



Universidad
La Salle[®]
Oaxaca

REVISTA CIENTÍFICA DE

INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

VOLUMEN 2 NÚMERO 2

Índice

Carta Editorial	3
Diseño bioclimático de una vivienda en el municipio de San Miguel Chicahua, Oaxaca	6
Análisis del uso del agua superficial y subterránea de la Región Hidrológica Administrativa XIII Aguas Del Valle De México	19
Adsorción de pb2+ y colorantes mediante carbón activado obtenido de <i>Agave Angustifolia</i> Haw. y residuos vegetales	30
Método Simplex en VBA: una propuesta didáctica para la enseñanza de la programación lineal	38

Carta Editorial

Compromiso Ambiental y Educación, construyendo un futuro sostenible

Jacques Cousteau pionero en la investigación marina y defensor apasionado de la educación ambiental, personifica la conexión inseparable entre el respeto por nuestro entorno y la trascendencia del conocimiento al afirmar que “solo se puede proteger lo que se ama y solo se ama lo que se conoce”. Esta cita ejemplifica el lazo natural entre el respeto a nuestro entorno y la importancia del conocimiento.

Es un privilegio para mí dirigirme a ustedes en esta ocasión como invitada a redactar la carta editorial para el segundo número de la Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura de la Universidad La Salle Oaxaca. En este número nos complace presentarles un compendio de investigaciones que reflejan el firme compromiso de los investigadores con dos pilares fundamentales: el cuidado del medio ambiente y la educación en múltiples disciplinas y dimensiones.

El cuidado del medio ambiente es una responsabilidad que nos atañe a todos y en el ámbito de la ingeniería y la arquitectura, esta responsabilidad adquiere una importancia aún mayor. Las decisiones que tomamos en estas disciplinas tienen un impacto directo en el entorno que habitamos y es imperativo que nos comprometamos a adoptar prácticas y tecnologías sostenibles que minimicen este impacto y promuevan la preservación de nuestros recursos naturales para las generaciones futuras.

La educación, por otro lado, es el pilar que sostiene la formación de profesionales para que no solo sean conscientes de los retos ambientales, sino que también estén preparados para enfrentarlos y contribuir a un futuro más sostenible.

En este número encontrarán investigaciones que abordan diversos aspectos de la educación en ingeniería y arquitectura, los cuales son diseño de viviendas sociales, análisis del uso del agua en el valle de México, generación de materiales adsorbentes y una propuesta didáctica para la enseñanza de la programación lineal.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todos los investigadores y colaboradores que han hecho posible la realización de este número; su dedicación y esfuerzo son la piedra angular sobre la cual se construye el prestigio de nuestra revista y de nuestra institución, y espero que las contribuciones presentadas inspiren a nuestros lectores a seguir explorando nuevas fronteras en la investigación científica, a comprometerse activamente con la protección de nuestro medio ambiente y a fomentar una educación inclusiva y transformadora.

Sin más preámbulos, les invito a sumergirse en los artículos que componen este número, y confío en que encontrarán en ellos una Nota de conocimiento e inspiración.

Indivisa Manent
Lo unido permanece

Dra. Zizilia Zamudio Beltrán
Investigadora, Vicerrectoría de Investigación, La Salle México

Derechos de Autor© 2023 Zizilia Zamudio Beltrán



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

Aviso de Privacidad

Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura

La Universidad La Salle Oaxaca A.C., con domicilio en Camino a San Agustín No. 407, Colonia Santa Cruz Xoxocotlán Oaxaca, Oaxaca, C.P. 71230, es responsable del tratamiento de sus datos personales en términos de lo establecido por el artículo 3º fracción XIV de la Ley Federal de Protección de Datos Personales en Posesión de Particulares (LFPDPPP). Los datos personales generales recabados de manera electrónica en este formulario como lo son: nombre completo, correo electrónico personal e institución o lugar de procedencia, serán utilizados para el llenado del formulario de registro que le permitirá tener acceso para publicar o proponer artículos para su exposición en "La Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura" de la Universidad La Salle Oaxaca. Si usted tiene alguna duda sobre el manejo de los datos personales o desea ejercer sus derechos de acceso, rectificación, cancelación u oposición, o bien quiere conocer nuestro aviso de privacidad integral, puede hacerlo entrando a nuestro sitio web: [web www.ulsaoaxaca.edu.mx](http://web.www.ulsaoaxaca.edu.mx).

Diseño bioclimático de una vivienda en el municipio de San Miguel Chicahua, Oaxaca

Nancy Santiago Matías^{1*}, Heidy Gómez Barranco², Raúl Pavel Ruiz Torres³.

DOI: 10.56643/rcia.v2i2.166

*Autor de correspondencia

Resumen

De acuerdo con el informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social 2023 (Desarrollo, 2023), el municipio de San Miguel Chicahua, localizado en el estado de Oaxaca, se encuentra catalogado entre aquellos que presentan altos grados de marginación y pobreza. Estas carencias se evidencian en los ámbitos de educación, seguridad social, salud, acceso a alimentación nutritiva, calidad y espacios de la vivienda, así como en los servicios básicos de ésta.

En el proyecto que sustenta este artículo se diseñó una vivienda con criterios bioclimáticos para una familia que percibió recursos de la Fundación Ayú, logrando una vivienda autoproducida. Empleando una metodología etnográfica-descriptiva se realizaron visitas al sitio. Asimismo, se efectuaron entrevistas no estructuradas que posibilitaron el acercamiento con los integrantes de la familia, las cuales tomaron en consideración sus necesidades, creencias, actividades diarias, convivencia, como también el contexto natural y construido en el que se desarrollan, conociendo dimensiones del predio y sus espacios. Además, se realizaron pruebas no destructivas en el sitio, con hobs, cámara termográfica, estación meteorológica y distintas apps que estudian las condiciones climatológicas. Este estudio es parte del proyecto 231260 "Propuesta del modelo de producción social replicable de vivienda y hábitat" para una vivienda social, progresiva, con materiales de la región, de autoconstrucción asistida y sustentable que incentiven la arquitecturabioclimática.

Palabras clave: Bioclimático, Habitabilidad, Rururbano, Sustentabilidad

Abstract

The Municipality of San Miguel Chicahua located in the state of Oaxaca is classified according to the annual report on the situation of poverty and social lag 2023 (Development, 2023), with high degrees of marginalization and poverty.

1 Estudiante de Arquitectura, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, correo electrónico: nancyarch8@gmail.com.

2 Doctora en arquitectura, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca. CA "Tecnología y Sustentabilidad". ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5707-0411>. Correo electrónico: arq.heidy.gb@gmail.com.

3 Doctor en arquitectura, Universidad Autónoma de Chiapas CA "Cocovi". ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5707-0411>. Correo electrónico: raul.ruiz@unach.mx. Recibido: 07/09/2023 | Aceptado: 11/10/23 | Publicado: 20/12/23

These deficiencies are perceived in education, social security, health access, nutritious food, quality and spaces of housing, and basic services of this.

For this article, a bioclimatic housing was designed for a family who received resources from the AYU foundation, having a self-produced housing; through an ethnographic-descriptive methodology, visits were made to the site, approaching the family members through unstructured interviews, taking into consideration their needs, beliefs, daily activities, coexistence; as well as the natural and built context in which they develop, knowing the dimensions of the property and its spaces, carrying out non-destructive tests on the site, with HOBOS, thermal camera, weather station and different apps that study weather conditions. This study is part of project 231260 "Proposal of the replicable social production model for housing and habitat" for social, progressive housing with regionally-sourced materials, assisted self-construction, and sustainable practices that promote bioclimatic architecture.

Key words. Bioclimatic, Habitability, Rururbano, Sustainability.

Cómo citar este artículo: Santiago Matías, N., Gómez Barranco, H., Ruiz Torres, R. P. (2024) Diseño bioclimático de una vivienda en el municipio de San Miguel Chicahua, Oaxaca. *Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura*. 2(2). 7-31. DOI: <https://doi.org/10.56643/rcia.v2i2.166>

Introducción

1.1 Planteamiento del problema

El municipio de San Miguel Chicahua, considerado de ámbito rururbano, cuenta con 2 245 habitantes y 91.2% de pobreza, presentando carencias de tipo educativo, acceso a servicios de salud, a seguridad social, a alimentación nutritiva y de calidad, como también en la calidad y los espacios de la vivienda. Tras realizar visitas al sitio, se identificó que su normativa constructiva es deficiente y que no existen lineamientos según los cuales proporcionar seguridad y confort a las viviendas. Del mismo modo, se carece de una tipología o sistemas constructivos definidos; la conservación de su arquitectura vernácula es nula, pero, sobre todo, no satisface las necesidades de sus habitantes y del lugar mismo.

A fin de presentar una propuesta al proyecto PRONAH 321260 que posibilitara el acceso y el trabajo en la comunidad, se contactó a un represen-

tante técnico de la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (Sedatu). Dicha Secretaría no tiene representatividad en el estado de Oaxaca, donde es la Comisión Nacional de Vivienda (Conavi) la que demuestra su trabajo en las comunidades del estado. En compañía del representante técnico, se llevó a cabo un recorrido por las viviendas que han sido autoproducidas en las comunidades seleccionadas; éstas podrían haber sido beneficiadas por programas de construcción o reconstrucción de viviendas de instituciones de los gobiernos federal o estatal. Sin embargo, se constató que no recibieron apoyo de ningún programa de gobierno y que sólo la asociación civil Ayú A. C., que ha apoyado a la mixteca oaxaqueña, Puebla y Guerrero, promueve el desarrollo de dichas poblaciones. Estos estudios fueron respaldados por estudiantes y servidores de servicio social de la Facultad de Arquitectura “5 de Mayo” (Gómez Barranco, 2023), principalmente en lo que tiene que ver con la vivienda. Primero se seleccionó la localidad y la familia entre quienes poseen un predio con espacios ya construidos, pero de baja calidad, cuyos espacios son habitables, más no cuentan con habitabilidad, se encuentra la construcción física, pero carece de los requerimientos necesarios para satisfacer las necesidades de los usuarios y, aunque la familia haya crecido en ese ambiente adoptándolo como forma de vida, no cuenta con las condiciones adecuadas. En este sentido, se pone en riesgo su integridad porque no se construye conforme ciertas normas estructurales, con materiales adecuados, no se cuenta con las zonas y áreas necesarias en una orientación correcta, y no se toman en cuenta las medidas de higiene y seguridad que la misma construcción puede brindar.

1.2 Justificación

La arquitectura brinda soluciones constructivas en aras de proporcionar a las personas espacios habitables que mejoren su calidad de vida. Esto es lo que se pretende lograr con el Modelo de Producción Social Replicable de Vivienda y Hábitat (MPSRVYH). En este sentido, no se trata de percibir la vivienda sólo como un bien material, con una tipología que satisfaga la demanda de la misma y genere recursos al profesionista, sino de involucrarse con el lugar, con el contexto natural, social, económico, cultural y político, que proporciona información y conocimiento sobre la comunidad y la familia en particular. Ello permitirá que después puedan plantearse las condiciones de diseño más adecuadas, que los pobladores tengan contacto directo con esta planeación y participen en la construcción de su propia vivienda, mediante la autoconstrucción organizada y asistida. A

su vez, esto posibilitará que las bases y técnicas de construcción puedan ser transmitidas a otras personas de la comunidad. Se ve necesario proveer a la familia de una vivienda digna, que cumpla los criterios estructurales, con diseño arquitectónico bioclimático que mejore su calidad de vida e incentive el desarrollo personal de cada integrante, pero también el desarrollo colectivo como familia y como parte de una comunidad, tomando en cuenta sus modos de vida.

1.3 Antecedentes

1.3.1 Antecedentes de la vivienda social

A finales del siglo XIX, en México, la población de las ciudades se incrementó aceleradamente debido a que las personas del campo migraban a éstas buscando mejores oportunidades laborales y de vida. Así, se instalaban en viviendas en condiciones insalubres y en condiciones de hacinamiento, lo que hacía que su calidad de vida se deteriorara paulatinamente. Según Alejandro Gómez (2021), la vecindad surgió como una alternativa de vivienda para la clase obrera; ésta posibilitó la congregación de muchas personas en viviendas cercanas y de poder compartir algunos servicios, sin la necesidad de estar en contacto directo con la calle. Esta situación llevó a que los gobiernos crearan instituciones como Infonavit o Fovissste, a través de las cuales promovieron la entrega de créditos a trabajadores beneficiarios para que pudieran adquirir casas de interés social. Dichas viviendas se construían contemplando una misma tipología de diseño, medidas mínimas de espacialidad para economizar recursos y dejaban en segundo plano el entorno que rodea a la vivienda y a los usuarios. El ámbito rural también fue puesto en segundo plano, lo que hizo que la autoconstrucción empírica se convirtiera en una práctica para proveerse de viviendas y protegerse de la intemperie.

1.3.2 Inicio de alternativas de viviendas sociales

De la mano de profesionistas, algunas asociaciones o personal independiente buscan alternativas para proporcionar viviendas dignas a las poblaciones rurales y rururbanas. Según Gustavo Romero Fernández (s. f.), ciertas organizaciones no gubernamentales conjuntan esfuerzos dirigidos a la creación de alternativas; en Argentina, Brasil, Ecuador, Perú, Uruguay, Colombia y México dichas organizaciones se han dedicado a la investigación y experimentación de viviendas sociales en

el ámbito rural, con el objetivo de mejorar tanto su calidad como la calidad de vida de las personas. Para ello, buscan soluciones que toman en cuentas las necesidades de los pobladores y el contexto en que se encuentran, a fin de adaptar los prototipos al hábitat, a lo que se suma la participación directa de los pobladores en la construcción de su vivienda, utilizando materiales de la región, técnicas constructivas fáciles de aprender, criterios de sustentabilidad y progresión futura de las viviendas.

En 1976, en Vancouver, se llevó a cabo la Primera Reunión Mundial por los Asentamientos Humanos, Hábitat I, organizada por la ONU, cuyo propósito fue promover la reflexión colectiva, la discusión, el establecimiento de lazos y la generación de propuestas relativas al hábitat y la vivienda. Posteriormente, en 1993, se realizó una reunión en Estambul, dirigida a difundir Hábitat II, con el propósito de fomentar la producción social del hábitat y la vivienda (PSHV) y potenciar los esfuerzos y la colaboración de los pobladores de las comunidades (Fernández, s. f.).

1.3.3 Autoconstrucción asistida y programa social de vivienda y hábitat

La autoconstrucción ha existido desde los inicios de la humanidad; en ese entonces, las personas construían sus espacios para protegerse de la intemperie y sus técnicas fueron transmitiéndose de generación en generación, hasta la actualidad. Actualmente, la autoconstrucción asistida constituye una alternativa que reduce riesgos constructivos y permite una planeación de la edificación con sustento teórico. Ejemplo de ello son el proyecto MUTUO, desarrollado por una empresa social en Perú, el cual busca erradicar la autoconstrucción sin asistencia reclutando arquitectos (Social, 2021) o el manual de autoconstrucción, “Reconstrucción integral del hábitat en Guendalizaa”, elaborado por Comunal Taller de Arquitectura, que plantea, paso a paso, cómo construir la vivienda utilizando materiales de la región y técnicas de fácil aprendizaje (Comunal, 2020).

Los programas sociales de vivienda plantean la autoconstrucción asistida conjuntamente con otros aspectos que permiten hacer de la vivienda un espacio con habitabilidad, que considera las necesidades presentes y futuras, y en su desarrollo y planeación fusiona lo social, lo normativo, lo económico, lo cultural, lo arquitectónico y lo sustentable. Esto implica proveer una planificación flexible, colectiva, con políticas, estrategias, nor-

mativas, financiamientos y asesorías, que propicie que los pobladores se conviertan en actores activos y aprendan las técnicas constructivas mediante la participación colaborativa, para obtener proyectos consolidados arquitectónica y estructuralmente, progresivos, replicables que, de la mano del bioclimatismo, incentiven prácticas orientadas a reducir los contaminantes del medio ambiente, ya sea a través de materiales, Notas de energía, recolección de residuos o contemplando el contexto natural en el diseño, aprovechando los recursos naturales (Fernández, s. f.).

Conahcyt es un organismo público que promueve y financia el Modelo de Producción Social Replicable de Vivienda y Hábitat (PRONAH 321260). Junto con la Universidad Autónoma de Chiapas en su convocatoria 2022 a proyectos nacionales de investigación e incidencia para una vivienda adecuada y acceso justo al hábitat (Torres, 2022), desarrollan proyectos con un enfoque sistémico de coparticipación comunitaria, los cuales contemplan tres etapas: 1) caracterización y realización de diagnósticos en las comunidades; 2) ejecución de casos pilotos; y, 3) evaluación de los casos pilotos y experiencias. Uno de los proyectos concebidos bajo este modelo es el realizado por los doctores Luis Arturo Vargas Robles, Edwin Israel Tovar Jiménez y Francisco José Martín del Campo Saray; el mismo considera dos comunidades como muestra, en las cuales se realizan entrevistas, levantamiento físico, fotográfico y se coloca un sensor en la vivienda, detectando problemáticas, solicitudes particulares e inquietudes (Vargas, 2022).

1.4 Objetivo

El objetivo del presente artículo es diseñar una vivienda con criterios bioclimáticos en el municipio de San Miguel Chicahua, como propuesta al modelo de Producción Social replicable de Vivienda y hábitat (PSVYH)-PRONAH 321260. Dicho Proyecto supone la utilización de materiales de la región, de elementos sustentables y con visión progresiva; siendo el enfoque primordial satisfacer las necesidades de la familia que la habitará y las del contexto en el que se encuentran.

Material es y métodos

2.1 Metodología

Para la obtención de información relativa al sitio de estudio, se aplicó una metodología etnográfica con enfoque cuantitativo-descriptivo; ésta sirvió para establecer contacto directo con la familia en cuestión y reunir información cuantificable mediante la observación y el estudio del comportamiento de los usuarios que posibilitó detallar descriptivamente las situaciones, eventos, personas, interacciones y comportamientos observables (Murillo, 2010).

Se realizaron levantamientos del sitio y fotográficos, se estudió el predio para conocer sus dimensiones y las de sus espacios, se analizaron las construcciones existentes, su diseño, orientación, materiales y se efectuó el monitoreo de temperaturas, humedad y velocidad del viento empleando equipo de monitoreo: cámara termográfica, estación meteorológica y Hobo. Así, se obtuvieron datos cuantificables de las condiciones climáticas del lugar que favorecen la planeación concreta de los aspectos bioclimáticos. Aunado a esto, la propuesta se plantea considerando la autoconstrucción asistida, progresividad, replicabilidad y sustentabilidad, que puedan ser aprendidos por los usuarios mediante la participación colaborativa y generar integración social de los habitantes y conocimiento en conjunto.

2.2 Estado actual de la vivienda

La vivienda se localiza en el municipio de San Miguel Chicahua, distrito Nochixtlán, en el estado de Oaxaca, aproximadamente a dos horas de la ciudad de Oaxaca. Allí, el clima predominante es templado subhúmedo. El acceso se da a través de la calle principal, Morelos, que da entrada al municipio.



FIGURA 1. Croquis de localización del predio en el municipio de San Miguel Chicahua, Oaxaca. NOTA: elaboración propia.

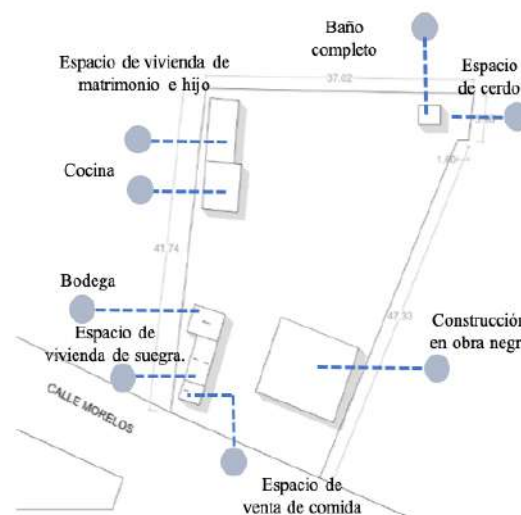


FIGURA 2. Planta de conjunto del predio en San Miguel Chicahua, Oaxaca. NOTA: elaboración-

En este predio de 1377.17 metros cuadrados vive una familia conformada por cuatro integrantes: tres adultos y un niño (esposo, esposa, hijo pequeño y suegra). Cuentan con distintos espacios ya construidos: cuatro de ellos con muros de tabicón cemento arena y losa de concreto armado en donde vive la familia, uno hecho de madera para su cocina, dos más de lámina en los que se encuentra una bodega y el espacio donde se cocina para la venta de alimentos. Además, existe un último espacio recientemente construido con tabicón cemento arena, que se mantiene en obra negra, en el que se prevé instalar locales comerciales.

Como se aprecia en la figura 2, las construcciones se localizan en los extremos del predio, manteniendo un espacio libre hacia el centro que utilizan como espacio de recreación y de fiestas familiares. En tanto los espacios de tabicón son pequeños, no presentan mayor riesgo de inestabilidad estructural, pero en relación con el diseño y la habitabilidad, las condiciones no son favorables: carecen de los espacios necesarios: la cocina y el comedor no están definidos, los materiales y la orientación de la vivienda no son los adecuados para brindar confort térmico, la orientación de vanos no permite la circulación del aire y la entrada de iluminación porque se encuentran ubicados sólo al este, no existen marquesinas o elementos que protejan del sol y de vientos, las dimensiones no son aptas para las actividades que realizan y los espacios son susceptibles a que tenga lugar la propagación de bacterias e insectos.

En las entrevistas realizadas a los integrantes de la familia, mencionan que su vivienda fue construida de forma empírica con apoyo de la fundación Ayú y sus propios recursos, con materiales que consiguieron de una comunidad cercana llamada El Fortín Alto.

En su granero tienen tres animales: cerdo, borrego y gallinas; el primero es el único que cuenta con un corral hecho a base de malla, los demás se mueven libremente por el predio.

Los desechos son recolectados en una fosa séptica. Cuenta con servicio de agua a través de la red municipal que llega al predio cada tercer día; una vez utilizada, ésta es direccionada hacia el jardín para su aprovechamiento. En cuanto a los servicios de electricidad cuentan con luz, televisión e internet, pero las señales son inestables y, si sucede algún fenómeno natural, puede perderse la señal por horas o hasta días. El espacio en el que cocinan para la familia utiliza leña y aquel en donde cocinan para la venta de alimentos emplea gas.

La familia comenta que a pesar de las carencias que saben que tienen, viven tranquilamente y se han ido acostumbrando a su forma de vida, les agrada estar en ese ambiente natural y mantener el contacto con el exterior tanto natural como con la sociedad con la que conviven.

2.4 Estudio bioclimático

Se realizaron tres visitas al predio, la primera el 3 de noviembre de 2022, la segunda el 23 de marzo de 2023 y la tercera el 13 de julio de 2023. En dichas visitas se recabaron datos climatológicos, con la finalidad de analizar el sitio y las condiciones ambientales.

Para el estudio termográfico se utilizó una cámara termográfica Fluke FLK-Ti400 9Hz; para la obtención de temperaturas en el interior de la vivienda se colocaron HOBOS data logger temp RH2 ext channels; la información recabada se almacenó en el *software* hobo ware. La velocidad del viento fue detectada con una estación meteorológica portátil Thermo-Anemometer with Light. A partir de estas herramientas se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 1.

Datos obtenidos por estación meteorológica Thermo-Anemometer with Light.

Humedad	23.2	Temperatura	29.6°C
Dewpoint	3.3°	Wetbuld	13.5

Las siguientes imágenes muestran la temperatura marcada por la cámara termográfica en la construcción que permanece en obra negra. La figura 3 muestra que la temperatura es de 63.1°F, que en grados Celsius corresponde a 17.27°C.; mientras que en el exterior la temperatura marcada es de 59.9° F, es decir, 15.5°C.

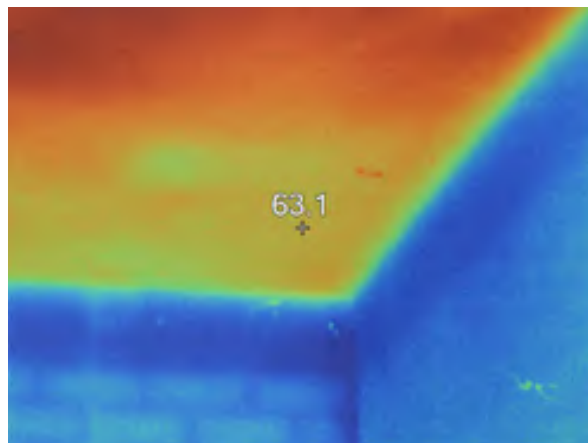


FIGURA 3. Temperatura marcada por cámara termográfica en losa de la edificación.

