Ciencias del Agua*. Preprint. doi: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-14-4-4>
- Castillo, C., Domínguez, I., Martínez, Y. y Abreu, D. (2022). Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia para la ciudad de Santa Clara, Cuba. *Tecnologías y Ciencias del Agua*. Preprint. doi: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-15-1-9>
- Chin David, A. (2019). Estimating Peak Runoff Rates Using the Rational Method. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 145(6), 04019006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001387](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001387)

- Deb, P., y Kiem, A. S. (2020). Evaluation of rainfall–runoff model performance under non-stationary hydro-climatic conditions. *Hydrological Sciences Journal*, 65(10), 1667-1684. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1754420>
- Deb, P., Kiem, A. S. y Willgoose, G. (2019). A linked surface water-groundwater modelling approach to more realistically simulate rainfall-runoff non-stationarity in semi-arid regions. *Journal of Hydrology*, 575, 273-291. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.039>
- Fraga, I., Cea, L. y Puertas, J. (2019). Effect of rainfall uncertainty on the performance of physically based rainfall–runoff models. *Hydrological Processes*, 33(1), 160-173. <https://doi.org/10.1002/hyp.13319>
- Hasan, H. H., Mohd Razali, S. F., Ahmad Zaki, A. Z. y Mohamad Hamzah, F. (2019). Integrated Hydrological-Hydraulic Model for Flood Simulation in Tropical Urban Catchment. *Sustainability*, 11(23). <https://doi.org/10.3390/su11236700>
- Hettiarachchi, S., Wasko, C. y Sharma, A. (2019). Can antecedent moisture conditions modulate the increase in flood risk due to climate change in urban catchments? *Journal of Hydrology*, 571, 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.039>
- Hu, C., Wu, Q., Li, H., Jian, S., Li, N. y Lou, Z. (2018). Deep Learning with a Long Short-Term Memory Networks Approach for Rainfall-Runoff Simulation. *Water*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/w10111543>
- Hu, C., Xia, J., She, D., Song, Z., Zhang, Y. y Hong, S. (2021). A new urban hydrological model considering various land covers for flood simulation. *Journal of Hydrology*, 603, 126833. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126833>
- Joshi, N., Bista, A., Pokhrel, I., Kalra, A., y Ahmad, S. Rainfall-Runoff Simulation in Cache River Basin, Illinois, Using HEC-HMS. *World Environmental and Water Resources Congress 2019*, 348-360. <https://doi.org/doi:10.1061/9780784482339.035>
- K. N, V. (2021). "Runoff assessment by Storm water management model (SWMM)- A new approach". *Journal of Applied and Natural Science*, 13(SI), 142-148. <https://doi.org/10.31018/jans.v13iSI.281>
- Kader, M. Y. A., Bad, R. y Saley, B. (2020). Study of the 1D Saint-Venant Equations and Application to the Simulation of a Flood Problem. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 8(7), 14. <https://doi.org/10.4236/jamp.2020.87090>
- Karpathy Nicholas, S., y Chin David, A. (2019). Relationship between Curve Number and ϕ -Index. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 145(11), 06019009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001426](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001426)
- Lian, H., Yen, H., Huang, J.-C., Feng, Q., Qin, L., Bashir, M. A., Wu, S., Zhu, A. X., Luo, J., Di, H., Lei, Q. y Liu, H. (2020). CN-China: Revised runoff curve number by using rainfall-runoff events data in China. *Water Research*, 177, 115767. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115767>
- Miller, A. J., Welty, C., Duncan, J. M., Baeck, M. L. y Smith, J. A. (2021). Assessing urban rainfall-runoff response to stormwater management extent. *Hydrological Processes*, 35(7). <https://doi.org/10.1002/hyp.14287>
- Mishra, S.K., Singh, V.P. y Singh, P.K. (2018). Revisiting the Soil Conservation Service Curve Number Method. En Singh, V., Yadav, S., Yadava, R. (eds) *Hydrologic Modeling. Water Science and Technology Library*, 81. Springer, https://doi.org/10.1007/978-981-10-5801-1_46
- Moglen, G. E., McCuen, R. H., y Moglen, R. L. (2018). Consequences of Changes to the NRCS Rainfall-Runoff Relations on Hydrologic Design. *Journal of Hydrologic Engineering*, 23(8), 04018032. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001681](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001681)
- Nardi, F., Annis, A., y Biscarini, C. (2018). On the impact of urbanization on flood hydrology of small ungauged basins: the case study of the Tiber river tributary network within the city of Rome. *Journal of Flood Risk Management*, 11(S2), S594-S603. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12186>
- Ormsbee, L., Hoagland, S. y Peterson, K. (2020). Limitations of TR-55 Curve Numbers for Urban Development Applications: Critical Review and Potential Strategies for Moving Forward. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(4), 02520001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001885](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001885)

- Poudel, U., Ahmad, S. y Stephen, H. (2020). Impact of Urbanization on Runoff and Infiltration in Walnut Gulch Experimental Watershed. *Watershed Management* 2020, 219-232. <https://doi.org/doi:10.1061/9780784483060.020>
- Roohi, M., Soleymani, K., Salimi, M. y Heidari, M. (2020). Numerical evaluation of the general flow hydraulics and estimation of the river plain by solving the Saint-Venant equation. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(2), 645-658. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00718-9>
- Ross, C. W., Prihodko, L., Anchang, J., Kumar, S., Ji, W. y Hanan, N. P. (2018). HYSOGs250m, global gridded hydrologic soil groups for curve-number-based runoff modeling. *Scientific Data*, 5(1), 180091. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.91>
- Schoener, G. (2018). Urban Runoff in the U.S. Southwest: Importance of Impervious Surfaces for Small-Storm Hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 23(2), 05017033. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001610](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001610)
- Stella, J. M., y Anagnostou, E. N. (2018). Modeling the flood response for a sub-tropical urban basin in south Florida. *Tecnología y ciencias del agua*, 9, 128-141. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-03-05>
- Valle Junior, L. C. G. D., Rodrigues, D. B. B. y Oliveira, P. T. S. D. (2019). Initial abstraction ratio and Curve Number estimation using rainfall and runoff data from a tropical watershed. *RBRH*, 24(0). <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920170199>
- Walega, A., Amatya, D. M., Caldwell, P., Marion, D. y Panda, S. (2020). Assessment of storm direct runoff and peak flow rates using improved SCS-CN models for selected forested watersheds in the Southeastern United States. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 27, 100645. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100645>
- Wang, S., y Wang, H. (2018). Extending the Rational Method for assessing and developing sustainable urban drainage systems. *Water Research*, 144, 112-125. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.022>
- Wu, S.-J., Yeh, K.-C., Ho, C.-H. y Yang, S.-H. (2016). Modeling probabilistic lag time equation in a watershed based on uncertainties in rainfall, hydraulic and geographical factors. *Hydrology Research*, 47(6), 1116-1141. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.134>
- Yao, L., Wei, W., Yu, Y., Xiao, J. y Chen, L. (2018). Rainfall-runoff risk characteristics of urban function zones in Beijing using the SCS-CN model. *Journal of Geographical Sciences*, 28(5), 656-668. <https://doi.org/10.1007/s11442-018-1497-6>
- Yogi, F., Correa, C. J. P., Arruda, E. M. y Tonello, K. C. (2021). Sensitivity analysis of rainfall-runoff parameters models to estimate flows. *Applied Water Science*, 11(2), 25. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01348-3>