

Artificio

Revista en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos
Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción
Universidad Autónoma de Aguascalientes, México.
Núm. 8 (2025) periodo julio-diciembre

e-ISSN
2992-7463
Site

[https://revistas.uaa.mx/
index.php/artificio](https://revistas.uaa.mx/index.php/artificio)



Zonificación del peligro de subsidencia mediante análisis condicional. Caso de estudio Valle de Aguascalientes

Conditional analysis for land subsidence hazard zoning: a case study in the Aguascalientes Valley

Hugo Luna-Villavicencio

Universidad Panamericana
Facultad de Ingeniería
ORCID: 0000-0002-6159-053X
hlunav@up.edu.mx

Recived: 2025-05-08
Accepted: 2025-05-20

Isaí Gerardo Reyes-Cedeño

Universidad Panamericana
Facultad de Ingeniería
ORCID: 0009-0002-4681-1311
igreyes@up.edu.mx

Raudel Padilla-Ceniceros

Universidad Panamericana
Facultad de Ingeniería
ORCID: 0000-0002-6278-7596
rpadillac@up.edu.mx

Michelle Ivonne López-Escobar

Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción
Universidad Autónoma de Aguascalientes
ORCID: 0009-0006-9383-0645
ivonneloes1309@hotmail.com

William Herbe Herrera-León

Tecnológico Nacional de México
Departamento de Ingenierías
ORCID: 0009-0008-4643-6260
wherrera@itteplic.edu.mx

Cómo citar este trabajo. *How to cite this paper.*

Luna-Villavicencio, H., Reyes-Cerdeño, I. G., Padilla-Ceniceros, R., López-Escobar, M. I., Herrera-León, W. H. (2025). Zonificación del peligro de subsidencia mediante análisis condicional. Caso de estudio Valle de Aguascalientes. *Artificio* (8), eArt.0802, 13-29.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES



Zonificación del peligro de subsidencia mediante análisis condicional. Caso de estudio Valle de Aguascalientes

Hugo Luna-Villavicencio · Isaí Gerardo Reyes-Cedeño ·
Raudel Padilla-Ceniceros · Michelle Ivonne López-Escobar ·
William Herbe Herrera-León

Resumen

La subsidencia inducida por el abatimiento del nivel freático representa una amenaza creciente para las ciudades asentadas en acuíferos sobreexplotados. Este estudio analiza el fenómeno en el Valle de Aguascalientes mediante un enfoque integral que combina análisis espacial, estadístico y probabilístico. A partir de datos de abatimiento piezométrico y deformación vertical del terreno, se desarrolló una zonificación de peligro compuesta por nueve clases, resultado de combinar tres niveles de abatimiento y tres de hundimiento.

Además de mapear los regímenes geotécnicos, se aplicó el Teorema de Bayes para estimar la probabilidad condicional de hundimiento bajo distintas condiciones de abatimiento. Los resultados indican que la probabilidad mínima de hundimiento moderado o severo es de 66.7 %, alcanzando hasta 91.9 % en zonas con alto abatimiento. Incluso en áreas sin abatimiento, el 75 % de los sitios presentan deformación, mientras que solo el 1.57 % del territorio se mantiene completamente estable desde el punto de vista hidrogeológico, sin abatimiento ni subsidencia.

Estos hallazgos indican que la relación entre el abatimiento y la subsidencia no es lineal ni exclusiva, y que factores como la consolidación acumulada, las propiedades litológicas y la heterogeneidad del subsuelo también inciden en el fenómeno. La metodología propuesta es transferible a otras regiones con riesgo de subsidencia, y ofrece una herramienta práctica para la gestión del riesgo, el monitoreo preventivo y la planificación urbana.

Palabras clave: *subsidencia, abatimiento, deformación del terreno, peligro, gestión de riesgos*

Abstract

Land subsidence caused by groundwater drawdown is an increasing threat to cities overlying overexploited aquifers. This study analyzes the phenomenon in the Aguascalientes Valley through a comprehensive approach combining spatial, statistical, and probabilistic analysis. Based on data from piezometric drawdown and vertical ground deformation, a risk zoning scheme was developed using nine geotechnical classes resulting from the combination of three levels of drawdown and three levels of land subsidence.

In addition to mapping geotechnical regimes, Bayes' Theorem was applied to estimate the conditional probability of subsidence under different drawdown conditions. Results indicate that the minimum probability of moderate or severe subsidence is 66.7%, increasing to 91.9% in areas with high drawdown. Even in areas without recent drawdown, 75% of sites exhibit ground deformation, while only 1.57% of the territory remains completely stable, with neither drawdown nor subsidence.

These findings suggest that the relationship between drawdown and subsidence is not linear nor exclusive, and that cumulative consolidation, lithological properties, and subsurface heterogeneity also play a significant role. The proposed methodology is transferable to other regions facing subsidence hazards and provides a practical tool for supporting risk management, preventive monitoring, and sustainable urban planning.