NOTA: fotografía tomada por el autor.



FIGURA 4. Temperatura marcada por cámara termográfica en losa de la edificación.

NOTA: fotografía tomada por el autor.

En la visita del día 13 de julio de 2023 se tomaron datos climáticos con la estación meteorológica, obteniéndose los siguientes datos:

Tabla 2.

Datos de estación meteorológica

Temperatura	26°C
Humedad	40.8
Dewpoint	4.8°

2.5 Asoleamiento y vientos dominantes

2.5.1 Asoleamiento

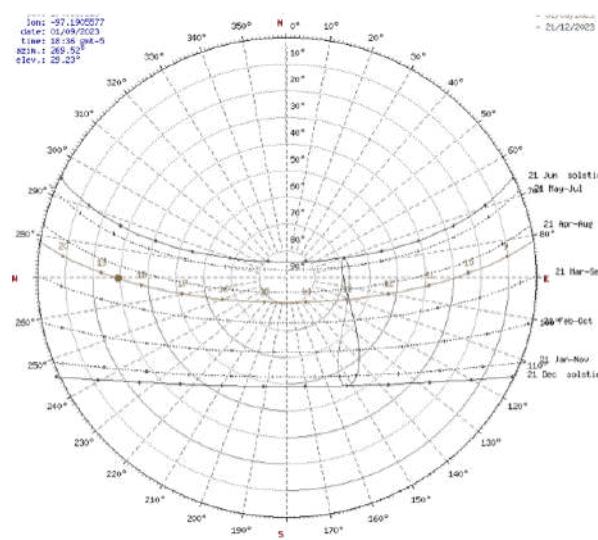


FIGURA 5. Recorrido del sol en el predio mediante la aplicación de sunearthtools. NOTA: elaboración propia.

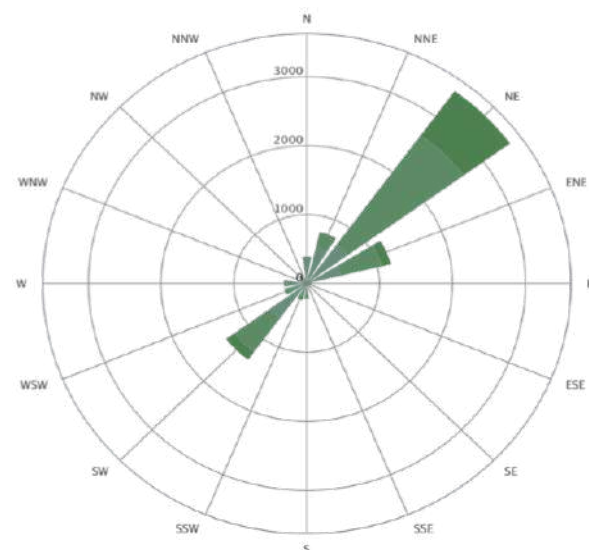


FIGURA 6. Rosa de los vientos para San Miguel Chicahua por medio de la aplicación Meteoblue. NOTA: Elaboración propia.

El predio se encuentra orientado hacia el norte, por lo que su acceso se mantiene en el lado sur, por la calle principal Morelos.

Como se señaló anteriormente, la mayoría de los accesos y vanos de la vivienda se orientan hacia el este, con excepción de los locales recientemente construidos cuyos vanos se orientan hacia el norte y el sur. Ninguno de los espacios cuenta

con barreras para el sol o los vientos; las marquesinas son pequeñas y la vegetación, celosías, volados u otros elementos de proyección del sol son casi inexistentes, provocando que en las épocas de temperaturas altas los interiores mantengan el calor acumulado.

2.5.2 Vientos dominantes

En el predio los vientos circulan en distintas direcciones, pero los predominantes viajan del lado noreste, como lo indica la rosa de los vientos en la figura 6; ésta muestra el número de horas al año que el viento sopla con más o menos velocidad.

Al sólo existir ventanas en orientación este, los vientos acceden a los espacios casi directamente, pero no cuentan con una salida que permita la circulación constante del aire y evite la permanencia de olores incómodos y de las altas temperaturas que se registran en verano, principalmente a la hora del mediodía.

2.6 Normativa

El proyecto se registrará bajo la normativa decretada en el reglamento de construcción del estado de Oaxaca (Oaxaca, s. f.), ya que San Miguel Chicahua no cuenta con bases y leyes que sustenten las construcciones de sus pobladores.

En dicho reglamento se señala que en pasillos y vestíbulos las dimensiones no pueden ser menores a 0.90 metros, con una altura máxima de 2.5 metros en estos espacios. Respecto a las entradas de iluminación y ventilación debe haber entradas naturales; para lograr una buena iluminación, la dimensión de las ventanas debe ser equivalente, por lo menos, a la quinta parte de la superficie del piso de la habitación y para ventilar será cuando menos una tercera parte de la superficie mínima de iluminación. De igual manera, los patios y áreas libres deben contar con un mínimo de seis metros cuadrados.

Los locales destinados a la atención al público deberán contar con accesos de mínimo 1.20 metros de ancho y tener contacto directo con las salidas del mismo en caso de que se presente alguna contingencia o sea necesario realizar una evacuación de emergencia.

3. Resultados

3.1 Planificación de la propuesta

3.1.1 Programa de necesidades

En la investigación de campo realizada se identificaron las carencias que la vivienda y los usuarios mantienen, por lo que la propuesta aborda los aspectos de diseño, orientación, ventilación, iluminación y espacios de acuerdo con las necesidades de los habitantes del predio, contemplando siete zonas que serán destinadas a la vivienda y los públicos de atención a clientes.

ESTACIONAMIENTO		ZONA SOCIAL		ZONA SOCIAL DE VIVIENDA			
• Público • Privado	• Patio/jardín • Bodega • Cocina exterior	• Sala • Comedor					
ZONA DE SERVICIOS DE VIVIENDA		ZONA DE CORRALES		ZONA COMERCIAL		ZONA PRIVADA DE VIVIENDA	
• Cocina • Área de servicios • Baño	• Borrego • Cerdo • Gallinas • Bodega	• Local/comedor • Locales comerciales	• Habitación 1 • Habitación 2 • Habitación 3				

3.1.2 Propuesta

En la propuesta se opta por mantener tres de los cuatro espacios ya construidos en el predio. La construcción más actual será destinada a dos locales comerciales y uno más para los comensales que atiendan.

El espacio que actualmente funge como dormitorio del matrimonio y su hijo se modificará, transformándose en dos bodegas, una para materiales y herramientas de la familia y otra para los insumos y herramientas de los animales.

El baño completo se mantendrá en su totalidad y será destinado al uso por invitados a fiestas familiares.

El espacio en donde habita la señora será demolido con la finalidad de proporcionar mayor espacio de circulación a la vivienda.

Los demás espacios mostrados en la lista de necesidades se realizan en una nueva propuesta, que contempla las condiciones del lugar y las necesidades de la familia. Véase figura 7.

Los locales comerciales anteriormente descritos tienen acceso directo desde la calle, contando con estacionamiento para los visitantes.

El acceso peatonal y vehicular hacia la vivienda se realizará por el lado suroeste, donde se encuentra un estacionamiento destinado a los habitantes y familiares o, en caso de festejos o de abastecimiento de la tienda comedor, a camiones de carga y descarga.

Se encuentra una cocina exterior destinada a la preparación de alimentos para el negocio de comida, que también funciona para los festejos familiares.

La vivienda se ubica en el lado oeste del predio y contempla la sala, el comedor, la cocina, tres recámaras, un baño y un patio de servicio.

El acceso principal a la vivienda se da a través de un vestíbulo que funciona como elemento divisorio

entre el espacio público y el espacio privado; a través de un pasillo que conecta a las recámaras, éste permite la salida al patio exterior del predio, lo que asegura el mantenimiento de la conexión con la naturaleza, pero también aísla el espacio interior si así se requiere.

Se contempló que el patio principal del predio fuera amplio, para permitir la recreación de los habitantes y su utilización en festejos familiares y de la comunidad.

Las bodegas se mantuvieron aisladas en el extremo noroeste.

Los corrales de los animales se encuentran alejados del resto de la vivienda, con el fin de disminuir la propagación directa de malos olores y bacterias que los animales y sus desechos expulsan.

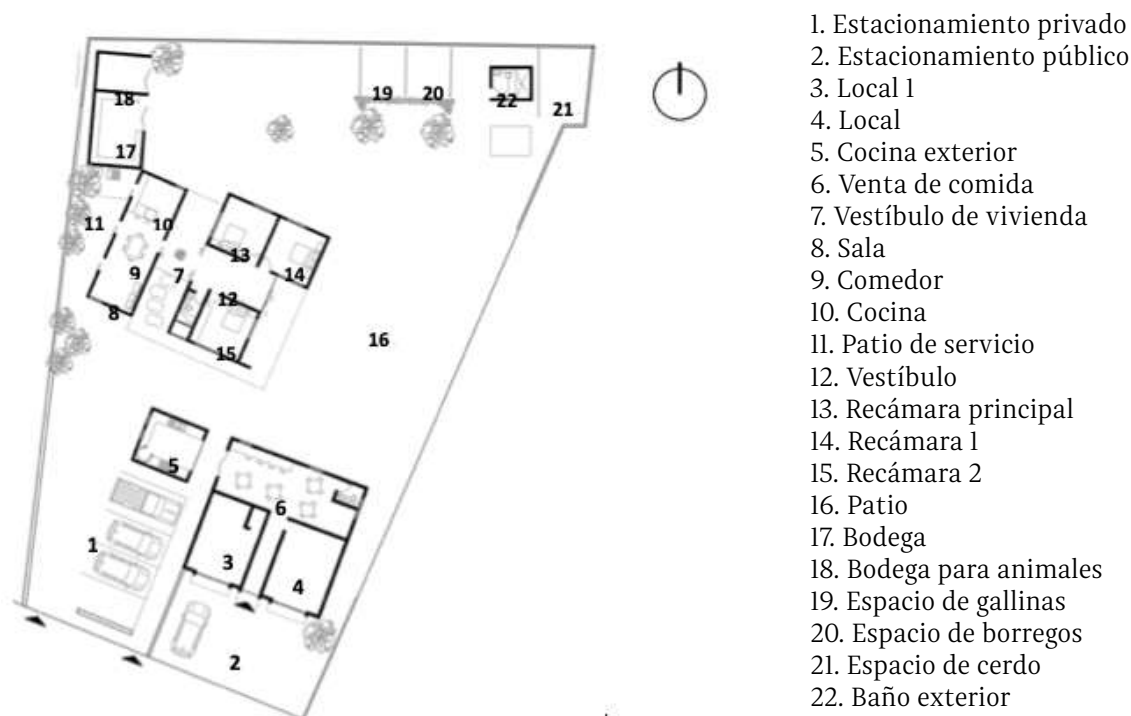


FIGURA 7. Planta arquitectónica de propuesta de vivienda. NOTA: elaboración propia.

3.2 Criterios de habitabilidad y diseño de la vivienda

CA través de la arquitectura bioclimática se pretende utilizar recursos como el clima, la orientación de la vivienda, los vientos dominantes y los materiales naturales presentes en la comunidad para proveer a la familia de una vivienda con confort térmico, calidad de aire, servicios básicos sustentables y mantenimiento posterior con menor gasto económico, apostando siempre a la autosustentabilidad. Así, se plantean los siguientes aspectos como fundamentales en la planeación de la propuesta.

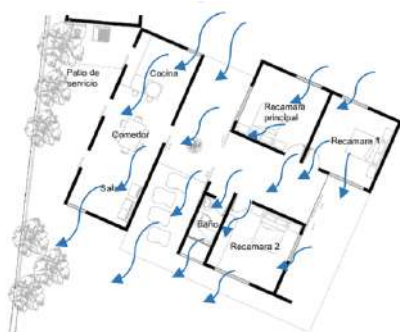


Figura 8. Corrientes de aire en la vivienda para la familia. NOTA: elaboración propia

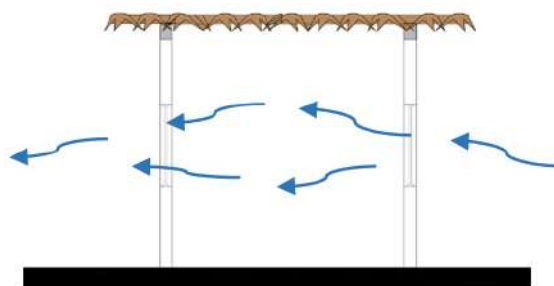


Figura 9. Corrientes de aire en el interior de los espacios. NOTA: elaboración propia

3.2.1 Ventilación

La ventilación natural provee de espacios con confort adecuado, porque no se almacenan olores incómodos ni temperaturas altas; además, contribuye a la sustentabilidad debido al ahorro energético que se genera al disminuir el uso de ventilación activa, como aires acondicionados o ventiladores.

En la propuesta, como la vivienda está rotada 66° y es paralela al límite del predio del lado este, recibe los vientos dominantes por el lado noreste, lugar hacia donde fueron orientados los vanos de ventanas y puertas; de esta manera, mediante la ventilación cruzada se permite que las corrientes de aire accedan por estas ventanas y salgan por el lado oeste y noroeste. Los vanos del lado noreste poseen dimensiones más pequeñas que los de salida del aire, ya que, de acuerdo con el *Manual de ventanas: una guía paso a paso* (2003), de cumplirse estas condicionantes, los vientos correrán más rápidamente por el espacio interior y, en consecuencia, saldrán más rápido de éste. Los vanos de las habitaciones se mantienen centrados en el muro, ocupando menos de 30% del mismo. Su ubicación contribuye al acceso y la salida de aire centralizado. Véase figura 9.

3.2.2 Iluminación

La orientación de la vivienda y la ubicación de los vanos permite la iluminación directa de las habitaciones durante las mañanas, por la ubicación de éstas hacia el este; por las tardes, la entrada de luz solar ocurre en las ventanas orientadas al sur.

Se contempla también la presencia de marquesinas en los lados sureste y sur, cuyo objetivo es disminuir la incidencia solar, así como la presencia de vegetación en el lado oeste que contribuya a la protección en el área de lavado, pero permitiendo la entrada de rayos solares y de viento a la sala, comedor y cocina y refrescar o calentar el espacio.

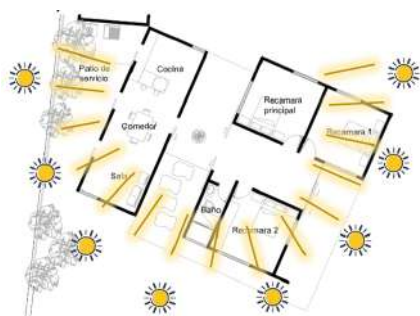


Figura 10. Dirección del sol en la vivienda diseñada para la familia. NOTA: elaboración propia.

3.2.3 Materiales

Locales comerciales/Bodegas/Baño. Puesto que estos espacios ya han sido construidos, se les darán acabados de tierra con cal, para mantener estéticamente la colorimetría y aportar internamente a la termicidad de los locales. La combinación de estos dos materiales genera una alta eficiencia térmica, que aprovecha de manera racional los recursos naturales y tiene bajo impacto sobre el ambiente. Por otra parte, la cal posee partículas cristalográficas de pequeñas dimensiones, las cuales son susceptibles de penetrar en los minerales arcillosos y ocupan los lugares donde suelen estar las moléculas de agua, con lo que se evitan cambios volumétricos en las arcillas, se mejora su adherencia y se eleva su resistencia mecánica a diferentes solicitaciones (Guerrero, Soria y García, septiembre de 2010).

Corrales de animales. Los espacios destinados a los animales serán hechos con tablas de madera reciclada y troncos recolectados que se mimeticen con el ambiente natural, asegurando que perduren con el tiempo y sean funcionales.

Vivienda/Cocina exterior. Para su construcción se propone el uso de tabique rojo en la totalidad de los muros; este material posee propiedades térmicas que contribuyen a mantener la vivienda fresca en temporadas calurosas y cálida en temporadas de frío.

El volumen predominante de la vivienda está dado por la sala, el comedor y la cocina, que tendrán doble altura. Esta dimensión de la altura da lugar a la sensación de un espacio más abierto y libre, a pesar de contar con ventanas al 30% de los muros. La cubierta de este volumen será de bóveda de cañón corrido, dándole continuidad al mismo material de los muros.

Las cubiertas del vestíbulo, pasillo y recámaras se realizarán con pendiente del 3°, a partir de un sistema tipo sándwich como sustituto de la losa de concreto reforzado convencional. Contará con un plafón de madera, sobre el cual se colocará un nailon que evite el traspaso de agua, un terado elaborado a base de tierra con paja de cinco centímetros que actúa como aislante y, finalmente, teja, para retrasar la incidencia solar y mantener el ambiente mucho más fresco.

Los acabados en muros serán los que brinden los tabiques rojos colocados, para mantener la naturalidad y estética del material.

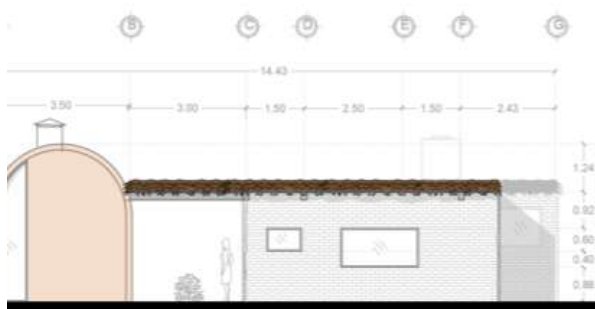


FIGURA 11. Fachada sur de vivienda. NOTA: elaboración propia.

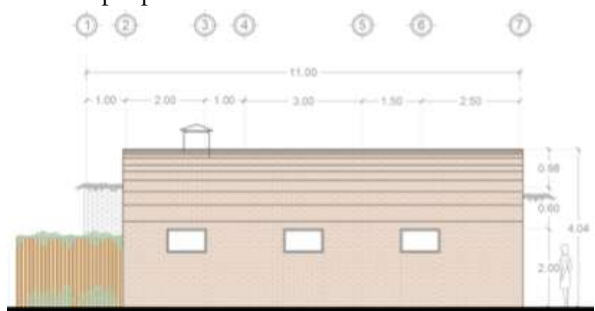


FIGURA 12. Fachada oeste de vivienda. NOTA: elaboración propia.

3.2.4 Autoconstrucción asistida

La distribución de los espacios se planteó de la manera señalada para que fuera más entendible para los habitantes, estandarizando medidas de recámaras, creando un solo volumen para sala, comedor y cocina, y un vestíbulo que, a través de un pasillo, conecta a todos los espacios y con el exterior. De igual manera, se contemplan los sistemas constructivos antes mencionados, para que a través de la participación colaborativa los usuarios tengan un mejor entendimiento, aprendizaje y colaboración.

3.2.5 Vivienda social y progresiva

El Modelo de Producción Social Replicable de Vivienda y Hábitat pretende que la vivienda sea diseñada exclusivamente para las necesidades de la familia y del lugar en que se encuentra, ya que ningún sitio será igual ni mucho menos los ocupantes. Por tal motivo, la vivienda responde a esas necesidades y a su posterior crecimiento hacia los lados o hacia arriba, adaptándose a los nuevos modos de vida futuros.

3.2.6. Desarrollo sustentable

Se contempla implementar la sustentabilidad, con la finalidad de contribuir al cuidado del medio ambiente y hacer de la vivienda un espacio autosustentable. Una propuesta realizada con este objetivo es el prototipo de vivienda social progresiva, flexible y sostenible, para habitantes de la zona rural de Bochalema, en el norte de Santander, elaborada por José Alejandro Velandia Barahona, de la Universidad la Gran Colombia. Dentro de sus vertientes, esta propuesta implementa la acuaponía para aprovechar el agua de lluvia y en aras de contribuir a la sustentabilidad plantea lo siguiente:

Uso de materiales de la región provenientes de la naturaleza, limitando el uso de prefabricados.

Ventilación e iluminación natural que disminuya el uso de iluminación artificial en el día y de ventilación activa que genere un gasto energético mucho mayor.

Sistema de captación de aguas pluviales para su utilización en riego de cultivos, jardín y uso doméstico.

Biodigestor para recolección y tratamiento de desechos fecales. Con este procedimiento se puede eliminar hasta 95% de los residuos, con lo que se minimiza considerablemente su impacto en el medio ambiente. Su costo es algo elevado en comparación con el de una fosa séptica, pero sus beneficios son mayores porque no requiere mantenimiento continuo; en tanto elimina la mayor cantidad de desechos, su vaciado puede realizarse cada dos o tres años.

Dotación de energía eléctrica por medio de paneles solares instalados en las azoteas, lo que permite evitar las fallas eléctricas de la red municipal y ahorrar gastos económicos.

Instalación de estufa ecológica que ahorra hasta 70% de leña y en 15 minutos alcanza 400°C, pudiendo mantener el calor durante tres horas más una vez apagada. Su diseño permite que el calor no se escape y sea transferido al comal, por tener una estructura de metal, cemento y un recubrimiento de madera que sirve como aislante. Este tipo de estufas, como menciona el doctor Moreira Acosta, director del Centro de Investigación en Desarrollo Tecnológico en Energías Renovables (CIDTER) de la Unicach (Hidalgo, 2017), evita el daño a la salud ocasionado por el uso de leña en las comunidades rurales, ya que disminuye la emisión de monóxido de carbono.

4. Conclusiones

La aportación del modelo presentado radica en la planeación específica de cada espacio, sistema constructivo y servicio; además, promueve su replicabilidad, al cumplir con características que permiten conocer los datos reales de un lugar y brindar a la familia un lugar con habitabilidad que evolucione con ellos mismos y mejore su calidad de vida:

Cumplir con un enfoque metodológico etnográfico: gracias a las visitas de campo al sitio de emplazamiento de la propuesta fue posible conocer a la familia beneficiaria de la misma y las necesidades presentes en su vivienda. La aplicación de estudios etnográficos es de gran importancia para la investigación, análisis y planteamiento de la propuesta, porque implica un aprendizaje consciente y prudente del ocupante y su alrededor; además, permite tener contacto directo con la familia, sin invadir su espacio privado.

Análisis de sitio: se realiza un estudio del predio y sus características para conocer las temperaturas, humedad y vientos dominantes que influyen directamente en la propuesta, así como las dimensiones y materiales de lo ya construido, para determinar lo que debe demolerse y recuperarse y no generar mayor contaminación por escombros.

Autoconstrucción: se permite la adaptabilidad a la vivienda, porque la autoconstrucción impulsa a los pobladores a tener contacto directo con la planeación y construcción de la misma, lo que crea un sentido de pertenencia y le permite contar con espacios en función de sus necesidades y manteniendo la conexión con la naturaleza por medio de vestíbulos centrales, pudiéndose cerrar o abrir al exterior.

Sustentabilidad: se obtiene así una vivienda con materiales de origen natural, ventilación e iluminación natural, orientación respecto a la posición del sol y los vientos, colocación de vegetación y dotación de servicios utilizando los recursos del entorno natural; apostando a ser una vivienda autosustentable.

Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías Conahcyt, al proyecto PRONAH 321260 de doctor Raúl Pavel Ruiz Torres, al Cuerpo Académico “Tecnología y Sustentabilidad” de la UABJO a cargo de la doctora Heidý Gómez Barranco.

Referencias

- Ascencio, O., Jerónimo Vargas, C., García, M. A., y Romero, F. J. (2013). *El proceso de transformación de la vivienda vernácula en la región Centro de Guerrero*. Chilpancingo: Universidad Autónoma de Guerrero.
- Gómez-Obregón T. A. (2021, abril 16). *Fundarqmx*. Obtenido de <https://www.fundarqmx.org/post/la-vivienda-en-m%C3%A9xico-introducci%C3%B3n>
- Comunal, T. (2020, mayo 17). *Manual de autoconstrucción*. Obtenido de Comunal: <https://www.comunaltaller.com/post/manual-de-autoconstrucci%C3%B3n>
- Conforme, G. y Castro, J. L. (2020, marzo). “Arquitectura bioclimática”. *Polo del conocimiento*, 5(3), 751-779. Obtenido de *Arquitectura bioclimática*: <file:///D:/Descargas/Dialnet-ArquitecturaBioclimática-7398396.pdf>
- DRAE (2001). *Diccionario de la Real Academia Española*. Obtenido de <https://www.rae.es/drae2001/etnograf%C3%ADa>
- Fernández, G. (s. f.). “La producción social del hábitat: reflexiones sobre su historia, concepciones y propuestas”, *HIC-AL*. Obtenido de https://hic-al.org/wp-content/uploads/2019/01/Texto_Gustavo.pdf
- Gobierno de México (2023). *Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social 2023*. Obtenido de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/794241/20264-SanMiguelChichahua23.pdf>
- Gobierno del Estado de Oaxaca (s. f.). *Reglamento de construcción y seguridad estructural para el estado de Oaxaca*. Obtenido de <https://www.oaxaca.gob.mx/sinfra/wp-content/uploads/sites/14/2023/03/REGLAMENTO-DE-CONSTRUCCIONES-DEL-ESTADO-DE-OAXACA.pdf>
- Gómez Barranco, H. (2023). *Estudio de habitabilidad para la incidencia al hábitat*. OAXACA: UABJO.
- Guerrero, L. F., Soria, J., y García, B. (2010, septiembre). “La cal en el diseño y conservación de arquitectura de tierra”. En Guerrero, L. F., Soria, J., y García, B., *La arquitectura construida en tierra* (pp. 177-186). Valladolid: Cátedra Juan de Villanueva-Universidad de Valladolid.
- C. Jerónimo. (2022). *Ibero León*. Obtenido de Ibero León.
- Murillo, F. J. y Martínez, Ch. (2010). *Investigación etnográfica*. Obtenido de *Investigación etnográfica*. Madrid UAM: https://gc.scalahed.com/recursos/files/r16lr/w24243w/I_Etnografica_Trabajo.pdf
- Hidalgo, U. A. (2017, julio 21). “Investigadores chiapanecos crean estufa ecológica móvil que ahorra 70 % de leña”. Observatorio Tecnológico de Hidalgo, Obtenido de <https://otech.uaeh.edu.mx/noti/index.php/verde/investigadores-chiapanecos-crean-estufa-ecologica-movil-que-ahorra-70-de-lena/>
- METEOBLUE. (2023). “Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para San Miguel Chichahua”. Meteoblue. Obtenido de https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/san-miguel-chichahua_m%C3%A9xico_3800981
- El Bien Social* (2021, junio 23). “Mutuo”. *El Bien Social*. Obtenido de https://elbiensocial.org/acadp_listings/https-elbiensocial-org-es-listing-mutuo-vivienda-digna/
- Torres, D. R. (2022). *Desarrollo de un modelo de producción social replicable de vivienda y hábitat*. Obtenido de *Desarrollo de un modelo de producción social replicable de vivienda y hábitat*: file:///C:/Users/charq/Downloads/321260_propuesta.pdf
- Vázquez, J. (2010, septiembre). “Edificio Ermita”. *Casa del Tiempo*, IV(35), 21-24. Obtenido de https://www.uam.mx/difusion/casadeltiempo/35_iv_sep_2010/casa_del_tiempo_eIV_num35_21_24.pdf

Derechos de Autor© 2023 Santiago Matías, Nancy, Gómez Barranco, Heidy, Ruiz Torres, Raúl Pavel



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

Análisis del uso del agua superficial y subterránea de la Región Hidrológica Administrativa XIII Aguas Del Valle De México

Eje temático: Cambio climático y sus efectos sociales

María Josefa Jiménez Moreno¹, Luis Daniel Magadán-Revelo², María Ornella Ortiz-Rodríguez³ DOI: 10.56643/rcia.v2i2.170

*Autor de correspondencia

Resumen

El agua es un elemento fundamental para la existencia de vida en el planeta y, por ende, para la preservación de la humanidad. El objetivo del presente estudio fue analizar la distribución del uso del agua superficial y subterránea de la Región Hidrológica Administrativa XIII del organismo Cuenca Aguas del Valle de México. El proceso metodológico utilizado tuvo un enfoque cuantitativo y empleó información estadística del Registro Público de Derechos de Agua. Se generaron dos mapas de la distribución de los usos del agua superficial y subterránea, en los que se consideraron los siguientes usos: agrícola, doméstico, electricidad, industrial, pecuario, público urbano, servicios, termoeléctrica, etc. Los resultados indican que 38.45% de las aguas superficiales se destinan al uso agrícola y 36.72% al uso público urbano. En cuanto al agua subterránea, 38.57% es dirigida al uso público urbano, 22.57% al uso agrícola y 16.61% al uso industrial. La categoría diferentes usos concentra 10.09% del agua superficial y 13.01% del agua subterránea, lo que hace necesario determinar su clasificación, ya que representa 23.19% del agua; esto equivale a 3013620526.651 metros cúbicos.

Palabras clave: agua superficial, agua subterránea (Tesaurus); uso público urbano, uso agrícola y uso industrial (palabras claves del autor).

Abstract

Water is a fundamental element for the existence of life on the planet, as well as for the preservation of human life. The objective of this study was to analyze the distribution of surface and groundwater use in the Administrative Hydrological Region XIII of the Aguas del Valle de México Basin organization. The methodological process used was a quantitative approach, with statistical information from the Public Registry of Water Rights, two maps were generated on the distribution of the uses of surface and groundwater with the uses of water: agricultural, domestic, electricity, industrial, livestock, urban public, services, thermoelectric, etc. The results indicated that surface waters represent 38.45% of the water intended for agricultural use and 36.72% for urban public use, as for groundwater, 38.57% is for urban public use, 22.57% for agricultural use and 16.61% for industrial use. In the category of different uses, 10.09% of surface water and 13.01% are concentrated in groundwater, which is why it is necessary to determine its classification since it represents 23.19% of the water, which is equivalent to 3,013,620,526,651 m³.

Keywords: Surface, groundwater (Tesaurus); urban public use, agricultural use and industrial use (author's keywords).

Cómo citar este artículo: Jiménez-Moreno, M. J., Magadán-Revelo, L. D., Ortiz-Rodríguez, M. O. (2024) Análisis del uso del agua superficial y subterránea de la Región Hidrológica Administrativa XIII Aguas Del Valle De México. *Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura*. 2(2). 32-51. DOI: <https://doi.org/10.56643/rcia.v2i2.170>

Introducción

El agua es un elemento fundamental y necesario para la existencia de vida en el planeta y, por ende, para la preservación de la humanidad. Constituye un recurso vital no sustituible e irremplazable (López Santiago y Ortiz Lazalde, 2023; Rolland y Vega, 2010). En este sentido, se considera un bien público determinante para el bienestar social, económico y ambiental de las comunidades (Pedrozo Acuña, 2022). El acceso al agua de forma continua y salubre es un derecho reconocido por la Asamblea de la Organización de Naciones Unidas desde el año 2010, en el Objetivo 6 del Desarrollo Sostenible (ONU, 2022), por lo que la disponibilidad del agua, tanto para el consumo humano como productivo, se ha convertido en un tema estratégico para el desarrollo del ser humano (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la

¹Investigadora por México, Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahacyt). México. Líneas de investigación: recursos naturales, educación ambiental, paisaje, cambio de uso del suelo y sistemas de información geográfica. orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4410-4699>. Correo electrónico: jimory6@gmail.com.

² Doctor en Desarrollo Rural. Posgrado en Estudios para el Desarrollo Rural, Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, México. Líneas de investigación: cooperativismo, socioecosistemas marinos, pesquería artesanal. orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6259-4367>. Correo electrónico: magadan.luis@colpos.mx.

³Investigadora por México, Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahacyt). México. Líneas de investigación: demografía de los hogares, mercados urbanos de trabajo, desigualdad, y población joven. orcid: <https://orcid.org/0000-0002-659210-9086>. Correo electrónico: ornella.ortiz.rodriguez@gmail.com. Recibido: 21/11/23 | Aceptado: 09/12/23 | Publicado: 20/12/2023

Soberanía Alimentaria [Cedrassa], 2014).

Del total de agua dulce disponible a nivel mundial, 70% se destina actividades agrícolas, 19% se orienta a la industria y el restante 11% al abastecimiento público. Esta distribución cambia en cada continente o país, lo que responde a las actividades de la población y está condicionado por la proporción de la misma que habita en los ámbitos rural y urbano (FAO, 2023). Sea en pequeñas comunidades o en grandes aglomeraciones de población, los seres humanos utilizan agua para el desarrollo de sus actividades, las cuales, a diferencia de lo que ocurre en otras especies, son más diversas (Sheridan Prieto y Cerutti, 2015). Es decir, además de realizar actividades que les permiten subsistir —como la ganadería y la agricultura—, los seres humanos llevan a cabo otras funciones. El crecimiento urbano-industrial es un factor importante que ha provocado el aumento de los requerimientos de agua en las últimas décadas (Durán y Torres, 2006).

Un porcentaje mayoritario de la población de México —80%— es predominantemente urbano (INEGI, 2022a). En lo que respecta al uso dado al agua, 75% es agropecuario, mientras que 15% se destina al abastecimiento público —que contempla actividades domésticas—, 5.2% a la industria y 4.4% a la generación de energía eléctrica (Conagua, 2022a; 2022b). En este contexto, es relevante analizar el uso del agua en la Región Hidrológica Administrativa (RHA) XIII del organismo Cuenca Aguas del Valle de México, debido a que allí habita uno de cada cinco mexicanos; la población de esta región (23681797 habitantes) representa casi 19% de la población nacional (126014024 habitantes) (Conagua, 2022b; INEGI, 2022b).

Esto convierte a la rha XIII en un punto estratégico a nivel nacional, dada su relevancia ambiental, demográfica, social y económica. Su área de influencia abarca una superficie de 16456.3 kilómetros cuadrados, e incluye las siguientes entidades federativas: Ciudad de México, Estado de México, Hidalgo y Tlaxcala. Por ende, analizar la distribución del uso del agua superficial y subterránea en esta región es fundamental para la planeación hacia el futuro del incremento de la demanda de agua y el crecimiento de la población, enfocándose principalmente en el acceso al agua para consumo, una de las principales problemáticas sociales, territoriales y ambientales presentes en la rha XIII.

Antecedentes de la problemática en los usos del agua

En los últimos años se han registrado declives importantes en la disponibilidad hídrica a nivel nacional, siendo justamente el centro del país una de las zonas más impactadas. La principal causa que provoca esta situación es la falta de un ordenamiento hídrico-territorial, lo que ha posibilitado el establecimiento de todo tipo de actividades en zonas donde la disponibilidad hídrica es limitada (Breña Naranjo, 2023; Ríos, 2023).

En México, la sobreexplotación y contaminación de los recursos hídricos ha generado conflictos y escasez de agua, afectando de manera significativa a los estados de Baja California Sur, Nuevo León y Ciudad de México. Así, el problema de escasez de agua se ha ido agravando, al grado de que las demandas del recurso surgen a tasas crecientes y, en algunos casos, comienzan a manifestarse de manera violenta (Becerra et al., 2006; Ríos, 2023; Serendipia, 2023).

La disponibilidad anual de agua por habitante en México ha pasado de 10000 metros cúbicos (m³) promedio en 1960 a 4000 m³ en 2000 y 3200 m³ en 2020 (IMCO, 2023a). Respecto a la Cuenca del Valle de México, una de las áreas más pobladas del país, donde se concentran más de 22 millones de habitantes y se genera 22% del Producto Interno Bruto nacional (Peña Díaz, 2019), el uso eficiente, la gestión efectiva y la conservación de los recursos hídricos operan como factores determinantes para el desarrollo social y económico (González Villarreal et al., 2022).

Durante cuatro siglos, las obras de drenaje, evacuación de aguas negras y pluviales, así como las infraestructuras de trasvase de agua para abastecer a la Ciudad de México, modificaron la condición natural cerrada de la cuenca denominada Valle de México y desde mediados del siglo xx también de la Zona Metropolitana del Valle de México (González Reynoso, 2018). Este estudio se enfocó en la RHA XIII, ya que integra la Cuenca de México, el Valle de México y la Zona Metropolitana del Valle de México (Conagua, 2020).

La gestión del agua como bien público presenta una gran complejidad cuando se aborda desde una perspectiva de cuenca y territorio (Alonso, 2019), aspectos importantes en la gestión hídrica. Por ello, para el estudio del uso del agua en la Cuenca y Valle de México, es fundamental considerar la RHA XIII como unidad geográfica y territorial.

Materiales y métodos

Ubicación de la zona de estudio

La Región Hidrológica Administrativa (RHA) XIII Aguas del Valle de México se localiza en la región hidrológica del Pánuco en la Ciudad de México (13.79%) y en los estados de Hidalgo (33.62%), México (49.14) y Tlaxcala (3.45%). Éstos son conformados por 116 municipios (figura 1) (Conagua, 2022b; 2023a). Dicha zona se encuentra integrada por 15 acuíferos: Zona Metropolitana del Valle de México, Chalco-Amecameca, Cuautitlán-Pachuca, Texcoco, Tepeji del Río, Polotitlán, Soltepec, Apan Tecocomulco, Valle del Mezquital, Ajacuba, Chapatongo-Alfajayucan, Ixmiquilpan, Actopan-Santiago de Anaya y Amajac. Según la Conagua (2023b), seis de estos acuíferos (Zona Metropolitana del Valle de México, Chalco-Amecameca, Cuautitlán-Pachuca, Texcoco, Tepeji del Río, Polotitlán) presentan déficit del recurso, registrándose una disponibilidad media anual negativa.

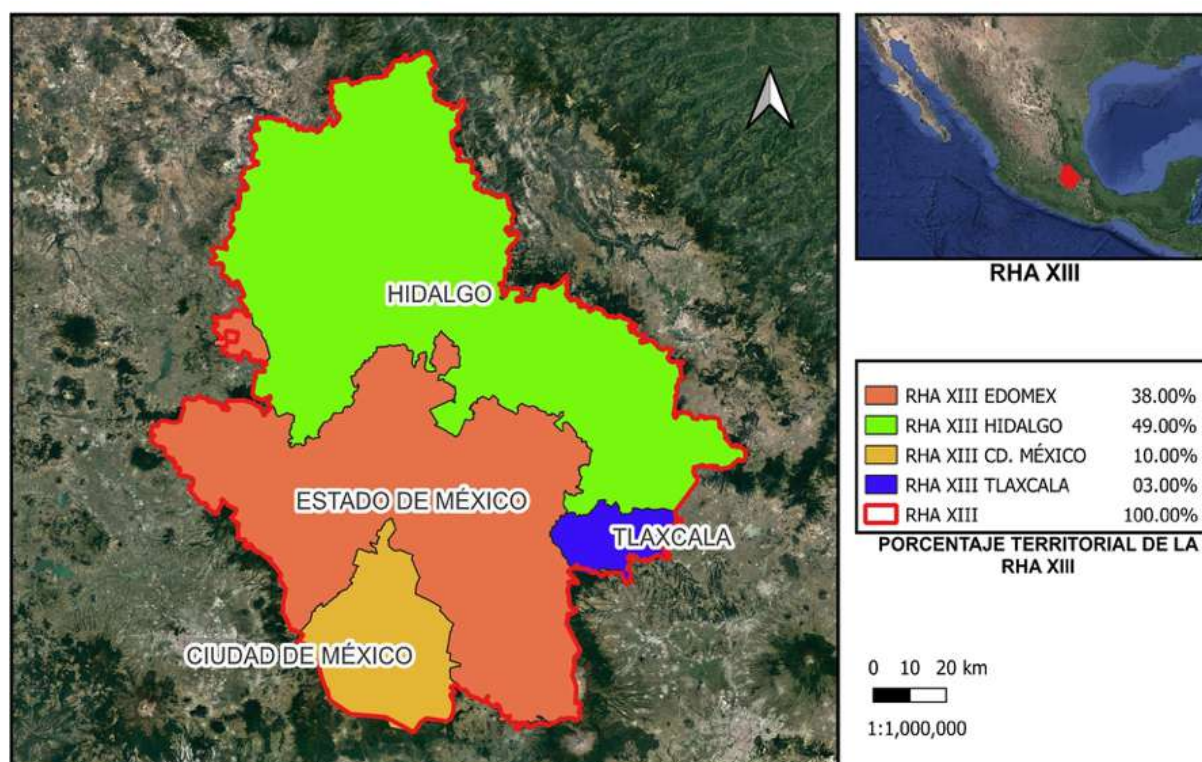


Figura 1
Ubicación de la Región Hidrológica Administrativa XII

Nota: Información tomada de Conagua (2023a) y Conabio (2023).

Proceso metodológico

El proceso metodológico utilizado tiene un enfoque cuantitativo y cualitativo, mediante el análisis de información estadística considerando variables cuantitativas y cualitativas. Para describir el comportamiento de las variables estudiadas se usó la técnica de análisis de contenido, considerando los usos del agua de la RHA XIII, de las variables cuantitativas que describen la clasificación de los usos de agua —agrícola, doméstico, electricidad, industrial, pecuario, público urbano, servicios, termoeléctrica, etcétera—.

Primero se realizó un análisis descriptivo de la población de la RHA XIII Aguas del Valle de México, identificándose la densidad de población de las entidades federativas involucradas en la zona de estudio. Posteriormente se analizó la información del Registro Público de Derechos del Agua (REPDa) del año 2021. Con el *software* QGIS (QGIS Development Team, 2023) se importaron las coordenadas de los usuarios, empleando herramientas de análisis geoespacial. Después, se seleccionaron y clasificaron los usos del agua conforme el REPDa 2021, con el propósito de generar el mapa de distribución de los usos del agua. El REPDa clasifica los usos del agua en: agrícola, doméstico, electricidad, industrial, pecuario, público urbano, servicios, termoeléctrica y diferentes usos (Conagua, 2021).

Resultados

(RCIA) | vol. 2(2)|diciembre 2023

Población total de la RHA XIII

La República Mexicana cuenta con una población total de 126014024 (INEGI, 2022a), mientras que la RHA XIII Aguas del Valle de México tiene una población total de 23578290 habitantes. De éstos, 52.5% se concentran en el Estado de México, 39.1% en la Ciudad de México, 8.1% en Hidalgo y 0.4% en Tlaxcala (tabla 1).

Tabla 1
Población total de la RHA XIII Aguas del Valle de México

Entidad Federativa	Población total	Porcentaje (%)
Ciudad de México	9209944.0	39.0
Estado de México	12384365.0	52.5
Hidalgo	1899110.0	8.1
Tlaxcala	85501.0	0.4
Total	23578920.0	100.0

Nota: Censo de Población y Vivienda 2020 (INEGI, 2022a).

Densidad de la población

Los datos de la población de la RHA XIII y de la superficie que ocupa, 16456.3 kilómetros cuadrados, llevan a inferir que en ella habitan 1433 personas por kilómetro cuadrado. El incremento de la densidad de población y, por ende, la dinámica de expansión urbana, impactan de manera negativa en la demanda de agua (Escolero et al., 2016). Cuanto mayor es el tamaño de la población de la urbe, mayor es la demanda de recursos hídricos. La complejidad que esto supone implica retos para la toma de decisiones que involucran a diferentes sectores de gobierno.

En la tabla 2 se muestran los estados con mayor densidad de población, entre los que se encuentran Ciudad de México, Estado de México, Tlaxcala e Hidalgo, todos pertenecientes a la RHA XIII Aguas del Valle de México (INEGI, 2022b).

Tabla 2
Densidad de la población (habitantes por km²) por estado

Entidad federativa	Densidad de población
Ciudad de México	6163
Estado de México	760
Morelos	404
Tlaxcala	336
Aguascalientes	254
Querétaro	203
Guanajuato	201
Puebla	192
Hidalgo	148
Colima	130
Veracruz de Ignacio de la Llave	112

Nota: Censo de Población y Vivienda 2020 (INEGI, 2022a).

Registro Público de Derechos del Agua (REPDA)

De acuerdo con la base de datos del REPDA (Conagua, 2022a), existen 1615 usuarios de aprovechamiento, explotación o usos de aguas superficiales y 4394 usuarios de aguas subterráneas. De total de usuarios registrados, sólo se localizan espacialmente dentro de la RHA XIII 5211, mientras que 798 lo hacen fuera de la misma. Ello hace que sea necesario corroborar en campo la información por ubicación, pues sus coordenadas son incorrectas y no se localizan en el área de estudio, aunque sí están dadas de alta en la base de datos del REPDA (tabla 3).

Tabla 3
Volumen y usuarios de la Región Hidrológica Administrativa XIII

Clase	Volumen	Usuarios totales	Usuarios dentro del RHAXIII	Usuarios fuera del RHA XIII
Aguas superficiales	753877006.710	1615	1374	240
Aguas subterráneas	2259743519.941	4394	3837	558
Total	3013620526.651	6009	5211	798

*Los usuarios que se encuentran fuera del rha XIII son aquellos que en el mapa no se encuentran territorialmente en la zona de estudio, por lo que se requiere revisar su ubicación.

Nota: Conagua (2022a).

3.1 Usuarios de agua superficial

Respecto a la información analizada sobre aguas superficiales, se consideró a todos los usuarios registrados en la base del repda. Se observaron nueve tipos de usos (cuadro 4): 38% corresponde al uso agrícola, 37% al uso público urbano, 10% al uso pecuario y 10% a la categoría diferentes usos; los demás usos se realizan en menor proporción. En la tabla mencionada se muestra que 1375 usuarios de aguas superficiales se encuentran espacialmente dentro de la rha XIII y 240 usuarios fuera de la rha, aspecto relevante y que es necesario corroborar en campo.

Tabla 4
Usuarios de agua superficial clasificados por tipo de uso según su ubicación espacial

Uso	Dentro de la rha XIII	Fuera de la rha XIII	Usuarios totales por uso
Agrícola	513	108	621
Doméstico	17	2	19
Electricidad	2	0	2
Industrial	14	0	14
Pecuario	152	7	159
Público urbano	494	99	593
Servicios	41	2	43
Termoeléctrica	1	0	1
Diferentes usos	140	22	163
Total	1374	240	1615

*Los usuarios que se encuentran fuera del rha XIII son aquellos que en el mapa no se encuentran territorialmente en la zona de estudio, por lo que requiere revisar su ubicación.

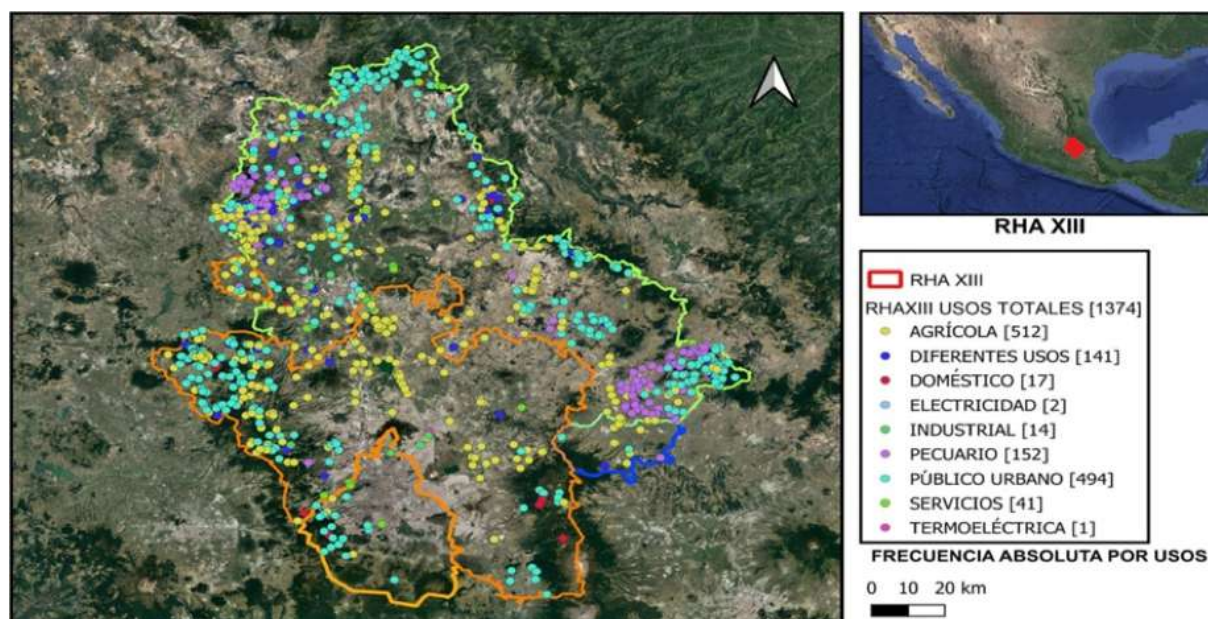
Nota: Conagua (2022a).