Keywords: *land subsidence, lowering of water table, land deformation, hazard, risk management*

INTRODUCCIÓN

El fenómeno de subsidencia en México se ha identificado en diversas ciudades como Aguascalientes, Celaya, Ciudad de México, Salamanca, San Luis Potosí, Morelia, Tepic, León (Chaussard et al., 2014; Cigna y Tapete, 2022; Figueroa-Miranda et al., 2018; INEGI, 2019, 2021, 2022). Este proceso de deformación del terreno puede explicarse mediante la teoría de consolidación unidimensional de Terzaghi (1943), aunque no fue hasta la década de 1960 cuando comenzó a estudiarse e identificarse con mayor claridad (Poland y Davis, 1969). Desde entonces, se reconoció que la extracción de fluidos del subsuelo genera vacíos que, con el tiempo y el reacomodo de las partículas del suelo, se manifiestan como hundimientos en la superficie. La subsidencia puede afectar gravemente la infraestructura urbana, modificar la pendiente de escurrimientos pluviales, generar nuevas zonas susceptibles a peligros como la inundación y el agrietamiento.

De acuerdo con Burbey (2002), los sitios donde ocurre el fenómeno de subsidencia y además cuentan con clima árido, largos periodos de extracción de agua subterránea, depósitos blandos y poco consolidados, cambios súbitos en el nivel freático y compactación diferencial, son ideales para la formación de discontinuidades. En el valle de Aguascalientes se tiene registro de discontinuidades desde la década de 1980 (Gómez-Aranda, 1989). Se ha comprobado que las fallas que limitan el graben de Aguascalientes son de origen tectónico, y las discontinuidades dentro del valle están asociadas al fenómeno de subsidencia por extracción de agua subterránea (Hernández-Marín et al., 2015; Pacheco-Martínez et al., 2013).

En 2021, el estado de Aguascalientes consumió 620.14 hectómetros cúbicos de agua. De este volumen, el 75.17 % fue destinado a la agricultura, el 20.80 % al uso público y el 4.03 % al uso industrial (CONAGUA, 2021a). Estos datos permiten afirmar que la subsidencia observada tiene un origen predominantemente antrópico.

Numerosas investigaciones se han desarrollado en la región, abordando tanto el peligro por subsidencia como sus efectos asociados. Se han generado mapas de zonificación de peligro asociado a discontinuidades (Pacheco-Martínez et al., 2015) y estu-

dios sobre la susceptibilidad del medio geológico a la generación discontinuidades (Luna-Villavicencio et al., 2023). Asimismo, se han explorado la recarga del acuífero y la conectividad vertical entre la superficie y el agua subterránea. Hernández-Marín et al. (2018) estimaron que le toma agua infiltrarse desde la superficie hasta el nivel freático es de 10 años, para la parte central de valle, mientras que en las zonas periféricas del valle superan los 400 años. Guerrero-Martínez et al. (2018) analizó las velocidades de recarga en el valle, y detectó en la zona norte áreas con valores de recarga de más de 500 mm/año, mientras que en la parte norte de la ciudad de Aguascalientes la parte norte apenas alcanzó valores de 10 mm/año y la parte sur de la ciudad 160 mm/año. Reyes-Cedeño et al. (2024) también identificaron zonas donde el Río San Pedro presenta conexión directa con el acuífero.

Las primeras investigaciones sobre la medición de la magnitud de la deformación en el valle de Aguascalientes fueron realizadas por medio de técnicas de GPS (Esquivel et al., 2006; Zermeno de León et al., 2005). Los resultados mostraron velocidades de deformación de más de 11 cm/año en algunos puntos de la ciudad de Aguascalientes. Sin embargo, esta técnica es poco práctica para determinar grandes extensiones de terreno, se requiere de una logística intensiva y un periodo prolongado de medición y procesamiento de información.

Actualmente, la detección de zonas de subsidencia no es un problema. Existen diversas metodologías de percepción remota que permiten hacer análisis en grandes extensiones de terreno utilizando imágenes y software libre (Hooper, 2008; Yunjun et al., 2019). En el valle de Aguascalientes se han elaborado distintas investigaciones relacionadas con la velocidad de deformación del terreno (Chaussard et al., 2014; Cigna y Tapete, 2022; INEGI, 2016, 2019; Pacheco-Martínez et al., 2015).

Actualmente existe un mapa mundial que categoriza el peligro asociado a subsidencia. Herrera-García et al., (2021) establece una zonificación y explica que el 19 % de la población podría estar en contacto con este peligro en el futuro. Recientemente, se han desarrollado mapas de zonificación y susceptibilidad al peligro por subsidencia, utilizando más

variables como: pendiente, inclinación, litología, uso de suelo, elevación, índices de vegetación, elevación, además se ha implementado el uso de técnicas como machine learning (Chen et al., 2024; Orlandi et al., 2024), redes neuronales (Arabameri et al., 2020; Lee et al., 2012; Park et al., 2012), random forest (Wen et al., 2022).