De las 1374 concesiones localizadas espacialmente dentro de la rha XIII, dos se dedican a la generación de energía y a una termoeléctrica, 512 se destinan al uso agrícola, 17 son domésticas, 14 industriales, 152 pecuarias y 494 se asignan al uso público urbano. Éstas equivalen a pocos usuarios si se toma en

cuenta la importancia regional, social y económica de la Ciudad de México, el Estado de México, Hidalgo y Tlaxcala. Ello lleva a presumir que deben existir otros usuarios no registrados, por lo que se requiere contrastar la información existente con los diferentes organismos encargados del abastecimiento de agua en las diferentes entidades.

En la figura 2 se muestran los usuarios totales de aprovechamientos superficiales localizados dentro de la rha XIII. Sobresale el uso público urbano y agrícola. En lo que respecta a la categoría de diferentes usos es necesario ratificar en campo el uso predominante, ya que, cuando se tramita una concesión, se especifica el uso. Esta categoría no aparece en el catálogo de repda del año 2021 y se le asignó la categoría de diferentes usos, pues se carece de información relativa al uso del agua. Se trata de un error de la base de datos del repda que Conagua debe atender, para valorar si esta situación sólo se presenta en la rha XIII o también se verifica a nivel nacional.

Figura 2.
Distribución espacial de los usuarios de aguas superficiales



3.2 Usuarios de agua subterránea

El cuadro 5 da cuenta del total de usuarios de aguas subterráneas (4394). En este caso, 39% se concentra en uso público urbano, 23% en uso agrícola, 17% corresponde al uso industrial y 13% a diferentes usos. Al igual que con las aguas superficiales, el uso predominante dentro de esta última categoría debe identificarse en campo, como también el número de usuarios localizados espacialmente fuera del polígono de la rha XIII. Esto tiene la finalidad de determinar la ubicación y el uso del agua, pues como se mencionó anteriormente, al tramitar una concesión siempre se registra el uso que se dará al agua. La ausencia de este dato muestra un error sobresaliente en la base de datos de repda y, por tanto, también de la Conagua.

Tabla 5

Usuarios de agua subterránea clasificados por tipo de uso según su ubicación espacial

Uso	Dentro de la rha XIII	Fuera de la rha XIII	Usuarios totales por uso
Agrícola	923	69	992
Doméstico	77	4	81
Electricidad	2	0	2
Industrial	715	15	730

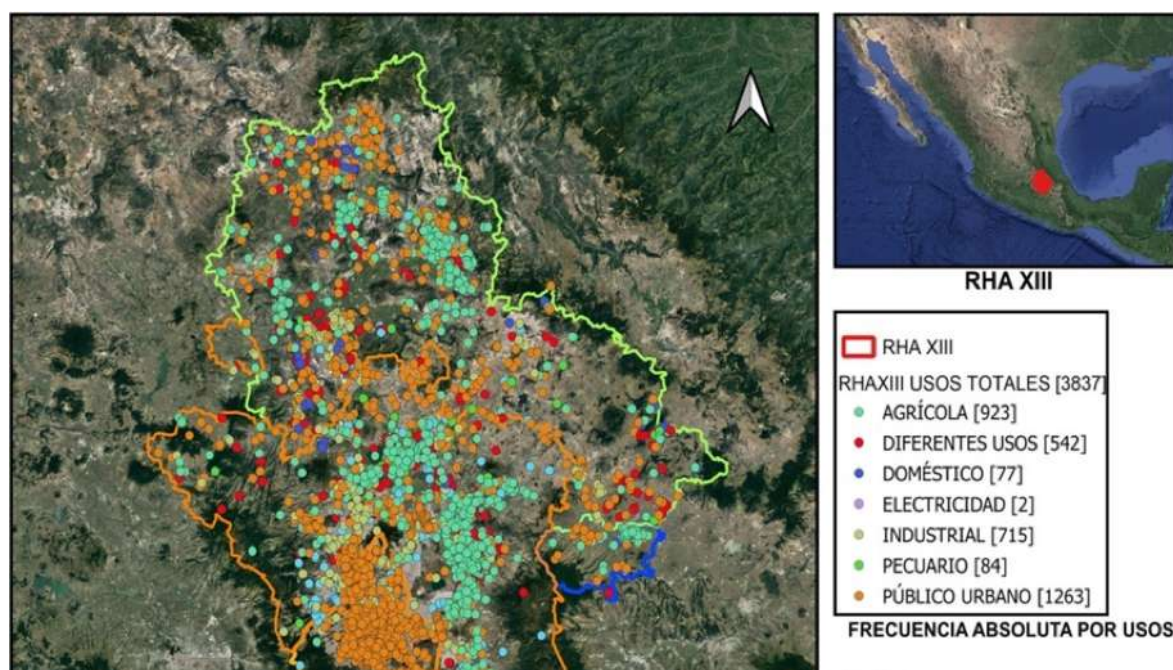
Pecuario	84	3	87
Público urbano	1263	432	1695
Servicios	231	5	236
Diferentes usos	542	29	572
Total	3837	557	4394

*Los usuarios que se encuentran fuera del rha XIII son aquellos que en el mapa no se encuentran territorialmente en la zona de estudio, por lo que requiere examinar su ubicación.

Nota: Conagua (2022a).

En la figura 3 se muestra la distribución de los usuarios de aguas subterráneas. De las 3837 concesiones localizadas espacialmente dentro de la rha XIII, dos son para generación de electricidad, mientras que 923 son de uso agrícola, 77 domésticas, 715 industriales, 84 pecuarias, 1263 públicas urbanas y 231 de servicios. Éstas equivalen a pocos usuarios si se considera la importancia social y económica de la Ciudad de México, el Estado de México, Hidalgo y Tlaxcala. Se estima que deben existir otros usuarios no registrados, por lo que se requiere contrastar la información existente con los diferentes organismos encargados del abastecimiento de agua en las diferentes entidades.

Figura 3
Distribución espacial de los usuarios de aguas subterráneas



Nota: Conagua (2023a) y Conabio (2023).

Discusión

La demanda de agua a nivel mundial ha aumentado debido a la alta tasa de crecimiento demográfico. La misma tendencia se registra para la región Centro de México y la rha XIII. El deterioro y explotación de los cuerpos de agua, aunado el incremento de la población y de las sequías, provocará que para 2030 descienda la disponibilidad del agua en México (imco, 2023a), lo que coloca al país frente a desafíos relacionados con su gestión y el acceso a la misma (imco, 2023b). Con base en el sexto objetivo del Desarrollo Sostenible se pretende garantizar la disponibilidad del agua y su gestión sostenible, así como el saneamiento para todos (onu, 2022).

Una de cada tres personas en el mundo carece de acceso a agua potable salubre, dos de cada cinco no disponen de una instalación básica destinada al lavado de manos con agua y jabón (onu, 2022). Si bien el acceso al agua potable se ha incrementado sustancialmente, en las áreas rurales de la rha XIII aún carecen de dicho servicio. El suministro del agua es un problema cotidiano al que se enfrentan

las personas, aun cuando se trata de un recurso vital necesario para realizar cualquier actividad (Hernández y otros, 2022).

Los objetivos de ods establecen como prioridad el derecho a un suministro adecuado de agua para diferentes usos, especialmente el humano (imco, 2023b). Del mismo modo, Conagua (Conagua, 2023a) ha establecido como prioridad el uso público sobre todos los otros usos. A pesar de que la eficiencia en el uso del agua ha aumentado en 9%, los problemas de estrés hídrico y la escasez de agua siguen siendo un motivo de preocupación en muchas partes del mundo (onu, 2022), también en la rha XIII. Éste es el motivo que hace tan relevante mostrar la distribución de los diferentes usos en esta zona, debido a su relevancia social, ambiental y económica. El análisis de los resultados da cuenta de que los usos del agua mostrados en los mapas de aguas superficiales y subterráneas son incongruentes con la población de la zona.

Otro aspecto importante a considerar en la regulación de los usos del agua para la gestión hídrica en México tiene que ver con las leyes que la rigen. Entre éstas, la principal es la Ley de Aguas Nacionales (lan), la cual establece el aprovechamiento, disponibilidad, calidad, uso del agua, concesiones, pago de derechos, tarifas, construcción de infraestructura, jurisdicciones, aguas residuales (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2023a). El hecho de que en la categoría *diferentes usos* no se cuenten con información del uso primordial causa estragos, tomando en cuenta que, al tramitar una concesión, se establece qué tipo de uso se dará el agua. Otra ley importante es la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (lgepa), que regula el aprovechamiento sostenible, la preservación y, en ciertos casos, la restauración del suelo, el agua y demás recursos naturales del país (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2012).

Recientemente han adquirido importancia leyes relacionadas con la gestión hídrica, a saber: Ley General de Cambio Climático, Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, Ley Agraria y Ley Minera, principalmente. Dichas leyes no sólo establecen lineamientos, sino que también permiten que los usos de agua sean asequibles para el ser humano, estén disponibles en calidad y cantidad, tanto para los seres vivos como para los recursos naturales, y que el agua pueda ser sustentable para generaciones futuras.

Conclusiones

Con base en lo mencionado anteriormente, se concluye que los registros de usuarios de la base de datos del repda, que permiten conocer la dis-

tribución de los usos de agua en la rha XIII Aguas del Valle de México, muestran que su cantidad es limitada de acuerdo con lo esperado conforme la importancia social y económica de las entidades que alberga (CDMX, Estado de México, Hidalgo y Tlaxcala). Ello vuelve necesario realizar una revisión de los sistemas de registro de información a cargo de los organismos responsables del abastecimiento de agua en estas entidades federativas, que permita identificar los problemas de levantamiento de información. Esto permitirá, a su vez, evaluar e identificar a aquellos usuarios de los que aún faltan registrar el uso que dan al agua. Así también, se recomienda corregir la ausencia de información en la categoría diferentes usos, ya que en cada registro del repda siempre se adjudica un uso al agua. Finalmente, es necesario identificar la ubicación espacial de los usuarios no localizados espacialmente en la rha XIII para corroborar el uso que dan al agua.

Referencias

- Alonzo, G. R. (2019). La interdisciplinariedad en la gestión integrada del recurso hídrico. En Sánchez, M. L., Vélazquez, C. E., y Victorino, R. L., *Sostenibilidad y presente. Desafíos y aciertos en la construcción del futuro* (pp. 144-162). Universidad Autónoma Chapin-go.
- Becerra, P., Sáinz, S., y Muñoz, P. C. (2006). Los conflictos por agua en México. Diagnóstico y análisis. *Gestión y Política Pública*, XV(1), 111-143.
- Breña Naranjo, A. (2023). Hacia una clasificación del impacto hídrico de las actividades humanas en el territorio. *Perspectivas IMTA* (1), 1-2. <https://doi.org/doi.org/10.24850/b-imta-persp>
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2012, abril 6). https://www.senado.gob.mx/comisiones/ desarrollo_social/marco/Ley_GEEPA.pdf
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2023a, mayo 8). *Ley de Aguas Nacionales*. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LAN.pdf>
- Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (Cedrassa) (2014). *EL agua, uso racional y eficiente*. Cámara de Diputados LXV Legislatura/cedrassa.
- Conabio (2023). *Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (snib)*. <http://conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Conagua (2020). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Zona Metropolitana de la CD de México (0901)*. Comisión Nacional del Agua.
- Conagua (2021). *Programa Hídrico Regional 2021-2024. Región Hidrológico-Administrativa XIII Aguas del Valle de México*. Semarnat.
- Conagua (2022a, mayo 31). *Base de datos del repda del año 2021*. Comisión Nacional del Agua: <https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx>
- Conagua (2022b). *Numeralia 2022*. Comisión Nacional del Agua.
- Conagua (2023a). *Comisión Nacional del Agua*. sina: <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/SINA/?opcion=base>
- Conagua (2023b). *Comisión Nacional del Agua*. Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterráneas: <https://sigaims.conagua.gob.mx/dma/acuiferos.html>
- Durán, J., y Torres, R. (2006). Los problemas del abastecimiento de agua potable en una ciudad media. *Espiral*, XII(36), 129-162.
- Escolero, O., Kralisch, S., Martínez, S., y Perevochtchikova, M. (2016). Diagnóstico y análisis de los factores que influyen en la vulnerabilidad de las Notas de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3), 409-427.
- fao (2023, julio 25). *aquastat - fao's Global Information System on Water and Agriculture*. <https://www.fao.org/aquastat/en/overview/methodology/water-use/>
- González Reynoso, A. E. (2018). La escala regional de los problemas de abastecimiento de agua y drenaje de la Ciudad de México. Conformación y desafíos de la región hidropolitana. En Perló Cohen M., y Castro-Reguera, L. M., *La crisis del agua y la metrópoli* (pp. 79-109). Siglo XXI.
- González Villareal, F. J., Vázquez Herrera, E., Aguilar Amilpa, E., y Arriaga Medina, J. A. (2022). *Perspectivas del agua en México, propuesta hacia la seguridad hídrica*. unam/Red del Agua-unam/cershi/unesco/Agua Capital.
- Guerrero, T., Rives, C., Rodríguez, A., Saldivar, Y., y Cervantes, V. (2009). El agua en la ciudad de México. *Ciencias* (24), 16-23.
- Hernández, C. E., Martínez, R. M., y Rodríguez, D. J. (2022). Gestión del agua potable en la alcaldía Iztapalapa, Ciudad de México: una revisión de literatura. En Castro, M. O., Rivera, R. J., y Fontalvo, B. J., *Intervenciones y estudios socioambientales. Experiencias interdisciplinarias para la sustentabilidad* (pp. 160-174). Universidad Autónoma Chapingo.
- imco (2023a). *Aguas en México ¿escasez o mala gestión?* Instituto Mexicano para la Competitividad, A. C.
- imco (2023b). *Modernizar la regulación de agua en México*. Instituto Mexicano para la competitividad. https://imco.org.mx/wp-content/uploads/2023/06/RegulacionDeAguas_Reporte_20062023.pdf
- inegi (2022a). Población. En inegi, *Censo de Población y Vivienda 2020: principales resultados* (pp. 1-14). inegi.
- inegi (2022b). *Principales resultados del censo de población y vivienda 2020. Estados Unidos Mexicanos*. inegi.
- López Santiago, M. A., y Ortiz Lazalde, J. (2023). Factors associated with the perception of the problem of scarce potable water available for domestic use in the Nazas-Aguanaval river basin, México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 22(1), 1-11. <https://doi.org/https://doi.org/10.5154/r.rchsza.2022.22.01>
- onu (2022, diciembre 15). Organismo de las Naciones Unidas (onu): <https://www.un.org/es/climate-change/cop26>
- onu (2022). *Organización de las Naciones Unidas*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- Pedrozo Acuña, A. (2022). El conocimiento del agua como herramienta de justicia ambiental. *Perspectivas imta* (30), 1-5. <https://doi.org/doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2022-30>
- Peña Díaz, S. (2019). Condiciones hídricas en la cuenca del Vallde México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 10(2), 98-127.
- QGIS Development Team (2023). Proyecto de la Fun-

dación Geoespacial de Código Abierto: <http://qgis.osgeo.org>

- Ríos, V. (2023, agosto 20). México Seco. *El País*. <https://elpais.com/mexico/2023-08-21/mexico-seco-las-cifras-ocultas-de-la-carestia-del-agua.html>
- Rodríguez-Tapia, L., Morales-Novelo, J., Sosa-Rodríguez, F., Altamirano-Cabrera, J., y Torres-Ayala, F. (2016). Agua virtual en un marco insumo-producto para la cuenca del Valle de México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VII(2), 51-66.
- Rolland, L., y Vega, C. Y. (2010). La gestión del agua en México. *Polis: Investigación y análisis sociopolítico y psicosocial*, 6(2), 155-188.
- Semarnat (2013). *Informe de la situación del medioambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. Indicadores clave y de desempeño ambiental* (2012 ed.). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Serendipia (2023). Escasez de agua en México afecta ya a 40% del país: Conagua. <https://serendipia.digital/investigacion/escasez-de-agua-en-mexico-afecta-a-40-del-pais-conagua/>
- Sheridan Prieto, C., y Cerutti, M. (2015). *Usos y desusos del agua en las cuencas del norte de México*. Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología.
- Toledo, A. (2002). El agua en México y el mundo. *Gaceta Ecológica*, I(1), 9-18.
- WWAP, N. (2017). *Informe sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas: Cifras y datos. Las aguas residuales. El recurso desaprovechado*. unesco.
- WWAP, N. U. (2016). *Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo*. unesco.

Derechos de Autor© 2023 María Josefa Jiménez Moreno, Luis Daniel Magadán Revelo, María Ornella Ortiz Rodríguez



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

Adsorción de Pb²⁺ y colorantes mediante carbón activado obtenido de *Agave angustifolia* Haw. y residuos vegetales

Pablo Michel Pérez Macedo¹, Susana Edith Hernández Arrazola², Laura Victoria Aquino González³, Frank León Martínez⁴, Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita⁵, Alejandra Rojas-Olivos^{6*}.

DOI: 10.56643/rcia.v2i2.167

*Autor de correspondencia

Resumen

De la totalidad —100%— de los residuos sólidos urbanos generados en la ciudad de Oaxaca, 42% corresponden a residuos orgánicos. Ello hace indispensable considerar alternativas para la generación de materiales adsorbentes, debido al contenido de carbono orgánico (CO) presente en estos residuos. El carbón activado (CA) es un material capaz de adsorber colorantes y sustancias contaminantes, lo cual depende del contenido de CO presente en la materia prima. Se ha reportado que los residuos vegetales y el bagazo de agave son valorados para el compostaje por su capacidad de aumentar el contenido de CO. En este trabajo se obtuvo CA a partir de bagazo de *Agave angustifolia* Haw. (CAB) y residuos vegetales (CAO) para evaluar su capacidad adsorptiva de Pb²⁺ y colorantes. La activación fisicoquímica realizada con H₃PO₄ se demostró mediante el desarrollo de la porosidad en micrografías comparativas, la adsorción de colorantes fue evaluada considerando pruebas de absorbancia colorimétrica por UV-VIS, la capacidad adsorptiva de Pb²⁺ fue valorada por medio de HNO₃/ICP-OES-MS, el índice de yodo se determinó con base en la norma NMX-F-296-SC-FI-2011 y el punto de carga cero se evaluó en un potenciómetro HANNA-HI4521. Las micrografías confirmaron el desarrollo de la porosidad tras la aplicación del método de activación utilizado, las pruebas colorimétricas demostraron valores de 0 u.a. en las soluciones filtradas mediante CAB y CAO. Respecto a la adsorción de Pb²⁺, valorada mediante pruebas de adsorción por lotes, se demostró que el CAB adsorbió 84.45% y el CAO 82.61%

de la concentración inicial de plomo presente en las muestras acuosas evaluadas en este trabajo de investigación. Por lo que es importante considerar el potencial de uso del CAB y el CAO en la adsorción de metales pesados y colorantes, así como en aplicaciones de tratamiento de agua.

Palabras Clave: Activación fisicoquímica, adsorbentes, materiales lignocelulósicos, residuos orgánicos, metales pesados.

Abstract

In the city of Oaxaca, 42% of 100% of the urban solid waste generated is organic, making it essential to consider alternatives for the generation of adsorbent materials due to the organic carbon (OC) content they contain. Activated carbon (AC) is a material capable of adsorbing dyes and polluting substances, which depends on the OC content of the raw material. It has been reported that plant residues and agave bagasse are valued for composting due to their ability to increase the OC content. In this work, AC was obtained from *Agave angustifolia* Haw bagasse. (BAC) and plant residues (OAC) to evaluate their adsorption capacity for Pb²⁺ and dyes, the physicochemical activation carried out with H₃PO₄ was demonstrated by the development of porosity in comparative micrographs, the adsorption of dyes was evaluated considering UV-VIS colorimetric absorbance tests, the adsorptive capacity of Pb²⁺ was assessed using HNO₃/ICP-OES-MS, the iodine value was determined based on the NMX-F-296-SCFI-2011 standard and the zero charge point was evaluated in a potentiometer HANNA-HI4521. The micrographs confirmed the development of porosity through the activation method used, the colorimetric tests demonstrated values of 0 u.a. in the solutions filtered by BAC and OAC. Regarding the adsorption of Pb²⁺ assessed through batch adsorption tests, they showed that BAC reduces 84.45% and OAC adsorbs 82.61% with respect to the initial concentration of lead in aqueous samples evaluated in this research work, which is why it is important consider the potential use of BAC and OAC in adsorption of heavy metals and dyes, as well as in water treatment applications.

Keywords: Physicochemical activation, adsorbents, lignocellulosic materials, organic waste, heavy metals.

Cómo citar este artículo. Pérez-Macedo, P. M., Hernández-Arrazola, S. E., Aquino-González, L. V., León-Martínez, F., Cano-Barrita, P.F. de J., Rojas-Olivos, A. (2024) Adsorption of PB²⁺ and dyes by activated carbon obtained from Agave Angus-tifolia Haw. And vegetal waste. *Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura*. 2(2). 52-66 DOI: <https://doi.org/10.56643/rcia.v2i2.167>

¹ Ingeniero Ambiental, Universidad La Salle Oaxaca A.C. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9242-5864>

² M. en C. en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales, Universidad La Salle Oaxaca A.C. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9296-3642>

³ Maestra en Ingeniería Química e Integración de Procesos, Instituto Politécnico Nacional CIIDIR Unidad Oaxaca. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8438-9791>

⁴ M. en C. en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales, Instituto Politécnico Nacional CIIDIR Unidad Oaxaca. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9817-2713>

⁵ Dr. en Ingeniería Civil, Instituto Politécnico Nacional CIIDIR Unidad Oaxaca. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3501-283X>

⁶ Dra. en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de recursos naturales, CONAHCYT-Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Unidad Oaxaca. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2045-4811>

*Autor para correspondencia: rojasolivos@hotmail.com, alejandra.rojas@conahcyt.mx.

Recibido: 25/09/23 | Aceptado: 09/11/23 | Publicado: 20/12/2023

Introducción

Oaxaca es uno de los principales estados en cuanto a producción de mezcal en el país. Desde 2013, la Asociación Rural de Interés Colectivo de Magueyeros y Mezcaleros de Oaxaca (aric) ha representado a más de 25 000 productores magueyeros y mezcaleros del estado. Su proceso de producción genera anualmente 122 696 toneladas de bagazo de *Agave angustifolia* Haw. como residuos (Martínez Gutiérrez et al., 2013), el cual ha sido reportado como una materia prima importante para el compostaje por su capacidad para aumentar el contenido de carbono orgánico (Hidayu et al., 2016; Tan et al., 2008.).

Además de los desechos de agave, los residuos orgánicos generados por la industria restaurantera son considerados un insumo valorable, debido a que, anualmente, miles de toneladas de materia orgánica provenientes de estos lugares son vertidas en tiraderos a cielo abierto, rellenos sanitarios y sitios controlados (Semarnat, 2020), con lo que se desperdicia una importante Nota de carbono. A su vez, cuando este material se degrada, genera emisiones atmosféricas, compuestas en 95% por metano. Un estudio realizado por el Centro Mario Molina en conjunto con el Fondo de Defensa Ambiental y el Instituto Pembina (Centro Mario Molina, s. f.) reportó que “el metano es un potente gas de efecto invernadero que contribuye al cambio climático, responsable del 25% del calentamiento global actual”. Se ha informado que los residuos vegetales y el bagazo de agave son materiales precursores importantes en el compostaje, pues tienen la capacidad para aumentar el contenido de carbono orgánico. Asimismo, se ha demostrado que el bagazo de agave es un buen precursor de composta por sus propiedades fisicoquímicas, entre las que destaca su elevado porcentaje de carbono orgánico total (%COT), registrándose de 42.7 a 51.6% en muestras de bagazo de *Agave angustifolia* Haw. (Aguirre-Joya et al., 2018; Martínez-Gutiérrez et al., 2013). Por otra parte, se han reportado investigaciones relacionadas con la caracterización de carbón activado a partir de otras materias primas orgánicas (fibra de coco y otras especies de agave) que, gracias a sus características lignocelulósicas, han mostrado resultados favorables en valoraciones de adsorción de contaminantes en el tratamiento de aguas residuales (Velásquez-Jiménez et al., 2013; Farahani et al., 2011; Phan et al., 2006.).

Uno de los metales pesados cuyos efectos son negativos para la salud humana es el plomo (Pb²⁺). Éste es absorbido por personas que a cau-

sa de carencias económicas se ven en la necesidad de exponerse directamente a este metal; con el paso del tiempo, éste genera daños irreversibles que afectan su bienestar como consecuencia de su elevado potencial neurotóxico (Caravanas et al., 2014). Las principales vías acarreadoras de plomo son los alimentos y el agua (Llop et al., 2013), por lo que es importante desarrollar alternativas para su remoción. Considerando lo mencionado anteriormente, en este trabajo se consolidó el objetivo de obtener un material adsorbente (CA) a partir de bagazo de *Agave angustifolia* Haw. y de residuos orgánicos vegetales. Para ello se empleó un método de activación fisicoquímica, con la finalidad de evaluar su capacidad de adsorción de colorantes y plomo (Pb²⁺) y de reducir la cantidad de desechos orgánicos en rellenos sanitarios municipales y vertederos al aire libre mediante el desarrollo de una alternativa que permita el aprovechamiento de residuos.

Materiales y métodos

El bagazo de *Agave angustifolia* Haw. se obtuvo como residuo de la producción artesanal de mezcal en el municipio de Santiago Matatlán, Tlaxiaco, Oaxaca, mientras que los residuos orgánicos vegetales se recogieron al finalizar el turno matutino de las clases de cocina de la Universidad La Salle Oaxaca. Los mismos consistían en una mezcla de lechuga, espinacas, perejil, etc. Los residuos fueron secados en un deshidratador híbrido facilitado por el Laboratorio de Alimentos del ciidir ipn Unidad Oaxaca (López, 2011; A. O. A. C., 1990, citado en Pérez-Macedo, 2023.). Para reducir el tamaño de las partículas, se utilizó un molino marca Pulvex, a fin de facilitar el proceso de calcinación. La calcinación se llevó a cabo en una mufla marca civek modelo K-25 durante 40 minutos a 700°C. Los residuos carbonizados se activaron químicamente en una solución de H₃PO₄ al 85%. Luego se los colocó en un horno a 110 °C durante tres horas y posteriormente se los sometió a 450°C durante una hora adicional, de manera que se completara el proceso de activación. Finalmente, se lavó el producto resultante con agua destilada caliente y NaOH 1 M, con el fin de ajustar el pH entre 6.5 y 7. Cada tipo de carbón activado (CA) obtenido se deshidrató, pulverizó y tamizó a través de una malla # 100, siendo almacenado a temperatura ambiente hasta su evaluación. Se analizó cada muestra de CA obtenida en un microscopio electrónico de barrido jeol modelo JSM-IT300LV, a fin de observar las diferencias en la porosidad desarrollada por cada muestra. Para determinar el índice de azul de metileno, se prepararon soluciones de concentración conocida de dicho

colorante de 0,2 a 24 mg/L; los valores de absorbancia fueron determinados empleando el método de curva de calibración en un espectrofotómetro uv-vis modelo VE-5100UV. Se colocaron por separado 0.5 g de CAB, CAV y CAC (marca Hycel) en 25 mililitros de solución de azul de metileno 20 mg/L con base en la metodología de Pérez-Macedo (2023); la absorbancia de las soluciones filtradas de cada carbón activado se evaluó por triplicado. El índice de yodo se estableció de acuerdo con la norma NMX-F-296-SCFI-2011. Para el punto de carga cero (PCC) se consideró el procedimiento indicado por Pérez-Macedo (2023), agregando las cantidades apropiadas de HCl 0.1 M y NaOH 0.1 M. A estas soluciones se añadieron 0.5 g de la muestra del material adsorbente y, después de 48 horas de agitación a temperatura ambiente, se midió el valor del pH final. Las mediciones de PCC se llevaron a cabo en un potenciómetro hanna modelo HI4521. El PCC se determinó gráficamente como el punto en que la variación del pH contra la inicial cruza la línea en que su valor es cero. Para determinar la capacidad de adsorción del Pb^{2+} se usaron matraces Erlenmeyer de 1 L, a los que se añadieron 500 mL de solución acuosa a una concentración conocida del metal. La concentración inicial de Pb^{2+} fue de 80 mg/L, en relación con 1 g/L de CA; cada matraz se colocó en un baño con agitación constante de 150 rpm a 30°C durante seis horas. Posteriormente, se determinó la concentración residual de Pb^{2+} en las muestras acuosas por HNO₃/ICP-oes-ms del laboratorio certificado del Servicio Geológico Mexicano en la ciudad de Oaxaca (Pérez-Macedo, 2023).

Resultados y discusión

En este trabajo se demuestra el efecto del proceso de activación fisicoquímica aplicado al bagazo de agave y a los residuos vegetales. En la figura 2 se muestra la microestructura desarrollada en el CAB, misma que se analizó utilizando microscopía electrónica de barrido; se corrobora la presencia de una superficie fracturada porosa en comparación con la mostrada en la figura 1, en la que se presenta la muestra carbonizada antes de ser sometida al proceso de activación. Así también, la figura 4 muestra la porosidad desarrollada en el CAO tras ser sometido al mismo proceso de activación en comparación con la presentada en figura 3, en la que se aprecia la muestra de residuos orgánicos vegetales sin activar.

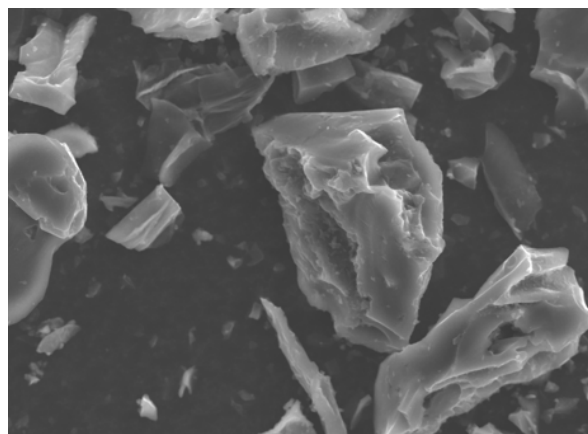


FIGURA 1. Carbón sin activar de bagazo de Agave angustifolia Haw, magnificación a x950 obtenida mediante SEM JSM-IT300LV.

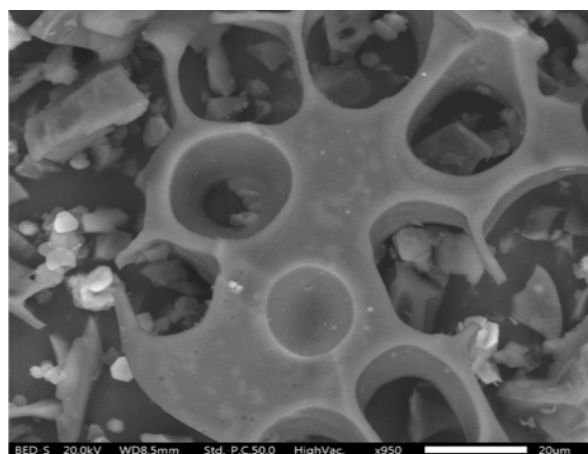


FIGURA 2. Porosidad desarrollada en el carbón activado de bagazo de Agave angustifolia Haw, magnificación a x950 obtenida mediante SEM JSM-IT300LV.

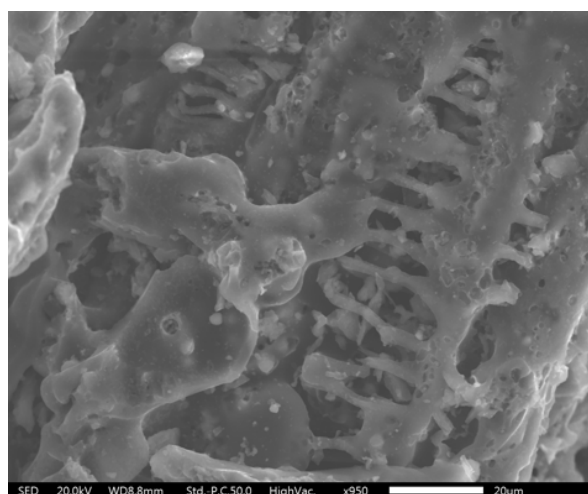


FIGURA 3. Carbón de residuos orgánicos vegetales sin activar, magnificación a x950 obtenida mediante SEM JSM-IT300LV.

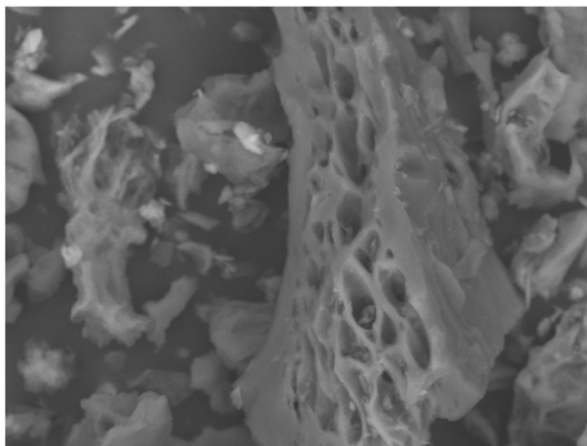


FIGURA 4. Desarrollo de la porosidad en carbón activado obtenido de residuos de vegetales, magnificación a x950 obtenida mediante SEM JSM-IT300LV.

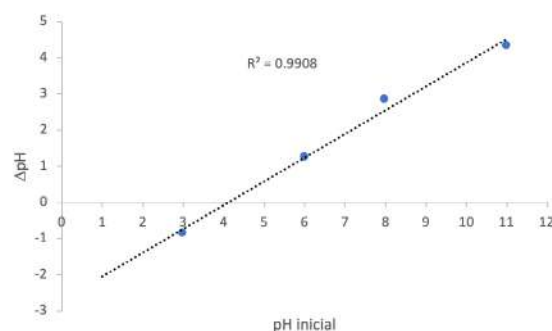
En la tabla 1 se recogen los resultados correspondientes a las pruebas de capacidad de adsorción del colorante azul de metileno y de Pb²⁺ realizadas para cada tipo de carbón activado. Con base en los resultados obtenidos, se evidencia que los valores resultantes son similares a los del carbón activado comercial. Dichos resultados corroboran que el proceso de activación mediante H₃PO₄ favoreció el desarrollo de la porosidad; asimismo, se constató que la estabilidad del pH calculado mediante el punto de carga cero coincide con la tendencia reportada en el trabajo de Melliti et al. (2023) para ambos tipos de carbón activado (CAB y CAO). Los resultados de la concentración residual Pb²⁺ en las muestras acuosas reportados demuestran que el CAB adsorbe 84.45% y el CAO 82.61% de la concentración inicial de plomo de 80 mg/L.

Tabla 1.
Pruebas de capacidad de adsorción del carbón activado de residuos orgánicos de vegetales y de bagazo de Agave angustifolia Haw.

Tipo de carbón	Azul de metileno (u.a.)	Índice de yodo (mg/g de carbón)	Plomo (mg/L)
CAB	0.0	721.7	12.44
CAO	0.0	694.1	13.91
CAC	0.001	500-1200	13.95

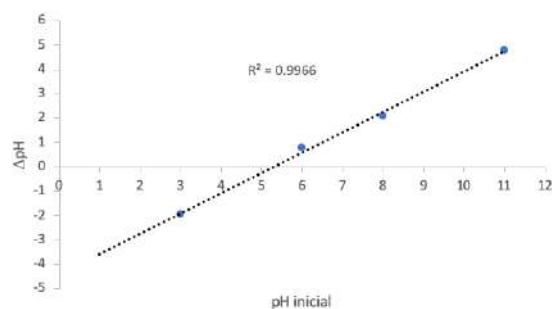
CAB: Carbón activado de bagazo de Agave angustifolia Haw., CAO: carbón activado de residuos de vegetales, CAC: carbón activado comercial.

Figura 5.
Gráfica ilustrativa del punto de carga cero del CAB



Nota: (Pérez-Macedo, 2023)

Figura 6.
Gráfica ilustrativa del punto de carga cero del CAO



Nota: (Pérez-Macedo, 2023)

En las figuras 5 y 6 se muestra la determinación del punto de carga cero; éste da cuenta de la disminución del pH PCC del CAB y el CAO desde 4.01 y 5.52, respectivamente. Esto demuestra la reducción de la característica básica de la superficie del carbón activado obtenido y, por consiguiente, el aumento de sus propiedades ácidas. Melliti et al. (2023) reportaron que la adsorción de plomo se ve favorecida en un rango de pH de entre 3.2 y 5.5, lo que responde a la generación de aniones en la superficie porosa de los materiales con características lignocelulósicas que da lugar a interacciones con cationes metálicos (Pérez-Macedo, 2023; Alghamdi et al., 2019).

Los resultados obtenidos demuestran que el método de activación fisicoquímica fue favorable para ambos tipos de residuos, constatándose el desarrollo de la porosidad en cada tipo de carbón activado obtenido a partir bagazo de agave y residuos orgánicos de vegetales. Los resultados recogidos en la tabla 1 muestran que cada parámetro evaluado es similar al presentado por el carbón activado comercial, por lo que resulta impor-

tante resaltar que la cantidad de yodo adsorbido es proporcional a la superficie del carbón activado. Los valores de cada tipo de carbón se encuentran dentro del valor típico de carbón comercial conforme la NMX-F-296-SCFI-2011 considerada en la metodología de activación. La selección de materias primas con características potenciales atribuidas a la presencia de lignina es un factor determinante para considerar el uso potencial de un material como adsorbente de metales pesados y/o colorantes (Obregón-Valencia y Sun-Kuo; 2014). Así, el bagazo de agave usado en este trabajo, reportado como material lignocelulósico por antecedente de otras variedades de la especie evaluada por Velásquez-Jiménez et al., (2013), puede tener el mismo potencial de uso como adsorbente de colorantes y metales tóxicos, como los reportados en esta investigación (Pérez-Macedo, 2023). Una de las características fundamentales de los materiales adsorbentes es el valor del pH calculado en la determinación del punto de carga cero. En este trabajo se ha reportado el valor en el cual se favorece la remoción de sustancias contaminantes catiónicas y se demuestra que el proceso de remoción es favorable (Amaringo-Villa y Hormaza-Anaguano, 2013). Diversos trabajos, como el de Melliti et al. (2023), han demostrado un efecto favorable en la remoción de metales pesados a partir de carbón activado obtenido de fibras de palma datilera. El trabajo de Valdés-Rodríguez et al. (2023) evaluó diferentes biomásas lignocelulósicas, entre las que, con base en los resultados obtenidos, los frutos del árbol de jacaranda del estado de Aguascalientes, México, destacan como materia prima para la obtención de carbón activado; asimismo, se pone de manifiesto su capacidad para adsorber metales pesados como Hg^{2+} , Zn^{2+} y Pb^{2+} de soluciones acuosas. También es importante mencionar el trabajo realizado por Ibrahim et al. en 2023, en el cual se demuestra que el método de activación con H_3PO_4 es favorable para el desarrollo de porosidad en el material carbonizado de hojas de *Melaleuca japuti*. Los autores evidenciaron que es posible emplear material vegetal usado generalmente para compostaje como una alternativa para la obtención de carbón activado de bajo costo. Los estudios mencionados complementan lo demostrado por este trabajo, pues consideran la transformación de materias primas orgánicas en carbón activado mediante el uso de métodos de activación fisicoquímica con potencial de ser utilizados para la remoción de contaminantes, por ejemplo, metales tóxicos, de soluciones acuosas (Rojas-Morales et al., 2016). Esta investigación demostró la aplicación del proceso de activación a residuos de bagazo de agave y residuos vegetales, lo que hace posible considerarlo como una alternativa para su aprovechamiento y posible aplicación en el tratamiento del agua.

Conclusiones

Teniendo en cuenta las características que debe poseer la materia prima empleada para la obtención de carbón activado, este trabajo demostró que el uso del método de activación fisicoquímica con H_3PO_4 para obtener CA del bagazo de Agave angustifolia Haw. y de residuos vegetales permite desarrollar un material adsorbente capaz de retener colorantes y Pb^{2+} . Por consiguiente, podría considerarse que el CAB y el CAO evaluados en esta investigación presentan características similares a las del carbón activado comercial tras ser sometidos al proceso de activación utilizado como alternativa para reducir la cantidad de residuos orgánicos y generan un material con posibilidad de ser usado en procesos de remoción de contaminantes de muestras acuosas.

Agradecimientos

A los productores de mezcal del municipio de Santiago Matatlán, Tlacolula por el apoyo facilitado en la obtención del bagazo; a la Universidad La Salle Oaxaca A.C. por el financiamiento otorgado y al Instituto Politécnico Nacional ciidir Unidad Oaxaca por las facilidades otorgadas para la obtención de micrografías en el Laboratorio de Materiales Base Cemento.

Referencias

- Aguirre-Joya, J. A., Méndez-Montaño, M., y Cervantes-González, E. (2018). Bagazo de agave como alternativa para producir furfural: Una revisión. *Industrial Crops and Products*, 111, 468–476.
- Alghamdi, A., Al-Odayni, A., Saeed, W. S., Al-Kahtani, A. A., Alharthi, F. A., y Aouak, T. (2019). Adsorción eficiente de plomo (II) a partir de soluciones en fase acuosa utilizando carbón activado a base de polipirrol. *Materials*, 12(12), 2020. <https://doi.org/10.3390/ma12122020>.
- Amaringo-Villa, F. A. y Hormaza-Anaguano, A. (2013). Determinación del punto de carga cero y punto isoelectrico de dos residuos agrícolas y su aplicación en la remoción de colorantes. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* 4(2): 27-36.
- A.O. A. C. (1990). Método oficial de análisis. Asociación de químicos analíticos oficiales, n° 934.06, Arlington, VA.
- Bhatnagar Amit, H. W., Marques Marcia, S. M. (2013). Una descripción general de los métodos de modificación del carbón activado para sus aplicaciones en agua. *Chemical Engineering Journal*, 219, 499-511.
- Caravanas Jack, D. R., Tellez-Rojo, M. M., Cantoral, A., Kobrosly, R., Estrada, D., Orjuela, M., Gualtero, S., Ericson, B., Rivera, A., Fuller, R. (2014). Niveles de Plomo en Sangre en México y su Implicación para la Carga Pediátrica de la Enfermedad. *Annals of Global Health* 80: e1-e11.
- Centro Mario Molina. (s. f.). <https://centromariomolina.org/>
- Farahani Meysam, A. S., Rozaimah, S., Hosseini, S., Shojaeipour, S., Kashisaz, M. (2011). Colorantes catiónicos basados en adsorción utilizando el bagazo de caña de azúcar activo con carbón. *Procedia Environmental Sciences* 10, 203-208.
- Hidayu, A. R., Muda, N. (2016). Preparación y caracterización de carbón activado impregnado de cáscara de palmiste y cáscara de coco para captura de CO₂. *Procedia Engineering* 148, 106-113.
- Ibrahim, A., Ismail, A., Juahir, H., Ihsan, Y. N., Sudianto, S., Ovinis, M., Kassim, A. M., Hanapi, N. H. M., y Hafizi, A. (2023). Preparación y caracterización de carbón activado obtenido de hojas de *Melaleuca cajuputi*. *Carbon Trends*, 100301. <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2023.100301>
- López Vidaña, E. C. (2011). *Caracterización y evaluación de la eficiencia térmica y de secado en un deshidratador híbrido (solar-gas)*. Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional.
- Llop, S., Porta, M., Martínez, M. D., Aguinalde, X., Fernández, M., Fernández-Somoano, A., Casas, M., Vrijheid, M., Ayerdi, M., Tardón, A., Ballester, F. (2013). Estudio de la evolución de la exposición a plomo en la población infantil española en los últimos 20 años. ¿Un ejemplo no reconocido de salud en todas las políticas? *Gaceta Sanitaria* 27(2), 149-155.
- Martínez-Gutiérrez, G. A., Iñiguez-Covarrubias, G., Ortiz-Hernández, Y. D., López-Cruz, J. Y., Bautista-Cruz, M. A. (2013). Tiempos de apilado del bagazo de maguey mezcalero y su efecto en las propiedades del compost para sustrato de tomate. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 29(3), 209-216.
- Melliti, A., Yilmaz, M., Sillanpää, M., Hamrouni, B., y Vurm, R. (2023). Carbón activado con fibra de palma datilera de bajo coste para una adsorción eficaz y rápida de metales pesados del agua: estudios de caracterización, equilibrio y cinética. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 672, 131775. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131775>
- Phan, N. H., Rio, S., Faur, C., Le Coq, L., Le Cloirec, P., Nguyen, T. Ho. (2006). Producción de carbones fibrosos activados a partir de fibras naturales de celulosa (yute, coco) para aplicaciones de tratamiento de agua. *Carbon* 44, 2569-2577.
- NMX-F-296-SCFI-2011. Industria azucarera y alcoholera - determinación del número de yodo en muestras de carbones activados empleados en la refinación de azúcar.
- Obregón-Valencia, D. y Sun-Kuo, M. del R. (2014). Estudio comparativo de adsorción de cadmio sobre carbón activado preparado a partir de aguaje (*Mauritia flexuosa*) y hueso de olivo (*Olea europaea* L.). *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2, 2280-2288.
- Pérez-Macedo, P. M. (2023). Caracterización y comparación de las propiedades adsorptivas del carbón activado obtenido a partir de residuos orgánicos [Titulación por Reporte de investigación nivel licenciatura]. Universidad La Salle Oaxaca.
- Rojas-Morales, J. L., Gutiérrez-González, E. C., Colina-Andrade, G. de J. (2016). Obtención y caracterización de carbón activado obtenido de lodos de plantas de tratamiento de agua residual de una industria avícola. *Ingeniería, investigación y tecnología* 4(17), 453-462
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Renovables (2020). Diagnóstico Básico Para La Gestión Integral De Los Residuos, Semarnat, pp. 68-70.
- Tan, I. A. W., Ahmad, A. L., Hameed, B. H. (2008). Optimización de las condiciones de preparación de carbones activados a partir de cáscara de coco mediante metodología de superficie de respuesta. *Chemical Engineering Journal* 137, 462- 470.
- Valdés-Rodríguez, E. M., Mendoza-Castillo, D. I., Reynel-Ávila, H. E., Aguayo-Villarreal, I. A., y Bonilla-Petriciolet, A. (2022). Fabricación de carbón activado a partir de biomasa lignocelulósica alternativa mexicana y su aplicación en el tratamiento de aguas: condiciones de preparación, análisis

de química superficial y propiedades de adsorción de metales pesados. *Chemical Engineering Research and Design*, 187, 9-26. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.08.039>

Velásquez-Jiménez, L., Pavlick, A., Rangel-Méndez, J. (2013). Caracterización química del bagazo de agave crudo y tratado y su potencial como adsorbente de cationes metálicos del agua. *Industrial Crops and Products* 43, 200-206.

Derechos de Autor© 2023 Pérez Macedo Pablo Michel, Hernández Arrazola Susana Edith, Aquino González Laura Victoria, León Martínez Frank, Cano Barrita, Prisciliano Felipe de Jesús, Rojas Olivos Alejandra



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

Método Simplex en VBA: una propuesta didáctica para la enseñanza de la pro- gramación lineal

Carlos Miguel López Martínez¹

DOI: 10.56643/rcia.v2i2.168

*Autor de correspondencia

Resumen

Como mencionan Coll y Blasco (2010), la enseñanza tradicional ha estado centrada principalmente en la figura del profesor y a menudo no integra herramientas tecnológicas que faciliten el aprendizaje práctico. Este artículo desarrolla una herramienta pedagógica diseñada para mejorar la comprensión y aplicación de la programación lineal en estudiantes de ingeniería y administración. Aunque existen diversos estudios que utilizan la función Solver de Microsoft Excel para resolver problemas de programación lineal, la misma presenta desventajas importantes, como la falta de adaptabilidad y personalización. En el contexto educativo actual, que demanda métodos de enseñanza interactivos y prácticos, la propuesta de este estudio se destaca por integrar el Método Simplex en el entorno familiar de Microsoft Excel, utilizando Visual Basic for Applications (VBA). Esto permite a los estudiantes interactuar directamente con el código y observar los resultados del algoritmo en tiempo real, lo que facilita una comprensión más profunda de los conceptos subyacentes y promueve un aprendizaje significativo. Este artículo no sólo describe el desarrollo y las funcionalidades de la herramienta, sino que también proporciona el código completo, fomentando su replicación científica y su mejora continua por parte de la comunidad educativa. Aunque la propuesta se centra en el uso de Excel y VBA, se reconoce la necesidad de adaptabilidad a diferentes entornos tecnológicos y estilos de aprendizaje. A través de este trabajo, se invita a la comunidad educativa a participar en la evolución de las estrategias de enseñanza de la programación lineal, preparando a los estudiantes para enfrentar con confianza los retos analíticos y tecnológicos del futuro.