Aunque el fenómeno ha sido ampliamente estudiado en términos de sus causas y manifestaciones, son escasos los trabajos que abordan de manera cuantitativa y espacial la relación entre el abatimiento del nivel freático y la deformación del terreno en el Valle de Aguascalientes. Esta investigación tiene como objetivo abordar esa brecha mediante una aproximación integradora que combine análisis satelital y datos piezométricos.

El presente estudio tiene como objetivo analizar la correlación entre la velocidad de hundimiento del terreno y el abatimiento del nivel freático en el Valle

de Aguascalientes durante el periodo 2018–2024. Se delimita el área del valle por ser la región donde ambas variables coexisten de forma significativa. Es decir, mientras en otras zonas podría observarse abatimiento, la ausencia de rellenos blandos poco consolidados impide la manifestación de subsidencia. Para explorar esta relación, se emplean diversas técnicas estadísticas y análisis espaciales.

Los resultados obtenidos podrán ser utilizados para identificar zonas prioritarias de monitoreo, establecer restricciones en la explotación de acuíferos, y diseñar estrategias territoriales para mitigar riesgos mediante obras de recarga y regulación.

Cabe señalar que el valle abarca principalmente el estado de Aguascalientes, aunque su porción norte se extiende hacia Zacatecas. Hidrológicamente, corresponde a dos acuíferos: el del Valle de Aguascalientes en el sur, y el de Ojocaliente en el norte (Figura 1).

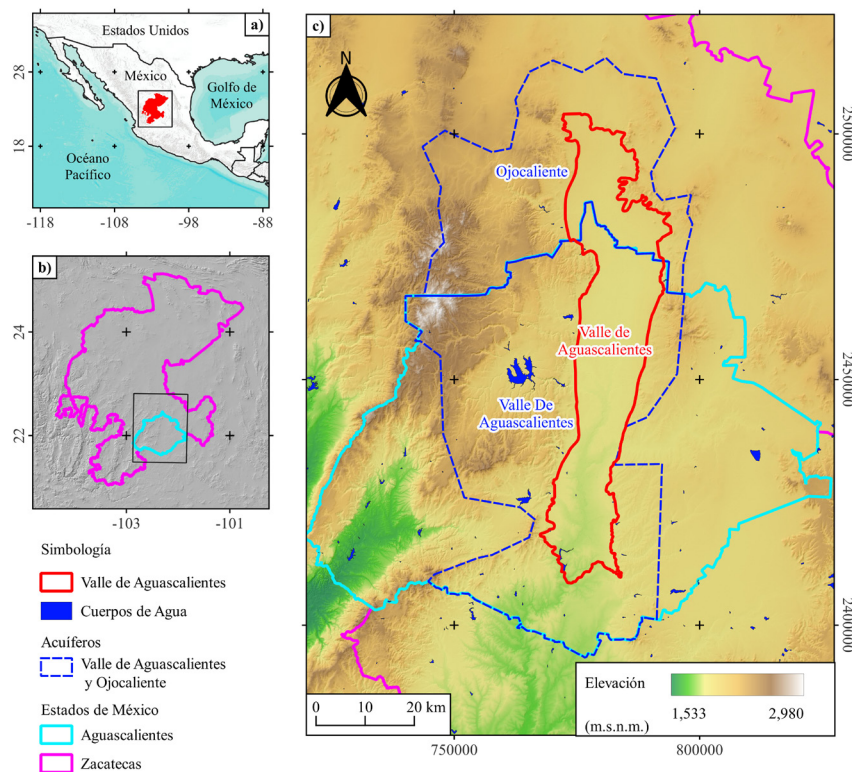


Figura 1. Ubicación del Valle de Aguascalientes. a) Zona centro de México, b) Estados de Aguascalientes y Zacatecas y c) Valle de Aguascalientes.

METODOLOGÍA

Cálculo del abatimiento del nivel freático

El abatimiento del nivel freático se calculó utilizando la información pública disponible en el sitio oficial de la CONAGUA (2021). La información encontrada no contiene el registro de la profundidad del agua subterránea para todos los años. Para resolver este problema, fue necesario ajustar un modelo de interpolación cuadrático para cada pozo y se seleccionaron solo los pozos que contaban con un valor de R^2 mayor o igual a 0.70. Posteriormente, se interpoló utilizando distintos métodos (mínima curvatura, Shapard modificado, vecino más próximo, vecino natural e interpolación lineal) para calcular el abatimiento del agua subterránea entre el año 2024 y 2018, se obtuvo la diferencia entre estos años; abatimiento = $N_{2024} - N_{2018}$. Esto quiere decir que, si el valor del abatimiento es positivo, el nivel bajó, lo que indica un abatimiento del nivel freático; de lo contrario el nivel subió, hay recuperación del nivel freático. Se seleccionará el método que tenga mejor cobertura y que la distribución de los valores del abatimiento sea coherente con los valores extremos observados.

Cálculo de la velocidad de deformación

La velocidad de hundimiento se calculó utilizando el software MintPy (*The Miami INsar Time-series software in Python*) (Yunjun et al., 2019), Las imágenes utilizadas fueron de tipo SLC (*Single Look Complex*) obtenidas del satélite Sentinel, utilizando imágenes de banda C en geometría ascendente, correspondiente a la ruta 151 y marco 68, el procesamiento de las imágenes fue mediante demanda, en la plataforma HyP3 (*Hybrid Pluggable Processing Pipeline*) (Hogenson et al., 2016; Kennedy et al., 2021). El periodo de análisis fue desde el 4 de enero del 2017 hasta el 9 de enero del 2024. Se utilizaron 180 imágenes y se formaron 354 interferogramas.

Una vez que se calcularon las dos variables mencionadas. Se calculó el valor de las variables para una serie de puntos distribuidos en todo el Valle a una distancia de 40 metros. Por lo tanto, se obtuvo un archivo con 697,233 puntos con las coordenadas en X, Y, abatimiento y velocidad de deformación. Con estos datos se realizaron los análisis de correlación entre las variables.

Análisis de correlación entre variables

Para explorar la posible relación entre el abatimiento del nivel freático y la deformación del terreno, se aplicaron tres métodos estadísticos de correlación: Pearson, Spearman y Kendall, utilizando como insumo un conjunto de datos espaciales que incluye las coordenadas (X, Y) y los valores de ambas variables.

El coeficiente de correlación Pearson (r), se utiliza para evaluar la asociación lineal entre las variables su fórmula es:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2})(\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2})}$$

Donde:

x_i y y_i son los valores de abatimiento y deformación respectivamente para cada punto i ,

\bar{x} y \bar{y} son las medias de cada variable,

n es el número total de observaciones

Coeficiente de Spearman (ρ) es una medida no paramétrica que evalúa la relación monótona (creciente o decreciente) entre dos variables, sin requerir una relación lineal. Se basa en los rangos de los datos y se calcula con la fórmula:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

Donde:

$d_i = R(x_i) - R(y_i)$ es la diferencia entre los rangos de x_i y y_i ,

n es el número de observaciones

Coeficiente de Kendall (τ) también mide la relación monótona entre dos variables, pero se basa en la concordancia entre pares de observación. Su fórmula es:

$$\tau = \frac{C - D}{\frac{1}{2}n(n - 1)}$$

Donde:

C es el número de pares concordantes (ambas variables aumentan o disminuyen simultáneamente),

D es el número de pares discordantes

N es el número total de observaciones

Los tres coeficientes proporcionan información complementaria: Pearson evalúa relaciones estrictamente lineales, mientras que Spearman y Kendall detectan tendencias generales en los datos, independientemente de su forma exacta.

Una vez que se ha caracterizado la relación general entre variables, se procedió a un análisis espacial categórico con el propósito de explorar su manifestación geográfica entre las dos variables. Para ello, se clasificó el abatimiento y la deformación en tres categorías. Para las dos variables se determinó el límite inferior y superior utilizando el rango intercuartílico. El análisis del abatimiento del nivel freático, los valores fueron ordenados de menor a mayor, la primera clase se generó en las zonas donde el abatimiento del nivel freático es nulo, ósea que son valores negativos; las otras dos zonas moderado y alto se generaron a partir de punto medio entre el límite superior y el cero; de modo que la clase A representa hundimiento nulo, la clase B abatimiento moderado y la clase C abatimiento alto. Para la deformación, la primera clase fue considerando los valores positivos, es decir, en donde el hundimiento es nulo o positivo, las categorías 2 y 3 se determinaron a partir del punto medio entre el límite inferior y 0; de este modo la clase 1 representa nulo hundimiento, la clase 2 hundimiento moderado y la clase 3 hundimiento alto.

La combinación de ambas variables dio lugar a una matriz de clasificación de 3x3, permitiendo identificar zonas del territorio con diferentes niveles de afectación y dinámica hidrogeológica. Este enfoque relaciona especialmente el abatimiento con la deformación, destacando regiones de interés para un análisis posterior.

Además del análisis espacial y estadístico previamente descrito, se aplicó un enfoque probabilístico para estimar la probabilidad de que ocurra un hundimiento del terreno en función del nivel de abatimiento del agua subterránea. Para ello, se utilizaron los resultados de la matriz de clasificación cruzada (abatimiento vs. deformación), que permite saber cuántas veces ocurre cada combinación.

Esta estimación se realizó utilizando un principio conocido como el Teorema de Bayes (Bayes, 1763), una herramienta que permite estimar la probabilidad de que algo ocurra, dado que otro ya ha ocurrido.

$$P(H|A) = \frac{P(H \cap A)}{P(A)}$$

Donde H es el hundimiento y A corresponde al abatimiento. La ecuación anterior se lee como la probabilidad de que ocurra un hundimiento cuando ya ha ocurrido el abatimiento del nivel freático.

Este análisis se aplicó a todas las combinaciones posibles, y los resultados se organizaron en una tabla de probabilidades condicionales.