Palabras clave: Investigación de Operaciones, Excel, Programación VBA, optimización, ingeniería, administración

Abstract

As Coll and Blasco (2010) mention, traditional teaching has been primarily centered around the figure of the teacher, and often does not integrate technological tools that facilitate practical learning. This article develops a pedagogical tool designed to improve the understanding and application of linear programming in engineering and management students. Although there are numerous studies that use Microsoft Excel's Solver function to solve linear programming problems, this function has major disadvantages such as lack of adaptability and customization. In the current educational context, which demands interactive and practical teaching methods, the proposal of this study stands out for integrating the Simplex Method into the familiar environment of Microsoft Excel, using Visual Basic for Applications (VBA). This allows students to interact directly with the code and observe the algorithm's results in real time, thus facilitating a deeper understanding of the underlying concepts and promoting meaningful learning. This article not only describes the development and functionalities of the tool but also provides the complete source code, encouraging scientific replication and continuous improvement by the educational community. Although the proposal focuses on the use of Excel and VBA, the need for adaptability in different technological environments and learning styles is recognized. Through this work, the educational community is invited to participate in the evolution of teaching strategies for linear programming, preparing students to confidently face the analytical and technological challenges of the future.

Keywords: Operations Research, Excel, Programming VBA, optimization, engineering, administration

Cómo citar este artículo: López Martínez, C. M. (2024) Método Simplex en VBA: una propuesta didáctica para la enseñanza de la programación lineal. *Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura*. 2(1). 67-116. DOI: <https://doi.org/10.56643/rcia.v2i2.168>

¹ Licenciado en Matemáticas Aplicadas y Computación, maestro en Ingeniería en Tecnologías de la Información, doctor en Ciencias de la Administración. Profesor de asignatura en la Escuela de Ingeniería y Arquitectura Universidad La Salle Oaxaca; profesor de asignatura de la Facultad de Contaduría y Administración (fca) de la Universidad Autónoma "Benito Juárez" de Oaxaca (uabjo) (México). Autor para correspondencia: miguel.lopez.beca@gmail.com
Recibido: 14/10/23 | Aceptado: 06/11/23 | 20/12/2023

Introducción

Dantzig (1963) define la programación lineal como una rama de las matemáticas aplicadas centrada en la optimización de funciones lineales, sujeta a restricciones también lineales. Esta técnica ha demostrado ser esencial en diversos campos, que incluyen desde la ingeniería y la logística hasta la economía y la administración, debido a su capacidad para resolver problemas complejos relacionados con la asignación de recursos limitados. La esencia de la programación lineal radica en encontrar el punto óptimo, ya sea máximo o mínimo, de una función objetivo, considerando un conjunto de restricciones que definen un espacio factible.

Taha (2012) destaca la importancia de la programación lineal en la toma de decisiones, pues permite a las organizaciones determinar la mejor manera de utilizar sus recursos — mano de obra, materiales y tiempo—, para maximizar las ganancias o minimizar los costos. En el ámbito de la logística, ayuda a determinar rutas óptimas para la distribución de productos, mientras que en el sector financiero puede ser utilizada para la optimización de carteras de inversión.

Fuson (2020) concebía una instrucción en la cual los estudiantes construyen significado para los conceptos matemáticos y procedimientos que están investigando, y participan en actividades significativas de resolución de problemas. Esto, a diferencia de la instrucción tradicional basada en libros de texto, se centra, principalmente, en el aprendizaje de memoria y la práctica de habilidades. Si bien estas herramientas han sido efectivas para introducir a los estudiantes en los conceptos básicos, a menudo carecen de la flexibilidad y la capacidad para manejar problemas más complejos y realistas. Además, en un mundo cada vez más digitalizado, es esencial que los estudiantes estén familiarizados con el uso y la creación de herramientas tecnológicas que les permitan aplicar sus conocimientos de manera práctica y eficiente.

Orozco (2004, citado en López Noriega, Lagunes Huerta y Herrera Sánchez, 2006) menciona que la tecnología ha venido a cambiar por completo el panorama tradicional según el cual se hacían, se veían y se enseñaban las matemáticas. En este contexto, Microsoft Excel emerge como una herramienta poderosa y accesible. Su amplia adopción en el mundo académico y empresarial, lo convierte en una plataforma ideal para la enseñanza por su naturaleza, no sólo de la programación lineal, sino de muchas áreas de la matemática aplicada. Aun-

que Excel por sí solo ofrece capacidades limitadas para la programación lineal, su lenguaje de programación integrado, vba, amplía enormemente su potencial. vba permite a los usuarios crear soluciones personalizadas, automatizar tareas y desarrollar herramientas didácticas específicas, como es el caso del método simplex.

Barr y Scott (2008) mencionan la funcionalidad de programación incorporada de Excel, conocida como vba, ideal para escribir herramientas de enseñanza basadas en simulaciones en estadísticas. Su estudio en la Universidad de Ciudad del Cabo mostró que este enfoque innovador es popular entre los estudiantes y efectivo para transmitir ideas estadísticas fundamentales a un amplio espectro de capacidades estudiantiles.

La integración de vba a la enseñanza de la programación lineal no sólo ofrece a los estudiantes una herramienta práctica para resolver problemas; también les brinda habilidades valiosas en programación y análisis de datos. Al familiarizarse con VBA de Microsoft Excel, los estudiantes aprenden sobre programación lineal y adquieren competencias transferibles que son altamente valoradas en el mercado laboral.

Aliane (2008) destaca el uso de Microsoft Excel como una plataforma alternativa que permite desarrollar herramientas de aprendizaje interactivas para la educación en control. Las hojas de cálculo modernas, como Excel, incluyen un lenguaje macro que permite la inclusión de código informático estándar. Esto permite a los usuarios incorporar programas específicos para gestionar y simular sistemas complejos, lo que lo convierte en una herramienta didáctica valiosa para la enseñanza de conceptos abstractos y complejos.

Justificación del estudio

La justificación de este estudio se basa en la necesidad de contar con una propuesta didáctica innovadora que complemente los métodos existentes para la resolución de problemas de programación lineal (ppl) en Microsoft Excel. Aunque existen diversos estudios, como los de Arboleda (2016), Bofil (2019) y Cruz (2007) que utilizan Microsoft Excel para solucionar ppl, la mayoría de ellos utilizan el complemento Solver. Este estudio se distingue de los mencionados pues se enfoca no sólo en encontrar soluciones, sino también en facilitar una comprensión más profunda y un aprendizaje efectivo de la programación lineal. La integración de vba para Excel supera a la función Solver en términos de personalización y flexibilidad. Además, profundiza en el conocimiento de

los estudiantes sobre vba y programación lineal, al tiempo que cultiva habilidades analíticas y de razonamiento lógico-deductivo transferibles a una amplia gama de tareas profesionales. Al aprender a programar en vba en Excel, siendo esta una herramienta que se encuentra en casi todos los ámbitos profesionales en la actualidad, los estudiantes desarrollan lógica algorítmica, mejorando su capacidad para estructurar y desglosar problemas complejos. Este enfoque didáctico brinda a los estudiantes una base sólida para la comprensión teórica y la aplicación práctica en situaciones reales, preparándolos para enfrentar desafíos tecnológicos y analíticos con confianza y competencia. Por lo tanto, este estudio busca presentar una propuesta para la enseñanza de la programación lineal y contribuir al desarrollo de competencias esenciales para el éxito en el entorno profesional contemporáneo.

Objetivo general

Desarrollar una propuesta didáctica para la enseñanza de la programación lineal mediante la construcción de una herramienta basada en el Método Simplex implementado en vba para Microsoft Excel, con el fin de mejorar el proceso de enseñanza y aprendizaje de la programación lineal en estudiantes de ingeniería y administración.

Objetivos específicos

Facilitar la comprensión conceptual y práctica de la programación lineal a través de la interacción directa con el código y la visualización inmediata de los resultados del algoritmo.

Promover el desarrollo de habilidades analíticas y de razonamiento lógico-deductivo en los estudiantes mediante la programación en vba, destacando la transferencia de estas competencias a diversas situaciones profesionales.

Contribuir a la literatura pedagógica en programación lineal, ofreciendo una herramienta que pueda ser adaptada y personalizada a diferentes niveles educativos y contextos de aprendizaje.

Proporcionar el código Nota completo del desarrollo del método simplex en vba, para fomentar su replicación, personalización y mejora continua por parte de la comunidad educativa y científica.

Limitantes

Es importante reconocer que el desarrollo del método simplex como una propuesta didáctica para la enseñanza de la programación lineal se basa única y exclusivamente en el uso de Microsoft Excel y vba, lo que puede restringir su aplicabilidad a entornos que no utilizan este *software*, limitando así su generalización. Además, en tanto no se pretende realizar una evaluación empírica integral de la propuesta, no pueden hacerse afirmaciones concluyentes sobre su efectividad en el mejoramiento del aprendizaje de la programación lineal, por lo que surge como una alternativa más a los métodos existentes. La efectividad de la propuesta también puede verse influenciada por la familiaridad previa de los usuarios con vba y Excel, lo que podría representar una barrera para aquellos sin experiencia previa. Además, la diversidad de estilos de aprendizaje entre los estudiantes sugiere que la herramienta podría no ser universalmente efectiva para todos los usuarios. Estas limitaciones deben ser consideradas al interpretar los resultados y evaluar la aplicabilidad de la herramienta en diferentes contextos educativos.

Metodología

Este estudio tiene un enfoque cualitativo, ya que está centrado en desarrollar y describir una herramienta pedagógica para la enseñanza de la programación lineal. La metodología cualitativa es adecuada para explorar en profundidad cómo los estudiantes interactúan con la herramienta y cómo afecta su aprendizaje y comprensión del tema. Dado que la propuesta describe el desarrollo y la implementación de una herramienta pedagógica en un momento específico, este tipo de estudio recoge datos en un único punto en el tiempo, en lugar de seguir a los mismos sujetos a lo largo del tiempo y, aunque la propuesta actual es transversal, también abre la puerta a futuros estudios longitudinales. Tales estudios podrían seguir a los estudiantes a lo largo de un periodo, para ver cómo la implementación de la herramienta afecta su aprendizaje y su retención de conocimientos a largo plazo.

De la misma manera, si se decide incorporar la recopilación y análisis de datos numéricos, como resultados de exámenes, tasas de retención de estudiantes, o estadísticas de uso de la herramienta, en el futuro el estudio podría tener, también, un componente cuantitativo. Esto sería útil para medir de manera más objetiva la eficacia de la herramienta.

Actualmente, la metodología es de tipo cualitativo y transversal, pero tiene el potencial de

expandirse a metodologías longitudinales y cuantitativas, dependiendo de cómo se elija implementar y evaluar la herramienta en el futuro.

Antecedentes

La programación lineal, como disciplina matemática, ha sido una herramienta esencial para la toma de decisiones y la optimización desde mediados del siglo xx. Su relevancia en diversos campos ha llevado al desarrollo de métodos y técnicas que faciliten su comprensión y aplicación.

El método simplex fue creado en 1947 por el estadounidense George Bernard Dantzig y el ruso Leonid Vitalievich Kantorovich, con el ánimo de concebir un algoritmo capaz de solucionar problemas de m restricciones y n variables. Se lo considera uno de los algoritmos más importantes de la historia y hoy por hoy sigue siendo la base en la que se fundamenta la mayor parte de los solucionadores de modelos de programación lineal (Salazar, 2019). Aunque la programación lineal como concepto ya había sido formulada anteriormente, el método simplex ofreció una técnica sistemática y eficiente para encontrar soluciones óptimas (Martínez, 2013). A pesar de la aparición de otros métodos con el transcurso de los años, el simplex sigue siendo ampliamente utilizado debido a su robustez y eficiencia en una amplia variedad de problemas.

Uso previo de herramientas computacionales para la enseñanza de la programación lineal

Con la evolución de la tecnología y la computación, la enseñanza de la programación lineal ha experimentado cambios significativos. Inicialmente, los problemas se resolvían manualmente o con la ayuda de calculadoras básicas. Sin embargo, tras el advenimiento de las computadoras en los años sesenta y setenta, comenzaron a desarrollarse *software* especializados que permitían resolver problemas más complejos y grandes. Paquetes como lindo, cplex y gams se convirtieron en herramientas estándar en la academia y la industria. Estos programas no sólo permiten resolver problemas, sino que también ofrecen una plataforma para la enseñanza y el aprendizaje, facilitando la visualización y la comprensión de conceptos abstractos. Estos paquetes de *software* han evolucionado y se han mantenido actualizados a lo largo de los años, y continúan siendo extensamente

utilizados en la investigación, la industria y la educación para abordar problemas de optimización complejos. Por otro lado, para Windows aparece el *tora*, un *software* educativo empleado para resolver problemas en operaciones de investigación (IO). La sigla “*tora*” proviene de “TOols for Research in Operations”, que se traduce como “Herramientas para la Investigación en Operaciones” (Salazar, 2019). Es muy usado en cursos académicos y por profesionales para modelar y resolver problemas de IO.

Beneficios y limitaciones de las herramientas tradicionales

Las herramientas tradicionales, como el método gráfico o el tabular, ofrecen una introducción básica y conceptual a la programación lineal. Son excelentes para enseñar los fundamentos y permiten a los estudiantes visualizar soluciones y entender la estructura de los problemas. Sin embargo, presentan limitaciones significativas. Por ejemplo, el método gráfico es útil sólo para problemas con dos variables y el método tabular puede volverse tedioso y propenso a errores cuando se trata de problemas más grandes.

Por otro lado, las herramientas computacionales tradicionales, aunque poderosas, a menudo requieren una curva de aprendizaje empinada. Además, su costo y la necesidad de licencias pueden operar como barreras para su adopción en algunas instituciones educativas.

Mientras que las herramientas tradicionales han sido fundamentales para la enseñanza de la programación lineal, la evolución de la tecnología y las necesidades cambiantes de los estudiantes han llevado a la búsqueda de alternativas más modernas, flexibles y accesibles, como Microsoft Excel y vba.

Desde su concepción, Microsoft Excel ha sido una herramienta revolucionaria en el mundo de la informática y la gestión de datos. Su diseño basado en celdas, organizado en filas y columnas, lo convierte en una matriz que facilita la captura, organización y análisis de datos de manera intuitiva y eficiente. En el contexto de la programación lineal, uno de los puntos fuertes de Excel es su capacidad para manejar un gran número de variables sin restricciones significativas. Es cierto que existen limitantes técnicas en cuanto al número de filas y columnas. Según Microsoft (2023) Excel puede manejar 1 048 576 filas y 16 384 columnas, límites lo suficientemente amplios como para satisfacer las necesidades de la mayoría de los usuarios.

La programación lineal es una herramienta esencial para la toma de decisiones y la optimización en diversos campos. El método simplex, en particular, ha sido un algoritmo estándar para resolver problemas de programación lineal desde su introducción. Sin embargo, la implementación y enseñanza de este método requieren herramientas adecuadas que faciliten su comprensión y aplicación. Aquí es donde la combinación de Microsoft Excel y vba se presenta como una solución poderosa y versátil.

Excel como la puerta de entrada y salida de datos

Microsoft Excel, con su diseño basado en una matriz de celdas, ofrece un entorno intuitivo para la entrada y salida de datos. Los usuarios pueden fácilmente introducir coeficientes, restricciones y funciones objetivo en una hoja de cálculo de Excel, aprovechando su estructura tabular. Esta disposición matricial es especialmente útil para representar problemas de programación lineal, donde las relaciones entre variables, restricciones y objetivos son intrínsecas.

Además, Excel proporciona una visualización clara de los datos, permitiendo a los usuarios ver rápidamente las relaciones y los patrones. Una vez que se ha resuelto un problema utilizando el método simplex, los resultados pueden presentarse de manera ordenada y estructurada en la misma hoja de cálculo, lo que facilita su interpretación y análisis.

VBA como motor de cálculo y automatización

Mientras que Excel sirve como interfaz para la entrada y salida de datos, vba trabaja como el motor que actúa detrás de la interfaz gráfica de la hoja de cálculo, permitiendo a los usuarios crear macros y scripts personalizados para automatizar tareas y realizar cálculos complejos.

Al utilizar vba para implementar el método simplex, se pueden crear soluciones personalizadas que se adapten a las necesidades específicas de un problema. Los usuarios pueden definir y ajustar parámetros, establecer criterios de parada y, lo más importante, programar el algoritmo del método simplex para encontrar soluciones óptimas. Además, con vba es posible incorporar características adicionales, como la identificación de

soluciones alternativas o la realización de análisis de sensibilidad.

Desarrollo de la propuesta

Como menciona Duart (2005, citado en Ferro, Martínez y Otero, 2009), las nuevas tecnologías de la información (tic) permiten un acceso más rápido y eficaz de docentes y estudiantes a la información, reduciendo el grado de obsolescencia de la información y permitiendo un uso más eficiente de las distintas Notas informativas existentes en la red. Así, la enseñanza de la programación lineal ha evolucionado con el tiempo, adaptándose a las herramientas y tecnologías emergentes. En este contexto, la combinación de la investigación de operaciones, vba y Excel se presenta como una propuesta didáctica innovadora, que busca no sólo facilitar la comprensión de conceptos inherentes a los modelos de investigación operativa, sino también proporcionar habilidades prácticas y aplicables en el mundo real. Por ejemplo, posibilitan la creación de interfaces de usuario personalizadas que facilitan la entrada de datos y la programación de modelos que permiten, a su vez, la automatización de cálculos y procesos repetitivos en el procesamiento de datos para la optimización de las operaciones mediante la personalización de la programación lineal.

Las tic transforman sustancialmente formas y tiempos de interacción entre docentes y estudiantes, que pueden tener lugar tanto de forma sincrónica como asincrónica. Este hecho favorece e incrementa los flujos de información y la colaboración entre ellos más allá de los límites físicos y académicos de la universidad a la que pertenecen (Ferro et al., 2009).

Almenar (2009) menciona que la elección de vba en Excel para la enseñanza de programación lineal se fundamenta en varias razones. Primero, Excel es una herramienta ampliamente utilizada en el mundo profesional y académico, lo que facilita su acceso y familiaridad para los estudiantes. Además, vba permite automatizar tareas y personalizar funciones en Excel, convirtiéndose en una herramienta poderosa para resolver problemas complejos de programación lineal.

Asimismo, Torres (2016) hace énfasis en que la interfaz gráfica intuitiva de Excel permite a los estudiantes visualizar datos y resultados de manera clara y organizada. A diferencia de otros lenguajes de programación, vba en Excel no requiere un aprendizaje extenso de sintaxis, lo que facilita su adopción por parte de estudiantes que no tienen experiencia previa en programación.

Ulloa (2005) define al método simplex como “un método sistemático altamente eficiente que permite resolver rápidamente, mediante el uso de programas de computadoras, problemas muy grandes, con gran número de variables, de restricciones o de ambos”.

El método simplex es una técnica de resolución específica diseñada para abordar problemas de programación lineal (ppl) que involucran la optimización de una función lineal sujeta a restricciones lineales. A través del uso del método simplex es posible resolver una amplia variedad de problemas de programación lineal, incluyendo, pero no limitados a, los siguientes:

Maximización y minimización: como describe Weber (1984, citado en Alvarado, 2009), un problema de programación lineal trata de la maximización o minimización de una función lineal de varias variables primarias, llamada función objetivo, con sujeción a un conjunto de igualdades o desigualdades lineales denominadas restricciones, con la condición adicional de que ninguna de las variables puede ser negativa. Puede utilizarse para maximizar beneficios, ingresos u otros objetivos, así como para minimizar costos, gastos o recursos utilizados.

Modelo de asignación: Shen (2007) describe en su investigación el uso del método simplex en la solución de un modelo de asignación dinámica dirigido a optimizar el tráfico en casos de evacuación de emergencia. Los modelos de asignación se utilizan para asignar eficientemente recursos limitados a una serie de tareas o actividades, minimizando o maximizando una función objetivo.

Modelo de transporte: Flores (2021) formula y resuelve mediante el uso de un complemento de Microsoft Excel llamado Solver un modelo matemático de programación lineal de transporte para la empresa Holcim S. A.; toma en cuenta las unidades o cantidad de sacos de cemento disponibles en las plantas productoras para enviarlos a las distintas distribuidoras. Es importante mencionar que la función Solver utiliza el método simplex para encontrar soluciones óptimas a problemas lineales. En los problemas de transporte, el método simplex se emplea para determinar la forma más económica de transportar productos desde múltiples Notas a múltiples destinos, minimizando los costos de transporte o maximizando los ingresos asociados con el transporte.

Problemas de la estabilidad del suelo: Karaulov (2021) estudia cómo este tipo de problemas son formulados como tareas de programación lineal; se demuestra que los sistemas de ecuaciones da-

dos son lineales con respecto a las incógnitas y pueden resolverse utilizando el método simplex, comparándolo con esquemas clásicos para calcular la estabilidad del suelo, se muestra que los resultados obtenidos por el método simplex son los más confiables.

Problemas de flujo máximo costo mínimo: Dadush (2020) ofrece una visión técnica de los análisis suavizados del método simplex de vértice sombra para la programación lineal (LP). Se revisan primero las propiedades del método simplex de vértice sombra y su geometría asociada. La discusión sobre el análisis suavizado comienza con un análisis del algoritmo de camino más corto sucesivo para el problema de flujo máximo de mínimo costo bajo perturbaciones objetivas, una clásica instancia del método simplex de vértice sombra. Luego, se pasa a la programación lineal general y se ofrece un análisis de un algoritmo basado en el vértice sombra para la programación lineal bajo perturbaciones gaussianas de restricciones. El método simplex se utiliza en problemas de flujo máximo para determinar la cantidad máxima de flujo que puede circular a través de una red o sistema, minimizando o maximizando el flujo de acuerdo con restricciones de capacidad y demanda.

Problemas de finanzas y economía: en finanzas, el método simplex puede ser utilizado para optimizar carteras de inversión, gestionar riesgos, como también en la planificación financiera. En economía, se aplica para resolver problemas de asignación de recursos, producción y costos, y en la teoría de juegos, entre otros.

Por lo anterior, el aprendizaje y desarrollo del método simplex resulta una herramienta fundamental para resolver una amplia gama de problemas en diferentes campos y aplicaciones. Su capacidad para manejar restricciones y objetivos lineales lo hace una técnica esencial para la toma de decisiones informadas y eficientes en situaciones del mundo real. Principio del formulario

Taha (2012) refiere que el modelo algebraico en que se visualiza un ppl, en general con n variables y m restricciones, se contempla en el siguiente formato genérico:

$$\text{Maximizar o Minimizar la función } Z : \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

La maximización o minimización están sujetas a ciertas restricciones:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j [\leq, \geq, =] b_i, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

Para el desarrollo del método simplex en vba, dividiré la explicación del algoritmo en tres momentos previos. Al final del documento se anexa el código con todos los procedimientos utilizados para el desarrollo de esta solución, a fin de que puedan ser replicados y personalizados por el estudiante.

Figura 1.
Momentos del desarrollo de la propuesta.



Nota: elaboración propia.

Definición de variables y restricciones. En un primer momento, una vez formulado el modelo PL, el algoritmo simplex inicia conociendo el número de variables (n) y el número de restricciones (m) para poder generar una subrutina que permita capturar el modelo de ppl. Para ello, se utilizarán las celdas B2 para el número de variables y B4 para el número de restricciones; en todo momento estas celdas funcionarán para la entrada de dichos datos. Es muy importante establecer que en el código se utiliza la notación matricial para referir las celdas de Excel, es decir, *Celda (fila, columna)*, por lo que tendríamos que la celda B2=Celda (2,2) y la celda B4=Celda (4,2).

Figura 2.
Introducción de datos iniciales.
Nota: elaboración propia.

La figura 2 nos muestra la forma en que se define el número de variables y restricciones del modelo, contándose con un botón "*Capturar Modelo*"; la subrutina o macro asignada al botón se lla-

ma "*Iniciar*".