RESULTADOS

Se evaluaron distintos métodos de interpolación espacial con el objetivo de representar de manera precisa la superficie del abatimiento del nivel freático. La Tabla 1 resume los métodos considerados y los estadísticos derivados de cada superficie interpolada, cómo la media, desviación estándar y los valores extremos. La elección del método se basó en su cobertura espacial, la preservación de los valores representativos y la coherencia con la distribución general observada. Bajo estos criterios, el método de mínima curvatura mostró el comportamiento más adecuado y fue seleccionado para la generación del raster continuo de abatimiento.

Método	Cobertura	Valores extremos	Media	Desviación estándar	Observaciones
Mínima curvatura	100 %	-12.60 a 30.71	8.34	6.77	Suaviza transiciones
Sharped modificado	99.8 %	-58.43 a 144.81	16.12	23.77	Presenta valores extremos no realistas
Vecino más próximo	100 %	-7.03 a 22.70	7.07	5.45	Resultados escalonados, no suavizados
Vecino natural	57.32 %	-3.42 a 20.45	6.89	3.90	Presenta huecos en los resultados
Interpolación lineal	60.18 %	-3.86 a 21.57	6.90	4.04	Interpolación precisa, pero cobertura incompleta

Tabla 1. Resultados de las interpolaciones del abatimiento del nivel freático en el Valle de Aguascalientes.

El resultado del abatimiento del nivel freático entre los años 2024 y 2018 se muestra en la Figura 2a, se utilizaron 52 pozos para estimar estos valores. Los resultados muestran que los sitios donde se registró el mayor abatimiento alcanzaron valores de hasta 24 m y zonas en donde ha ocurrido recuperación de hasta 6 metros, lo que quiere decir que hubo recarga y aumentó el nivel.

Los resultados de la velocidad de la deformación LOS por sus siglas en inglés *Line Of Sight* lo que quiere decir que los valores negativos indican las zonas donde ocurrió un hundimiento, es decir que la superficie se alejó del satélite; mientras que los valores positivos indican un acercamiento de la superficie al satélite, es decir que el terreno incrementó su nivel (Figura 2b).

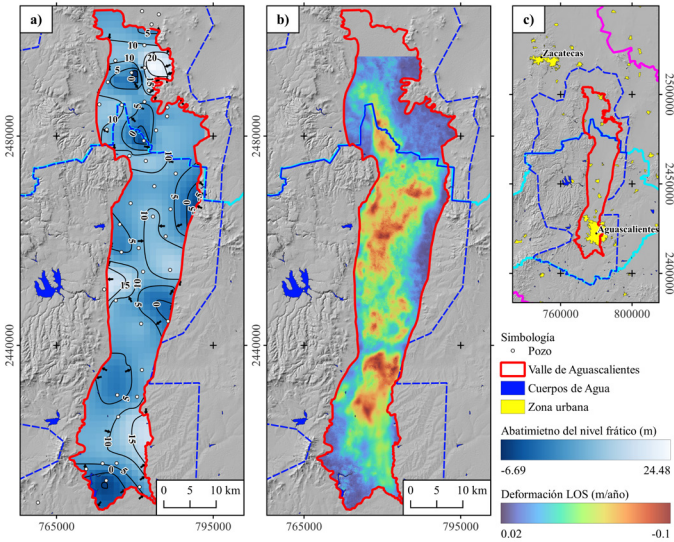


Figura 2. Variables utilizadas. a) Abatimiento del nivel freático, b) Velocidad de deformación y c) Zonas urbanas en el Valle de Aguascalientes.

Los resultados obtenidos evidencian correlaciones débiles en todos los casos. El coeficiente de Pearson fue de 0.0648, lo que indica una relación lineal prácticamente nula entre el abatimiento y la deformación. De manera similar, el coeficiente de Spearman, que evalúa relaciones monótonas sin asumir linealidad, arrojó un valor de 0.0849, mientras que el coeficiente de Kendall fue de 0.0556. Estos dos últimos valores refuerzan la ausencia de una tendencia creciente o decreciente clara entre ambas variables.

La Figura 3 muestra un patrón concentrado con forma de campana invertida. La mayor densidad de puntos ocurre en un rango intermedio de abatimiento (entre 5 y 10 metros) y deformaciones negativas que oscilan entre 0.00 m y -0.06 m. Se aprecia una reducción en la frecuencia tanto en los valores más bajos de abatimiento (incluso negativos) como en los más altos (mayores a 20 m), así como en los extremos de deformación. Este comportamiento sugiere que el mayor número de eventos asociados a deformación del terreno se concentra en condiciones específicas de abatimiento, descartando una relación lineal directa entre ambas variables.