La subrutina "*Iniciar*" automatiza la generación de la estructura de captura del modelo algebraico de PL propuesto por Taha (2012). Dicha subrutina está diseñada para configurar una hoja de cálculo Excel destinada al análisis de modelos de programación lineal utilizados por el método simplex. Comienza limpiando la hoja de cálculo mediante otra subrutina denominada "*Limpiar*" y luego recopila el número de variables $nVar$ y de restricciones $nRestricciones$ del modelo a partir de las celdas específicas B2 y B4. Si alguno de estos valores es cero, se solicita al usuario que introduzca un número válido. Posteriormente, la subrutina procede a configurar la hoja para la entrada del modelo. Esto incluye el establecimiento de áreas para la función objetivo y las restricciones, utilizando bucles *For* para generar dinámicamente las celdas correspondientes a las variables y las restricciones. Además, se hace un llamado a la subrutina "*Desigualdad*" dentro de "*Iniciar*"; ésta se utiliza para configurar validaciones de entrada en las celdas de las restricciones, permitiendo al usuario elegir entre desigualdades como $\leq$, $=$, o $\geq$. Ello garantiza que las entradas de las restricciones sean consistentes con los requisitos del modelo de programación lineal. Finalmente, la subrutina culmina con la creación y configuración de un botón "*Resolver*" en la hoja de cálculo, que, al ser pulsado, ejecutará la subrutina "*Matriz_Inicial*" para procesar los datos ingresados en el modelo. Este enfoque hace que la herramienta sea interactiva y fácil de utilizar por los usuarios, permitiéndoles introducir y modificar de forma eficiente modelos de programación lineal en Excel.

Código VBA subrutina *Iniciar*

Sub Iniciar()

```
Dim i, j, Fila, Columna As Integer
Dim nVar As Integer
Dim nRestricciones As Integer
Call Limpiar
nVar = Cells(2, 2).Value
nRestricciones = Cells(4, 2).Value
If nVar = 0 Then
    MsgBox "Introduzca el número de Variables del modelo"
    Range("B2").Select
Else
    If nRestricciones = 0 Then
        MsgBox "Introduzca el número de Restricciones del modelo"
        Range("B4").Select
    Else
        Range("A7").Select
    End If
End If
```

```

vo:" ActiveCell.FormulaRIC1 = "Función Objeti-
vo:"
Call Celda_Captura(7, 2, "D")
Range("C7").Select
ActiveCell.FormulaRIC1 = "Z="
Range("B9").Select
ActiveCell.FormulaRIC1 = "Sujeto a:"
Call Desigualdad(7, 2, "Max,Min", "Max")
For i = 1 To nVar
    Cells(6, 3 + i).Value = "x" & i
    Call Celda_Captura(7, 3 + i, "D")
    Cells(9, 3 + i).Value = "x" & i
Next i
For i = 1 To nRestricciones
    Cells(9 + i, 2).Value = "Restricción " & i
    For j = 1 To nVar
        Call Celda_Captura(9 + i, 3 + j, "D")
    Next j
    Call Desigualdad(9 + i, 3 + nVar + 1,
    "<=,=,>=", "<=")
    Call Celda_Captura(9 + i, 3 + nVar + 2, "D")
Next i
ActiveSheet.Shapes.Range(Array(1)).Select
Selection.Copy
Cells(9 + nRestricciones + 2, 1).Select
ActiveSheet.Paste
Selection.OnAction = "Matriz_Inicial"
Selection.ShapeRange(1).TextFrame2.TextRange.Characters.Text = "Resolver"
Selection.ShapeRange(1).Name = "Boton"
Range("B7").Select
End If
End If
End Sub

```

La *captura del modelo algebraico* de ppl constituye el segundo momento. Como se observa en la figura 3, en la celda (7,2) se establece el objetivo, esto es, si se trata de maximización o minimización. Asimismo, a partir de la celda (7,4) y hasta la celda (7,4+n-1) se establecen los coeficientes de las variables en la función objetivo. Para las restricciones, se toma la celda (10,4) como celda inicial hasta la celda (10+m-1,4+n-1) como celda final de la matriz de coeficientes de las restricciones. Los signos de desigualdad comenzarán en la celda (10,4+n) hasta la celda (10+m-1,4+n). Por último, se considera la celda (10,4+n+1) como el inicio del vector y la celda (10+m-1,4+n+1) como el final, correspondiente al lado derecho de las desigualdades. Es muy importante identificar las celdas de captura que dependen directamente del número de variables y restricciones, dado que es un proceso que se automatizará mediante código VBA.

Figura 3.
Estructura de captura del modelo.

	x1	x2	
Función Objetivo: Max	0.00	0.00	Z=
Sujeto a:			
Restricción 1	0.00	0.00	<= 0.00
Restricción 2	0.00	0.00	<= 0.00

Nota: elaboración propia.

Supongamos un problema simple como ya se ha planteado, es decir, dos variables con dos restricciones.

$$\begin{aligned}
 \text{Max } Z &= 2x_1 + 3x_2 \\
 \text{S. a. } x_1 + 4x_2 &\geq 20 \\
 2x_1 + 3x_2 &\leq 30 \\
 x_1, x_2 &\geq 0
 \end{aligned}$$

Figura 4.
Modelo algebraico de PPL capturado

	x1	x2	
Número de Variables: 2			
Número de Restricciones: 2			
Función Objetivo: Max	2.00	3.00	Z=
Sujeto a:			
Restricción 1	1.00	4.00	>= 20.00
Restricción 2	2.00	3.00	<= 30.00

Nota: elaboración propia.

Una vez capturado el ppl, se genera el tercer momento de preparación previo al desarrollo del método simplex. Se hace el llamado a la subrutina "*Matriz_Inicial*", la cual se encarga de generar la matriz inicial simplex. Sin embargo, antes de continuar, se debe entender que, en el contexto del método simplex en la programación lineal, las holguras positivas, las holguras negativas y las variables artificiales son conceptos esenciales para transformar un problema de programación lineal en una forma que pueda ser resuelta utilizando el algoritmo simplex.

Como describe Frederick (2010), el procedimiento algebraico se basa en la solución de sistemas de ecuaciones. Por lo tanto, el primer paso para preparar el método simplex es convertir las restricciones funcionales de desigualdad en restricciones de igualdad equivalentes. A continuación, se explica cada uno de los conceptos mencionados.

Holguras positivas (variables de holgura). Cuando una restricción es de tipo "menor o igual que" ($\leq$),

se añade una variable de holgura positiva denotada con la variable +S₁, para convertir la desigualdad en una ecuación. Esta variable representa la “holgura” o el “espacio extra” disponible en esa restricción. Por ejemplo, considerando la restricción $x_1 + 4x_2 \leq 20$, al agregar una variable de holgura S₁, la restricción se convierte en $x_1 + 4x_2 + S_1 \leq 20$, donde S₁ es la cantidad de “holgura” o “recurso no utilizado”. Así, el número de variables de holgura positivas dependerá del número de restricciones “menores o iguales”. Las variables de holgura positivas formarán parte de la solución inicial.

Holguras negativas (variables de exceso). Cuando una restricción es de tipo “mayor o igual que” ($\geq$), se introduce una variable de holgura negativa (o variable de exceso) para convertir la desigualdad en una ecuación. Esta variable representa el “exceso” en esa restricción. Por ejemplo, en una segunda restricción $2x_1 + 3x_2 \geq 5$, al agregar una variable de exceso h₁, la restricción se convierte en $2x_1 + 3x_2 - h_1 = 5$, donde h₁ es la cantidad en que la combinación de x_1 y x_2 excede el valor de 5.

Variables artificiales. Las variables artificiales se introducen para manejar restricciones que no tienen una solución básica factible inicial obvia. Específicamente, se utilizan para restricciones de tipo “igual a” (=) o “mayor o igual que” ($\geq$) cuando no se puede identificar una solución básica factible inicial. Estas variables permiten comenzar el método simplex en una solución básica factible, aunque su objetivo es que, en la solución óptima, tengan un valor de cero. Si una variable artificial tiene un valor positivo en la solución óptima, ello indica que el problema original no tiene solución factible. Por ejemplo, en el caso de la restricción $2x_1 + 3x_2 = 6$, se podría introducir una variable artificial A₁ para representar una solución básica factible inicial, aunque el objetivo es que A₁ sea cero en la solución final. De manera que, en caso de que la restricción sea del tipo “igual a”, por ejemplo, $2x_1 + 3x_2 = 6$, la restricción quedaría $2x_1 + 3x_2 + A_1 = 6$; por otro lado, si la restricción es del tipo “mayor o igual que”, por ejemplo, $2x_1 + 3x_2 \geq 5$, la restricción quedaría $2x_1 + 3x_2 + A_1 - h_1 = 5$, aplicando la variable de holgura negativa. Las variables artificiales formarán parte de la solución inicial.

Winston (2004) argumenta la importancia de mencionar que, al introducir estas variables, se debe ajustar la función objetivo para garantizar que las variables artificiales no afecten la solución óptima. Para el método simplex, esto se logra asignando un coeficiente muy grande (en el caso de minimización) o uno muy pequeño (en el caso de maximización) a las variables artificiales y un

coeficiente de cero en el caso de las variables de holgura en la función objetivo.

En el ejercicio de ejemplo se intenta maximizar la función Z; por lo tanto, se asigna un valor de -10000 al coeficiente de la variable artificial. Queda de la forma siguiente:

$$\text{Max } Z = 2x_1 + 3x_2 - 10000A_1 + 0h_1 + 0S_1$$

$$\begin{aligned} \text{S. a.} \quad & x_1 + 4x_2 + A_1 - h_1 = 20 \\ & 2x_1 + 3x_2 + S_1 = 30 \\ & x_1, x_2 \geq 0 \end{aligned}$$

Igualando a cero la función objetivo

$$Z - 2x_1 - 3x_2 + 10000A_1 - 0h_1 - 0S_1 = 0$$

$$\begin{aligned} \text{S. a.} \quad & x_1 + 4x_2 + A_1 - h_1 = 20 \\ & 2x_1 + 3x_2 + S_1 = 30 \end{aligned}$$

Así, la automatización del método mediante la subrutina “*Matriz_Inicial*” en código VBA generan la siguiente tabla inicial del método simplex, iniciando en la fila 10+m+2, columna 4, en tanto la posición final depende de las variables de holgura positivas, negativas y artificiales para los valores de la matriz inicial, quedando de la siguiente manera:

Figura 5.

Matriz inicial

	x1	x2	A1	h1	S1	Solución
Z	-2	-3	10000	0	0	0
A1	1	4	1	-1	0	20
S1	2	3	0	0	1	30

Nota: elaboración propia.

Para obtener una solución inicial, se utilizan operaciones con reglones de las variables artificiales, a fin de que su coeficiente sea 1 y todos los elementos de la columna sean 0, en este caso, sólo la fila de la función objetivo, tal y como se realiza en el método de Gauss - Jordán.

Figura 6.

Matriz inicial con solución básica.

	x1	x2	A1	h1	S1	Solución
Z	-10002	-40003	0	10000	0	-200000
A1	1	4	1	-1	0	20
S1	2	3	0	0	1	30

Nota: elaboración propia.

La subrutina privada encargada de realizar la matriz inicial con una solución básica es “*Matriz_*

Inicial”,

A continuación, se presenta el código vba de esta subrutina, que resulta ser un componente clave para configurar y resolver problemas de programación lineal utilizando el método simplex en una hoja de cálculo Excel. Su funcionamiento puede describirse atendiendo los siguientes pasos:

Se definen varias variables para manejar el número de variables nV , restricciones nR , así como para contar holguras, variables artificiales y otros componentes del modelo.

El código vuelve a leer los valores de las variables y restricciones directamente de la hoja de cálculo, aunque bien podrían ser parámetros de entrada.

Se preparan matrices y arreglos para representar la matriz del problema, etiquetas para filas y columnas, adaptándose al número de variables y restricciones.

El tipo de cada restricción ($\leq$, $=$, $\geq$) se identifica mediante bucles, para configurar las holguras y variables artificiales correspondientes.

Dependiendo de si el problema es de minimización o maximización, se establecen los coeficientes adecuados en la matriz.

La matriz se completa con los coeficientes de las restricciones y la función objetivo, incorporando las condiciones para holguras y variables artificiales.

Si el modelo incluye variables artificiales, se realiza un ajuste en la matriz con un valor ‘M’ grande, un enfoque común en el método simplex para tratar ciertas restricciones.

Finalmente, la matriz preparada se pasa a otra subrutina “*SimplexM*”, a fin de realizar el desarrollo del método simplex.

“*Matriz_Inicial*” es una subrutina estructurada diseñada para preparar y configurar todos los aspectos inherentes a un problema de programación lineal para su posterior resolución mediante el método simplex. Desde la preparación de la matriz hasta el manejo de variables artificiales y la interacción con la interfaz de usuario, esta subrutina juega un papel crucial en el establecimiento de las bases que permitan una ejecución eficiente y correcta del algoritmo de optimización.

Código VBA subrutina *Matriz_Inicial*

Private Sub Matriz_Inicial()

```
Dim nV, nR, i, j, Ren, Col As Integer
Dim nIgual, nMenor_Igual, nMayor_Igual As Integer
Dim nArtificiales As Integer
Dim nHolguras As Integer
Dim nHolguras_art As Integer
Dim nFilas, nColumnas As Integer
Dim cDesigualdad As String
Dim Valor_M As Double
Dim nMultiplicador As Integer
Dim n_Ms As Integer
Dim nCol_Pivote, nRen_Pivote As Integer
Dim nInverso As Double
Dim lShowTbl As Boolean
nTab = 0
nV = Cells(2, 2).Value
nR = Cells(4, 2).Value
nHolguras = 0
nHolguras_art = 0
nArtificiales = 0
nIgual = 0
nFilas = nR + 1
ReDim Filas(nFilas) As String
If Cells(7, 2).Value = "Min" Then
Filas(1) = "-Z"
Else
Filas(1) = "Z"
End If
For i = 1 To nR
cDesigualdad = Cells(9 + i, 3 + nV + 1).Value
If cDesigualdad = "<=" Then
nHolguras = nHolguras + 1
Filas(i + 1) = "S" & nHolguras
Else
If cDesigualdad = "=" Then
nArtificiales = nArtificiales + 1
Filas(i + 1) = "A" & nArtificiales
Else
nArtificiales = nArtificiales + 1
Filas(i + 1) = "A" & nArtificiales
nHolguras_art = nHolguras_art + 1
End If
End If
Next i
nColumnas = nV + nHolguras + nArtificiales + nHolguras_art + 1
ReDim Columnas(nColumnas) As String
ReDim Matriz(nFilas, nColumnas) As Double
i = 1
nHolguras = 0
nHolguras_art = 0
nArtificiales = 0
j = 1
While j <= nColumnas
If j = nColumnas Then
Columnas(j) = "Solución"
```

```

Else
If j <= nV Then
  Columnas(j) = "x" & j
Else
  cDesigualdad = Cells(9 + i, 3 + nV + 1).Value
  If cDesigualdad = "<=" Then
    nHolguras = nHolguras + 1
    Columnas(j) = "S" & nHolguras
  Else
    If cDesigualdad = "=" Then
      nArtificiales = nArtificiales + 1
      Columnas(j) = "A" & nArtificiales
    Else
      nArtificiales = nArtificiales + 1
      Columnas(j) = "A" & nArtificiales
      nHolguras_art = nHolguras_art + 1
      j = j + 1
      Columnas(j) = "h" & nHolguras_art
    End If
  End If
  i = i + 1
End If
End If
j = j + 1
Wend
For Ren = 1 To nFilas - 1
  Col = 1
  While Col <= nColumnas - 1
    cDesigualdad = Cells(9 + Ren, 3 + nV + 1).Value
    If Col <= nV Then
      Matriz(Ren + 1, Col) = Cells(9 + Ren, 3 + Col)
    Else
      If Filas(Ren + 1) = Columnas(Col) Then
        Matriz(Ren + 1, Col) = 1
      Else
        If (cDesigualdad = ">=" And Mid(Columnas(Col), 1, 1) = "h") Then
          Matriz(Ren + 1, Col) = -1
        Else
          Matriz(Ren + 1, Col) = 0
        End If
      End If
    End If
    Col = Col + 1
  Wend
  Matriz(Ren + 1, nColumnas) = Cells(9 + Ren, 3 + nV + 2).Value
Next Ren
Valor_M = 10000
If nArtificiales > 0 Then
  FrmDatos.Show
  Valor_M = Cells(1, 2).Value
End If
If Cells(7, 2).Value = "Min" Then
  nMultiplicador = 1
Else
  nMultiplicador = -1

```

```

End If
For Col = 1 To nColumnas - 1
  If Col <= nV Then
    Matriz(1, Col) = Cells(7, 3 + Col).Value *
nMultiplicador
  Else
    If Mid(Columnas(Col), 1, 1) = "A" Then
      If Cells(7, 2).Value = "Min" Then
        Matriz(1, Col) = Valor_M * nMultipli-
cador
      Else
        Matriz(1, Col) = Valor_M * nMultipli-
cador * -1
      End If
    Else
      Matriz(1, Col) = 0
    End If
  End If
Next Col
Cells(8, 4).Select
Call Dibuja_Tabla(Matriz, Filas, Columnas,
nColumnas, nR)
If nArtificiales > 0 Then
  n_Ms = 0
  For i = 1 To nColumnas - 1
    If (i > nV) Then
      If (Mid(Columnas(i), 1, 1) = "A" And Matriz(1,
i) <> 0) Then
        n_Ms = n_Ms + 1
        nCol_Pivote = i
      Exit For
    End If
  End If
Next i
While n_Ms > 0
  For j = 2 To nFilas
    If Matriz(j, nCol_Pivote) = 1 Then
      nRen_Pivote = j
    End If
  Next j
  For i = 1 To nRen_Pivote - 1
    nInverso = Matriz(i, nCol_Pivote) * -1
    For j = 1 To nColumnas
      Matriz(i, j) = nInverso * Matriz(nRen_Pi-
vote, j) + Matriz(i, j)
    Next j
  Next i
  For i = nFilas To nRen_Pivote + 1 Step -1
    nInverso = Matriz(i, nCol_Pivote) * -1
    For j = 1 To nV + nR + 1
      Matriz(i, j) = nInverso * Matriz(nRen_Pi-
vote, j) + Matriz(i, j)
    Next j
  Next i
  n_Ms = 0
  For i = 1 To nColumnas - 1
    If (i > nV) Then
      If (Mid(Columnas(i), 1, 1) = "A" And Ma-

```

```

triz(l, i) <> 0) Then
    n_Ms = n_Ms + 1
    nCol_Pivote = i
    Exit For
End If
End If
Next i
Wend
Call Dibuja_Tabla(Matriz, Filas, Columnas,
nColumnas, nR)
End If
Call SimplexM(Matriz, Filas, Columnas,
nFilas, nColumnas)
End Sub

```

La macro “Matriz_Inicial” es una subrutina en código vba que genera la solución básica inicial y prepara la hoja de cálculo Excel para resolver un problema de programación lineal utilizando el método simplex. Recoge datos de entrada, como el número de variables y restricciones, configura matrices para la función objetivo y restricciones, y añade variables de holgura y artificiales según sea necesario. Determina si el problema es de maximización o minimización y ajusta los coeficientes de la función objetivo. Luego, dibuja una tabla inicial en la hoja de cálculo y aplica transformaciones para manejar variables artificiales en caso de que estén presentes. Una vez que obtiene la solución inicial, invoca otra subrutina llamada “SimplexM” para ejecutar el algoritmo simplex y encontrar la solución óptima al problema.

Una vez cubiertos los tres momentos iniciales de preparación, se cuenta con todos los elementos para el desarrollo del método simplex. El llamado a la subrutina o macro “SimplexM” desarrolla el método simplex, como se explicó previamente. Es necesario determinar la variable entrante en el sistema, lo que se realiza identificando la columna con el coeficiente más negativo en la fila de la función objetivo. La variable correspondiente a esta columna será la variable entrante a la base y la columna se denominará columna pivote. Asimismo, se debe determinar la variable saliente realizando la prueba del cociente mínimo, para lo que únicamente se utilizan los coeficientes positivos de las restricciones de la columna pivote a fin de dividir los valores correspondientes de la columna solución.

	x1	x2	A1	h1	S1	Solución
Z	-10002	-40003	0	10000	0	-200000
A1	1	4	1	-1	0	20
S1	2	3	0	0	1	30

Figura 7. Columna, fila y elemento pivote. Nota: elaboración propia.

En la fila Z, el valor más negativo se encuentra en la columna correspondiente a la variable x_2 ,

lo que indica que x_2 es la variable que entra en la base. Para determinar la variable que sale, calculamos los cocientes de los elementos del lado derecho con los de la columna de x_2 :

$$\frac{20}{4} = 5 \text{ y } \frac{30}{3} = 10.$$

El menor de estos cocientes es 5, que se encuentra en la fila de A_1 . Por lo tanto, A_1 es la variable que sale de la base. El cruce de la columna de x_2 y la fila de A_1 nos da el elemento pivote, que es el coeficiente en la intersección de la columna entrante y la fila saliente.

Una vez que se cuenta con el elemento pivote, se realizan operaciones de fila para hacer que el elemento pivote sea 1 y todos los otros elementos de la columna pivote sean 0.

Figura 10.

Operaciones de fila

	x1	x2	A1	h1	S1	Solución
Z	-1 1/4	0	10000 3/4	- 3/4	0	15
x2	1/4	1	1/4	- 1/4	0	5
S1	1 1/4	0	- 3/4	3/4	1	15

Nota: elaboración propia.

Al terminar de realizar las operaciones de fila, es necesario verificar que en la fila de Z (función objetivo) ya no existan valores negativos. Si éste es el caso, el método concluye, de lo contrario, realizamos otra vez el cuarto momento. Así, en la siguiente iteración la variable que entra es X_1 y la variable que sale es S_1 .

Figura 11.

Elección de la columna, fila y elemento pivote.

	x1	x2	A1	h1	S1	Solución
Z	-1 1/4	0	10000 3/4	- 3/4	0	15
x2	1/4	1	1/4	- 1/4	0	5
S1	1 1/4	0	- 3/4	3/4	1	15

Nota: elaboración propia.

Realizando las operaciones de renglón, se observa que ya no existen valores negativos en la fila de Z, por lo tanto, el método termina, obteniendo un valor óptimo para la maximización de la función $Z = 30$, con $x_1=12$ y $x_2=2$.

Código VBA subrutina *SimplexM*

```

Private Sub SimplexM(Matriz, Filas, Columnas, nFilas, nColumnas)
    Dim i, j, nNegativos, nCol_Pivote, nRen_Pivote, nTab As Integer
    Dim nPivote, nMenor, nInverso As Double
    Dim lPaso As Boolean
    Dim Solucion As String
    nTab = 2
    lPaso = True
    nNegativos = 0
    For i = 1 To nColumnas - 1
        If Matriz(1, i) < 0 Then
            nNegativos = nNegativos + 1
        End If
    Next i
    While nNegativos > 0
        nMenor = 0
        nCol_Pivote = 0
        For i = 1 To nColumnas - 1
            If Matriz(1, i) < nMenor Then
                nMenor = Matriz(1, i)
                nCol_Pivote = i
            End If
        Next i
        nRen_Pivote = 0
        nMenor = 1000000
        For j = 2 To nFilas
            If Matriz(j, nCol_Pivote) > 0 Then
                If (Matriz(j, nColumnas) / Matriz(j, nCol_Pivote)) < nMenor Then
                    nMenor = (Matriz(j, nColumnas) / Matriz(j, nCol_Pivote))
                    nRen_Pivote = j
                End If
            End If
        Next j
        If nRen_Pivote > 0 Then
            Filas(nRen_Pivote) = Columnas(nCol_Pivote)
            nPivote = Matriz(nRen_Pivote, nCol_Pivote)
            If nPivote <> 0 Then
                For j = 1 To nColumnas
                    Matriz(nRen_Pivote, j) = Matriz(nRen_Pivote, j) / nPivote
                Next j

                For i = 1 To nRen_Pivote - 1
                    nInverso = Matriz(i, nCol_Pivote) * -1
                    For j = 1 To nColumnas
                        Matriz(i, j) = nInverso * Matriz(nRen_Pivote, j) + Matriz(i, j)
                    Next j
                Next i

                For i = nFilas To nRen_Pivote + 1 Step -1
                    nInverso = Matriz(i, nCol_Pivote) * -1

```

```

                For j = 1 To nColumnas
                    Matriz(i, j) = nInverso * Matriz(nRen_Pivote, j) + Matriz(i, j)
                Next j
            Next i
            Call Dibuja_Tabla(Matriz, Filas, Columnas, nColumnas, nFilas - 1)

            nNegativos = 0
            For i = 1 To nColumnas - 1

                If Matriz(1, i) < 0 Then
                    nNegativos = nNegativos + 1
                End If

            Next i
            Else
                nNegativos = 0
                lPaso = False
            End If
        Else
            nNegativos = 0
            lPaso = False
        End If
    Wend
    If lPaso Then
        Solucion = "Solución: " & Chr(13) & Chr(13)
        Cells(9, 24 + nFilas - 1 + 3).Value = "Solución"
        nTab = 1
        For j = 1 To nFilas
            If j = 1 Then
                Cells(9 + nTab, 24 + nFilas - 1 + 3).Value = "Z="
                Cells(9 + nTab, 24 + nFilas - 1 + 4).Value = Abs(Matriz(j, nColumnas))
                Call Borde_Grueso(9 + nTab, 24 + nFilas - 1 + 4, "D")
                Solucion = Solucion & "      Z=" & Round(Matriz(j, nColumnas), 4) & Chr(13)
                nTab = nTab + 1
            Else
                If Mid(Filas(j), 1, 1) = "x" Then
                    Cells(9 + nTab, 24 + nFilas - 1 + 3).Value = Filas(j) & "= "
                    Cells(9 + nTab, 24 + nFilas - 1 + 4).Value = Matriz(j, nColumnas)
                    ' Call Borde_Grueso(9 + nTab, 4 + nR + 4, "D")
                    Solucion = Solucion & "      " & Filas(j) & "= " & Round(Matriz(j, nColumnas), 4) & Chr(13)
                    nTab = nTab + 1
                End If
            End If
        Next j
        MsgBox Solucion
    Else
        MsgBox "El Modelo no tiene solución"
    End If
End Sub

```

La subrutina “*SimplexM*” en vba está diseñada para ejecutar el método simplex. Ésta maneja meticulosamente el proceso de optimización lineal, desde la selección de variables pivote hasta la actualización de la matriz y la presentación de la solución óptima o la falta de ella. A continuación, se detalla la descripción del código en una serie de pasos:

Se definen múltiples variables para el manejo de la matriz del simplex, incluyendo contadores y variables para el pivote y otros elementos clave del proceso.

El código comienza revisando la primera fila de la matriz (*función objetivo*) para identificar elementos negativos, los cuales indican la necesidad de más iteraciones en el método simplex.

Se busca el elemento más negativo en la fila de costos. El índice de este elemento define la columna de pivote, que es la variable que entrará en la base de la solución.

Una vez identificada la columna de pivote, se busca en las filas, excluyendo la fila de costos, para encontrar la fila de pivote, es decir, aquella que determinará qué variable sale de la base. Esto se hace mediante la regla del mínimo, comparando las proporciones de los elementos en la columna de solución y la columna de pivote.

Si se encuentra una fila de pivote válida, la subrutina actualiza esta fila para que el elemento de pivote sea 1 y ajusta los demás elementos de la fila en consecuencia.

Se actualizan todas las otras filas de la matriz para que el elemento en la columna de pivote sea cero, lo que refleja el cambio en la base de la solución.

El proceso de encontrar un pivote y actualizar la matriz se repite hasta que no haya más elementos negativos en la fila Z de costos, lo que indica que se ha alcanzado la solución óptima.

Al finalizar el proceso, si se encuentra una solución, la subrutina muestra los valores de la función objetivo (Z) y las variables de decisión en un mensaje. En caso contrario, informa que el modelo no tiene solución.

Durante el proceso, la subrutina interactúa con la hoja de cálculo, llamando a las subrutinas “*Dibuja_Tabla*” y “*Borde_Grueso*” para dar formato y visualizar cada paso del método simplex y mostrar los resultados finales.

Una vez terminado el proceso de ejecución de la subrutina “*SimplexM*”, la hoja de cálculo mostrará los resultados como aparecen en la figura 8, con todo el desarrollo y la solución óptima del problema de programación lineal.

Figura 8.

Desarrollo completo y automatizado del método simplex.

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled "MÉTODO SIMPLEX". It contains a linear programming model with the following data:

	x1	x2		
Función Objetivo:	Max	Z =	3.00	3.00
Restricción 1:	1.00	4.00	=	20.00
Restricción 2:	2.00	3.00	=	30.00

The spreadsheet also displays the initial simplex tableau and subsequent iterations, including the final optimal solution where Z = 10.00, x1 = 2.00, and x2 = 3.00.

Nota: elaboración propia

Resultados

Una vez concluido el desarrollo completo y automatizado del método simplex, se pueden destacar los siguientes puntos:

Resolución automatizada de problemas: el código vba proporciona una solución automatizada para resolver problemas de programación lineal utilizando el método simplex. Esto permite a los estudiantes centrarse en la comprensión conceptual en lugar de en los cálculos manuales tediosos.

Visualización clara: al representar la matriz y las soluciones en Excel, los estudiantes pueden visualizar claramente cada paso del proceso, lo que facilita la comprensión.

Interactividad: los estudiantes pueden ingresar diferentes problemas y ver cómo se resuelven en tiempo real, lo que fomenta su aprendizaje activo.

Comparación de resultados académicos con y sin el uso de VBA

A menudo los estudiantes se sienten abrumados por los cálculos manuales y pueden cometer errores fácilmente, lo que lleva a una comprensión incorrecta del método simplex.

Como sugiere Djamila (2017) en su artículo “Excel spreadsheet in teaching numerical methods”, en el que discute la importancia de comprender los algoritmos de métodos numéricos para estudiantes universitarios, aunque el cálculo manual es importante para entender el procedimiento, puede ser tedioso y propenso a errores, especialmente cuando se considera el procedimiento de iteración utilizado en muchos métodos numéricos. El artículo se centra en cómo, con el uso de hojas de cálculo de Excel, se ofrece un nivel inicial de programación que puede ser utilizado por los estudiantes sin distracciones para escribir códigos. Esto sugiere que el uso de herramientas computacionales puede mejorar la comprensión de los estudiantes en áreas técnicas, lo cual podría ser extrapolable al aprendizaje del método simplex.

Al programar en vba, los estudiantes pueden centrarse en la lógica y la conceptualización del método simplex; bajo esta premisa, los errores de cálculo se reducen significativamente, lo que lleva a una mejor comprensión y a mejores resultados académicos.

Ventajas de la adaptabilidad y personalización del método para diferentes niveles educativos

Según Taha (2012), el método simplex se describe como una técnica matemática fundamental para resolver problemas de programación lineal. Su adaptabilidad y personalización lo hacen particularmente valioso en el ámbito educativo, donde los estudiantes de diferentes niveles pueden beneficiarse de su aplicación. A continuación, se desarrollan las ventajas mencionadas.

Flexibilidad: la programación en vba permite a profesores y estudiantes adaptar el método simplex a una variedad de problemas de programación lineal. Por ejemplo, en un nivel introductorio, el código puede simplificarse para resolver problemas con pocas variables y restricciones, facilitando la comprensión de los conceptos básicos. En niveles más avanzados, el mismo código puede expandirse para abordar problemas más complejos con múltiples restricciones y variables, proporcionando una experiencia de aprendizaje progresiva y desafiante.

Personalización: los profesores tienen la libertad de modificar el código vba para enfocarse en los aspectos específicos del método simplex más relevantes para sus cursos. Esto significa que pueden

diseñar ejercicios que resalten la importancia de ciertas técnicas matemáticas o que demuestren la aplicación del método simplex en contextos del mundo real, como la logística o la gestión de recursos.

Aplicabilidad en diferentes cursos: el método simplex no se limita a las clases de matemáticas. Se puede integrar en una amplia gama de cursos, que incluyen desde la toma de decisiones en la administración de empresas hasta la optimización en la ingeniería. La capacidad de adaptar el código vba a diferentes aplicaciones hace que sea una herramienta versátil y práctica en diversas disciplinas académicas.

Inclusión de funcionalidades adicionales: a medida que los estudiantes progresan en su educación, pueden encontrarse con conceptos más avanzados, como los de dualidad en programación lineal o la necesidad de abordar problemas de programación entera. El código vba puede ser enriquecido con estas funcionalidades adicionales, proporcionando una plataforma para que los estudiantes apliquen lo que han aprendido a situaciones más complejas y cercanas a la investigación avanzada o a las aplicaciones industriales.

La personalización y adaptabilidad del método simplex implementado a través de vba permiten una experiencia de aprendizaje dinámica y profundamente integrada con las necesidades y niveles de habilidad de los estudiantes. Esta flexibilidad es esencial en aras de prepararlos para aplicar la programación lineal en situaciones reales y complejas que encontrarán en sus carreras profesionales.

Conclusiones

La adopción de vba en la instrucción de matemáticas aplicadas responde a la necesidad actual de métodos educativos que enfatizan la interacción práctica y el aprendizaje significativo. Este trabajo contribuye a la diversificación de las estrategias pedagógicas y alienta la exploración de nuevas formas de integrar la tecnología en la educación. Destacamos la relevancia de la adaptabilidad tecnológica en la enseñanza, evidenciando cómo la programación en Excel con vba puede ser una herramienta eficaz en el proceso educativo. Este enfoque flexible permite una enseñanza personalizada que se alinea con los objetivos curriculares y fomenta la aplicación de conocimientos en escenarios reales y diversos.

La implementación de esta propuesta de en-

señanza se presenta como una alternativa pedagógica orientada a la mejor comprensión de la programación lineal, con un enfoque particular en los estudiantes de ingeniería y administración. Dicho método promueve un aprendizaje interactivo y centrado en el alumno, alejándose de las prácticas tradicionales centradas en la exposición del instructor.

Para apoyar la adaptación y mejora continua de este recurso educativo, se proporciona el código completo (desarrollado en su totalidad por el autor), anexando las subrutinas complementarias a los procesos principales descritos a lo largo de este documento. Con esto, reafirmo mi compromiso con una educación abierta y colaborativa, e invito a la comunidad educativa a participar activamente en la refinación e innovación de nuestras estrategias didácticas. Animo a los educadores a seguir explorando y ampliando el uso de herramientas tecnológicas que permitan enriquecer el aprendizaje y preparar a los estudiantes para los retos tecnológicos actuales y futuros. La interacción con el código y la visualización inmediata de los resultados fomentan una comprensión intuitiva de los conceptos. La capacidad de Excel para mostrar la tabla del simplex y otros elementos gráficos hace más tangible y accesible el proceso de optimización. Además, la automatización de los cálculos permite a los estudiantes profundizar en la teoría y las aplicaciones del método, más allá de la aritmética. La accesibilidad de Excel promueve la práctica independiente y el aprendizaje autodirigido. Así, no sólo se profundiza el conocimiento de los estudiantes sobre esta herramienta de *software* esencial, sino que también se cultivan habilidades de análisis y razonamiento lógico-deductivo transferibles a una amplia gama de tareas profesionales. Al aprender a programar en vba, los estudiantes ejercitan la lógica algorítmica, lo que mejora su capacidad para estructurar y desglosar problemas complejos en componentes manejables. Esta habilidad es fundamental para la resolución de problemas y la toma de decisiones. La programación fomenta un enfoque metódico para el análisis de situaciones, promoviendo un pensamiento sistemático y secuencial, pero también adaptable y creativo, al enfrentar desafíos inesperados. Además, el acto de programar puede revelar la belleza de la matemática aplicada, mostrando cómo las abstracciones numéricas y las fórmulas se traducen en soluciones prácticas y efectivas.

Por lo anterior, este estudio cumple con los objetivos de facilitar la comprensión de la programación lineal y fomentar habilidades analíticas valiosas a través de la implementación del método simplex en vba para Excel. Aunque las limita-

ciones reconocidas sugieren un alcance de aplicación específico, la contribución de este trabajo al campo educativo y su potencial para adaptarse y evolucionar con las necesidades cambiantes de estudiantes y profesionales, subrayan su valor y relevancia en la enseñanza contemporánea de la programación lineal.

Futuras investigaciones

Alentamos la continuación de la investigación en este campo, buscando formas innovadoras de explotar el potencial de herramientas tecnológicas en la enseñanza de la programación lineal, una disciplina con aplicaciones extensas y significativas en múltiples aspectos de la vida cotidiana y profesional.

Si bien el código presentado es funcional, siempre hay espacio para mejoras y optimizaciones. Sería beneficioso explorar la integración de interfaces gráficas más intuitivas, la incorporación de funciones adicionales o la adaptación del código a problemas más complejos. Además, sería interesante investigar la eficacia de esta herramienta en comparación con otros métodos de enseñanza o *software* dedicado. De la misma manera, la implementación de comentarios dentro del mismo podría facilitar su comprensión para aquellos menos familiarizados con vba. Aunado a ello, la realización de talleres o sesiones prácticas donde los estudiantes puedan modificar y jugar con el código podría enriquecer aún más su experiencia de aprendizaje.

Investigaciones futuras podrían incluir estudios empíricos que evalúen el impacto de esta herramienta en el rendimiento y la comprensión de los estudiantes, así como su capacidad para transferir habilidades aprendidas a problemas del mundo real.

Por último, se sugiere la integración de metodologías de aprendizaje mixto y enfoques de gamificación para examinar cómo estas estrategias pueden aumentar el compromiso y la retención de conocimientos en los estudiantes.

Referencias

- Aliane, N. (2008). Spreadsheet-based control system analysis and design [Focus on Education]. *Control Systems*, iee, 28, 108-113. <https://doi.org/10.1109/MCS.2008.927960Almenar>
- Alvarado Boirivant, J. (2009). La programación lineal aplicación de las pequeñas y medianas empresas. *Reflexiones*, 88(1), 89-105. Universidad de Costa Rica. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72912559007>
- Arboleda Molina, O., y Sotelo, S. (2016). Construcción de aplicativos de programación por restricciones en Microsoft Solver Foundation y Windows Azure. *Scientia Et Technica*, 21(4), 336-341. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Barr, G., y Scott, L. (2008). A new approach to teaching fundamental statistical concepts and an evaluation of its application at uct. <https://hdl.handle.net/10520/EJC99106>
- Bofill-Pérez, M., García-Noa, E., & Sarioeg-Toledo, Y. (2019). Optimización en la producción de surtidos de helados Alondra. *Tecnología Química*, 39(3), 508-523. Universidad de Oriente.
- Coll Serrano, V., y Blasco Blasco, O. (2010). El uso de gráficos interactivos en Excel para facilitar la comprensión de conceptos básicos de Estadística. *@tic. revista d'innovació educativa*, (5), 30-34. Universitat de València.
- Cruz T, E. A., Restrepo, J. H., y Medina V, P. D. (2007). Un problema logístico de ruteo de vehículos y una solución con Solver de Excel: Un caso de estudio. *Scientia Et Technica*, XIII(37), 369-372. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Dantzig, George (1963). *Linear Programming and Extensions*. Princeton University Press. <https://doi.org/10.1515/9781400884179>
- Djamila, H. (2017). Excel spreadsheet in teaching numerical methods. *Journal of Physics: Conference Series*, 890(1), 012093. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/890/1/012093>
- Ferro, C., Martínez, A. I., y Otero, M. C. (2009). Ventajas del uso de las tic en el proceso de enseñanza aprendizaje desde la óptica de los docentes universitarios españoles. *Educat: Revista Electrónica de Tecnología Educativa*, 29.
- Fuson, K. C., Carroll, W. M., y Drueck, J. V. (2000). Achievement results for second and third graders using the Standards-based curriculum Everyday Mathematics. *Journal for Research in Mathematics Education*, 31. https://globaljournals.org/eBooks/A_Trajectory_for_the_Teaching_and_Learning_of_the_Didactics_of_Mathematics_using ICT.pdf
- Karaulov, A., Nemtzev, D., Konkov, A., y Shekhov, V. (2021). Study of the soil stability theory problems by the simplex method. *Journal of Physics: Conference Series*, 2131(3), 032019. <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2131/3/032019>
- Longo, V., y Hernández Sancho, F. (2009). Excel como herramienta docente de las asignaturas de Microeconomía. *@tic. revista d'innovació educativa*, (3), 108-114. Universidad de Valencia. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=349532299017>
- López Noriega, M., Lagunes Huerta, C., y Herrera Sánchez, S. (2006). Excel como una herramienta asequible en la enseñanza de la Estadística. *Teoría de la Educación. Educación y Cultura en la Sociedad de la Información*, 7(1). Universidad de Salamanca.
- Martínez P. E. (2013). Un modelo de programación discreta para minimizar el costo de la transportación de cargas. *Economía y Desarrollo*, 149(1), 158-165. Universidad de La Habana.
- Microsoft (2023). Especificaciones y límites de Excel. <https://support.microsoft.com/es-es/office/especificaciones-y-l%C3%ADmites-de-excel-1672b34d-7043-467e-8e27-269d656771c3> Fecha de consulta: 01 de octubre, 2023
- Orozco, J. (2004). Uso Pedagógico de los programas Derive 6.1 y Cabri Geometry II plus, en las clases de Matemáticas. Proyecto de Innovaciones Tecnológicas en la enseñanza de las matemáticas y Ciencias. Colombia. URL: <http://www.scm.org.co/Subidos/855.Resumen.pdf>
- Salazar López, B. (2019, junio 11). Método Simplex. Ingeniería Industrial Online. <https://www.ingenieriaonline.com/investigacion-de-operaciones/metodo-simplex/>, Fecha de consulta: 05 de octubre 2023.
- Shen, W., Nie, Y., y Zhang, H. M. (2007). Dynamic Network Simplex Method for Designing Emergency Evacuation Plans. *Transportation Research Record*, 2022(1), 83-93. <https://doi.org/10.3141/2022-10>
- Taha, H. A. (2012). *Investigación de operaciones* (9a ed.). Pearson Educación. ISBN: 978-607-32-0796-6.
- Torres, M. (2016). *Aplicaciones vba con Excel*. Editorial Macro EIRL. ISBN 978-612-304-265-3, e-ISBN 978-612-304-349-0.
- Ulloa, L., y Protti, M. (2005). *Investigación de Operaciones*. Universidad Nacional a Distancia Costa Rica
- Winston, W. L. (2004). *Operations research: Applications and algorithms*. Brooks/Cole-Thomson Learning.

Anexo 1.

Subrutinas complementarias para el desarrollo del método simplex.

Declaración de variable pública *nTab*

Public *nTab* As Integer

Código VBA subrutina *Limpiar*

Sub Limpiar()

```
Range("A6:xl1000").Select
With Selection.Interior
    .Pattern = xlSolid
    .PatternColorIndex = xlAutomatic
    .ThemeColor = xlThemeColorDark1
    .TintAndShade = 0
    .PatternTintAndShade = 0
End With
Selection.Font.Bold = False
Selection.Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xl-
None
Selection.Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xl-
None
Selection.Borders(xlEdgeBottom).LineStyle =
xlNone
Selection.Borders(xlEdgeRight).LineStyle =
xlNone
Selection.Borders(xlInsideVertical).LineStyle
= xlNone
Selection.Borders(xlInsideHorizontal).Line-
Style = xlNone
Selection.ClearContents
With Selection.Validation
    .Delete
    .Add Type:=xlValidateInputOnly, Alert-
Style:=xlValidAlertStop, Operator _
:=xlBetween
    .IgnoreBlank = True
    .InCellDropdown = True
    .InputTitle = ""
    .ErrorTitle = ""
    .InputMessage = ""
    .ErrorMessage = ""
    .ShowInput = True
    .ShowError = True
End With
If ActiveSheet.Shapes.Count >= 3 Then
    ActiveSheet.Shapes.Range(Array("Boton")).
Select
    Selection.Delete
End If
Range("B2").Select
```

End Sub

Código VBA subrutina *Celda_Captura*

```
Private Sub Celda_Captura(F, C, Tipo)
Cells(F, C).Select
If Selection.Value = "" Then
    Selection.Value = 0
End If
Selection.Font.Bold = False
Selection.Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xl-
Continuous
Selection.Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xl-
Continuous
Selection.Borders(xlEdgeBottom).LineStyle =
xlContinuous
Selection.Borders(xlEdgeRight).LineStyle =
xlContinuous
If Tipo = "D" Then
    Selection.Style = "Comma"
    Selection.NumberFormat = "0.00"
Else
    Selection.NumberFormat = "# ?/?"
End If
With Selection.Validation
    .Delete
    .Add Type:=xlValidateDecimal, Alert-
Style:=xlValidAlertStop, Operator _
:=xlBetween, Formula1:="-1000000", For-
mula2:="1000000"
    .IgnoreBlank = True
    .InCellDropdown = True
    .InputTitle = ""
    .ErrorTitle = ""
    .InputMessage = ""
    .ErrorMessage = "Solo Valores Numéricos"
    .ShowInput = True
    .ShowError = True
End With
```

End Sub

Código VBA subrutina *Desigualdad*

```
Private Sub Desigualdad(F, C, Cadena, Valor)
Cells(F, C).Select
With Selection.Validation
    .Delete
    .Add Type:=xlValidateList, AlertStyle:=xl-
ValidAlertStop, Operator:= _
xlBetween, Formula1:=Cadena
    .IgnoreBlank = False
    .InCellDropdown = True
    .InputTitle = ""
    .ErrorTitle = ""
    .InputMessage = "" 'Cadena
    .ErrorMessage = "Tiene que incluir una
desigualdad : " & Cadena
    .ShowInput = True
```

```
.ShowError = True
End With
Cells(F, C).Value = Valor
End Sub
```

Código VBA subrutina *Dibuja_Tabla*

```
Private Sub Dibuja_Tabla(Matriz, Filas, Co-
lumnas, nColumnas, nR)
Dim i, Fil, Col As Integer
nTab = nTab + 1
For i = 1 To nColumnas
Cells(9 + nTab + (nR + 1) * nTab + 1, 3 + i).Value
= Columnas(i)
Call Borde_Grueso(10 + nTab + (nR + 1) * nTab
+ 1, 3 + i, "F")
Next i
For Fil = 1 To nR + 1
Cells(10 + nTab + (nR + 1) * nTab + Fil, 3).Value
= Filas(Fil)
For Col = 1 To nColumnas
Cells(10 + nTab + (nR + 1) * nTab + Fil, 3 +
Col).Value = Matriz(Fil, Col)
Call Celda_Captura(10 + nTab + (nR + 1) *
nTab + Fil, 3 + Col, "F")
Next Col
Next Fil
End Sub
```

Código VBA subrutina *Borde_Grueso*

```
Private Sub Borde_Grueso(F, C, Tipo)
Cells(F, C).Select
With Selection.Interior
.Pattern = xlSolid
.PatternColorIndex = xlAutomatic
.ThemeColor = xlThemeColorDark1
.TintAndShade = -4.99893185216834E-02
.PatternTintAndShade = 0
End With
Selection.Font.Bold = True
Selection.Borders(xlDiagonalDown).Line-
Style = xlNone
Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle =
xlNone
With Selection.Borders(xlEdgeLeft)
.LineStyle = xlContinuous
.Weight = xlMedium
End With
With Selection.Borders(xlEdgeTop)
.LineStyle = xlContinuous
.Weight = xlMedium
End With
With Selection.Borders(xlEdgeBottom)
.LineStyle = xlContinuous
```

```
.Weight = xlMedium
End With
With Selection.Borders(xlEdgeRight)
.LineStyle = xlContinuous
.Weight = xlMedium
End With
Selection.Borders(xlInsideVertical).LineStyle
= xlNone
Selection.Borders(xlInsideHorizontal).Line-
Style = xlNone
If Tipo = "D" Then
Selection.Style = "Comma"
Selection.NumberFormat = "0.00"
Else
Selection.NumberFormat = "# ?/?"
End If
If Selection.Value = "" Then
Selection.Value = 0
End If
With Selection.Validation
.Delete
.Add Type:=xlValidateDecimal, Alert-
Style:=xlValidAlertStop, Operator _
:=xlBetween, Formula1:="-1000000", For-
mula2:="1000000"
.IgnoreBlank = True
.InCellDropdown = True
.InputTitle = ""
.ErrorTitle = ""
.InputMessage = ""
.ErrorMessage = ""
.ShowInput = True
.ShowError = True
End With
End Sub
```

Derechos de Autor© 2023 López Martínez, Carlos Miguel



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.