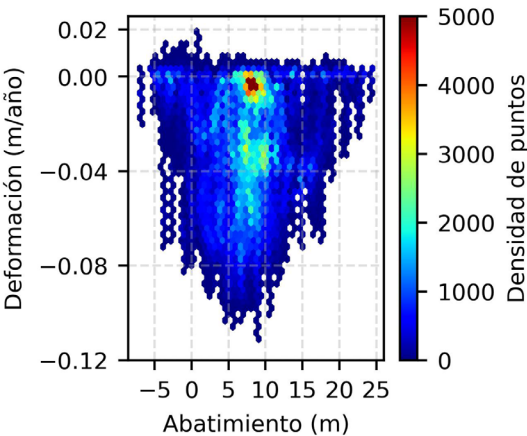


Figura 3. Densidad hexagonal entre el abatimiento y la deformación. Los colores cálidos representan mayor densidad, mientras que los colores fríos representan menor densidad.

Los resultados del análisis espacial categórico incluyen la clasificación de cada una de las variables en 3 clases. Para la deformación se utilizaron las clases 1, 2 y 3; mientras que para el abatimiento se utilizaron las clases A, B y C. La Tabla 2 muestran los límites y las clases para cada variable.

Abatimiento (m)		Deformación (m/año)	
Categoría	Clasificación	Categoría	Clasificación
Menor o igual que 0.00	A	Mayor o igual que 0.00	1
0.00 a 8.74	B	0.00 a -0.05	2
Mayor que 8.74	C	Menor que -0.05	3

Tabla 2. Categorías y clasificación para el abatimiento y la deformación.

La clasificación espacial de las categorías y la mezcla de ambas variables se muestra en la Figura 4. En la Figura 4-a se muestran las 3 categorías del abatimiento. En la Figura 4-b se muestran la variable de velocidad de deformación, clasificada en 3 categorías. Por último, la Figura 4-c muestra la mezcla de las dos variables. Este resultado permite identificar espacialmente cómo se relacionan ambas variables.

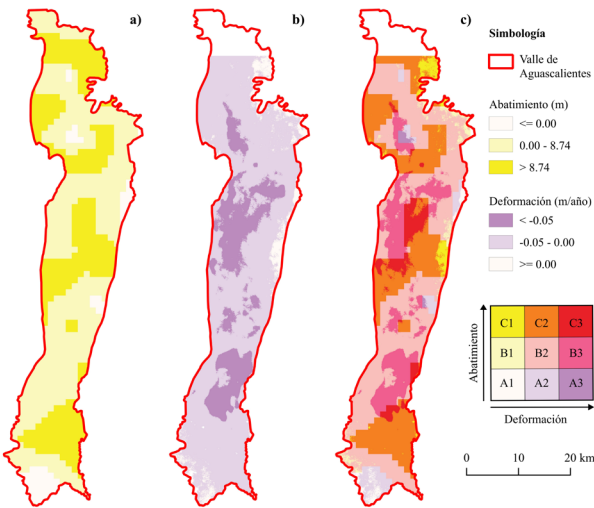


Figura 4. Combinación de variables y sus clases. a) Abatimiento, b) Deformación y c) Combinación de variables clasificadas.

En la Tabla 3 se muestra la descripción de la clasificación de la combinación de variables, la descripción de cada una, la cantidad de píxeles y el porcentaje de superficie que representa.

Clasificación	Descripción	Cantidad de puntos	Porcentaje
A1	Abatimiento nulo/Hundimiento nulo	10,957	1.57
A2	Abatimiento nulo/Hundimiento moderado	29,189	4.19
A3	Abatimiento nulo/Hundimiento Alto	3,647	0.52
B1	Abatimiento moderado/Hundimiento nulo	17,086	2.45
B2	Abatimiento moderado/Hundimiento moderado	285,651	40.97
B3	Abatimiento moderado/Hundimiento Alto	98,731	14.16
C1	Abatimiento alto/Hundimiento nulo	20,500	2.94
C2	Abatimiento alto/Hundimiento moderado	195,856	28.09
C3	Abatimiento alto/ Hundimiento Alto	35,616	35.616

Tabla 3. Descripción de la clasificación, cantidad de puntos por clase y porcentaje correspondiente.

A partir de la matriz de clasificación espacial, se construyó una tabla de probabilidades condicionales que resume la ocurrencia de hundimiento en función de las clases de abatimiento (Tabla 4). Los resultados muestran que, en zonas con abatimiento alto, la probabilidad de hundimiento moderado es del 77.8%, mientras que la de hundimiento alto es de 14.1%. Para abatimiento moderado, estas probabilidades fueron de 71.1% y 24.6% respectivamente.

C-Abatimiento alto	8.10 %	77.80 %	14.10 %
B-Abatimiento moderado	4.30 %	71.10 %	24.60 %
A-Abatimiento nulo	25.00 %	66.70 %	8.30 %
	1-Hundimiento nulo	2-Hundimiento moderado	3-Hundimiento alto

Tabla 4. Probabilidad condicional de hundimiento para las diferentes clases del abatimiento.

Esta estimación probabilística aporta un nuevo ángulo de análisis, útil para priorizar zonas de monitoreo, establecer alertas tempranas y refinar modelos de predicción espacial de subsidencia.

DISCUSIÓN

Los resultados anteriores muestran que el fenómeno de subsidencia no es proporcional al descenso del nivel freático en todas las zonas. Esto quiere decir que, además de abatimiento existen otras variables involucradas en este proceso.

La cantidad de pozos con las que se realizó el análisis fue 52, el número total de pozos en los acuíferos del Valle de Aguascalientes y Ojocaliente es de 72, pero algunos no tenían registro del nivel piezométrico en más de dos años, o no cumplían con la restricción de R² mayor o igual a 0.70. Por otro lado, el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), tiene un información de 4,398 pozos solo en el estado de Aguascalientes (CONAGUA, 2024). Lo que quiere decir que, del total de pozos registrados solo el 1.3 % tiene la información histórica accesible de los niveles piezométricos

y se puede encontrar de forma libre en internet. Las zonas de recargar en donde los valores del abatimiento del nivel freático son negativos se relacionan con las zonas de alta permeabilidad y valores altos de recarga (Guerrero-Martínez et al., 2018; Hernández-Marín et al., 2018), otro factor que podría influir a la recarga en puntos específicos zonas los flujos superficiales que podrían estar conectados con el acuífero (Reyes-Cedeño et al., 2024).

La Figura 3 sugiere que el sistema podría dividirse en dos regímenes independientes. El régimen izquierdo, correspondiente a valores de abatimiento menores a 7.5 metros, a medida que aumenta el abatimiento, también aumenta la deformación. Esta teoría se alinea con la teoría clásica de consolidación en medios cohesivos, donde el descenso del nivel freático reduce la presión intersticial y general compactación del suelo. El régimen derecho, para valores de abatimiento mayores a 7.5 metros, la deformación parece estabilizarse o incluso disminuir ligeramente, a pesar de que el abatimiento continúa creciendo. Este comportamiento podría estar asociado a distintos motivos:

1. Consolidación ya ocurrida en los estratos más compresibles. Los suelos blandos tienden a consolidarse y compactarse cuando se reduce el nivel freático, pero si estos estratos ya han sufrido un proceso de consolidación secundaria, su capacidad de seguir deformándose ante un abatimiento adicional disminuye, por lo tanto, aunque el nivel del agua continúe bajando, la deformación vertical acumulada se estabiliza porque los materiales ya se han compacto al máximo posible.
2. Presencia de materiales más rígidos en profundidad. En los perfiles geotécnicos del Valle, las capas superiores están compuestas por materiales blandos y compresibles, mientras que en profundidad hay estratos más densos o rígidos como arenas compactadas, gravas o incluso material cementado, a medida que el abatimiento avanza en profundidad, podría alcanzar estos estratos menos compresibles, reduciendo la respuesta a deformarse del terreno; el resultado de esto, se podría reflejar como una menor deformación por unidad de abatimiento.

3. Saturación residual. Aunque el abatimiento indica el nivel freático ha bajado, no todo el suelo pierde su humedad inmediatamente, existe una fracción del agua retenida por capilaridad en los poros finos, conocida como agua residual, esta humedad residual aumenta la presión efectiva de manera más lenta, lo que disminuye la tasa de compactación.

En conjunto, estos factores indican que el fenómeno de subsidencia no es lineal ni constante a lo largo del rango de abatimiento. El régimen derecho sugiere una saturación del proceso de deformación, lo cual puede ser indicativo de zonas donde el riesgo geotécnico se ha reducido por agotamiento estructural del suelo, o donde otras variables comienzan a controlar el proceso (como la litología, la rigidez de estratos, o incluso la recarga local por lluvia). Esto justifica el uso de metodologías de correlación modernas y el uso de más variables involucradas en el proceso de subsidencia.

Una interpretación de cada una de las clases formadas por la combinación de las variables se plantea en la Tabla 5. Aquí se establecen acciones que podrían tomarse para disminuir el peligro de subsidencia por extracción de agua.

C-Abatimiento alto	C1: Extracción severa sin hundimientos. Zona potencialmente peligrosa, puede ocurrir deformación en el futuro.	C2: Abatimiento alto con hundimiento moderado. Relación directa en evolución. Área crítica con necesidades de seguimiento.	C3: Hundimiento severo asociado a fuerte abatimiento. Zona crítica de atención prioritaria.
B-Abatimiento moderado	B1: Extracción media sin deformación. Zonas con presión hidráulica pero aún estables estructuralmente.	B2: Coincidencia media de hundimiento y abatimiento. Proceso activo incipiente.	B3: Hundimiento severo con abatimiento moderado. Puede indicar que la subsidencia responde con rezago temporal a la extracción.
A-Abatimiento nulo	A1: Zona estable. Sin presión hidráulica ni la evidencia de subsidencia.	A2: Hundimiento moderado en zonas sin sobreexplotación. Puede deberse a factores geológicos.	A3: Hundimiento severo sin presión hidráulica evidente. Vigilancia recomendada.
	1-Hundimiento nulo	2-Hundimiento moderado	3-Hundimiento alto

Tabla 5. Interpretación de la combinación de variables.

También se puede utilizar como una zonificación para la toma de decisiones gubernamentales en temas relacionados con la explotación de nuevos pozos, definir zonas que permitan la recarga del acuífero, escurrimiento pluvial y sanitario además de gestionar el peligro al fenómeno de subsidencia.

Esta zonificación tiene la capacidad de impactar en el desarrollo urbano dentro del Valle de Aguascalientes. Por ejemplo, en las zonas donde el abatimiento es mayor se puede restringir la extracción de agua del subsuelo con el fin de evitar que se incremente el abatimiento, también se pueden plantear zonas que sirvan para la recarga natural del acuífero en los sitios con mayor abatimiento o incluso la construcción en esa zona con materiales permeables, que permitan el flujo por medio de estos materiales. Otra aplicación podría ser la planeación de drenajes pluviales y sanitarios, estos dos tipos de obras civiles sirven para evacuar el agua de lluvia o de uso en el hogar, pero si por alguna razón la dirección del flujo se invierte por alguna deformación, podría generar nuevos peligros naturales y sanitarios. Además, se podrá identificar las zonas que actualmente se monitorear de forma continua o las zonas con potencial actual a presentar hundimientos.

Un hallazgo particularmente relevante del análisis condicional es que, en todos los niveles de abatimiento analizados, la probabilidad de que el terreno experimente algún grado de hundimiento (modera-

do o alto) es de al menos 66.7 %, lo que revela una alta susceptibilidad general a la deformación del terreno en el Valle de Aguascalientes. Esta proporción alcanza su punto máximo en zonas con abatimiento alto, donde la probabilidad de hundimiento es de 91.9 %, y aún en las zonas donde no se ha registrado abatimiento, el 75 % de los puntos presentan hundimiento moderado o alto. Estos valores refuerzan la idea de que el fenómeno de subsidencia en el valle no depende exclusivamente de la extracción actual de agua subterránea, sino que también está condicionado por factores acumulativos e históricos del sistema suelo-acuífero.

Además, el análisis condicional revela que solo el 25 % de las zonas sin abatimiento permanecen sin hundimiento, mientras que el resto muestra algún tipo de deformación. Este comportamiento sugiere la influencia de procesos como la consolidación diferida de materiales compresibles, la existencia de estratos previamente afectados y la heterogeneidad del subsuelo. En contraste, únicamente 1.57 % del total del territorio analizado presenta condiciones completamente estables, es decir, sin abatimiento ni hundimiento. Esta cifra evidencia la extensión geográfica del fenómeno y confirma que el sistema ha experimentado alteraciones profundas y prolongadas.

La disminución en la probabilidad de hundimiento alto en condiciones de abatimiento extremo podría

deberse al agotamiento del potencial de deformación en materiales que ya han alcanzado su estado de consolidación, o bien a la presencia de agua residual en el perfil que mantiene cierta resistencia estructural.

Este enfoque probabilístico, basado en frecuencias condicionales, complementa el análisis estadístico clásico y proporciona una herramienta robusta para interpretar la respuesta del terreno ante la extracción de agua subterránea. Su aplicación puede ser especialmente útil en la construcción de modelos predictivos y en el diseño de estrategias de gestión del riesgo en entornos urbanos vulnerables.

CONCLUSIONES

Este estudio demuestra que, aunque la correlación estadística entre el abatimiento del nivel freático y la deformación del terreno en el Valle de Aguascalientes es débil, el análisis espacial y probabilístico permitió identificar patrones consistentes que definen dos regímenes geotécnicos diferenciados. La zonificación resultante, basada en la combinación de abatimiento y subsidencia, ofrece una herramienta valiosa para la gestión del riesgo, apoyando decisiones en materia de extracción de agua, recarga artificial, uso del suelo y monitoreo preventivo.

El uso del Teorema de Bayes para estimar probabilidades condicionales de hundimiento según niveles de abatimiento proporcionó una metodología sencilla y robusta para cuantificar riesgos relativos con base en datos observables. Los resultados muestran que la probabilidad mínima de que ocurra algún tipo de hundimiento (moderado o alto) es de 66.7 %, incluso en zonas sin abatimiento moderado. Esta probabilidad se eleva a 75.0 % cuando se consideran únicamente las zonas sin abatimiento, y alcanza hasta 91.9 % en condiciones de abatimiento alto, lo que evidencia una alta susceptibilidad generalizada del terreno a la deformación. En contraste, solo el 1.57 % del total del territorio presenta condiciones completamente estables, sin hundimiento ni abatimiento, lo que confirma la magnitud y persistencia del fenómeno en el valle.

Sin embargo, la observación de que la probabilidad de hundimiento alto no aumenta de forma lineal con el abatimiento evidencia que este factor, aunque relevante, no es suficiente para explicar completa-

mente la subsidencia. Resulta necesario incorporar variables adicionales como las propiedades litológicas, el estado de consolidación del subsuelo y la heterogeneidad geotécnica para modelar con mayor precisión el fenómeno.

Finalmente, este trabajo subraya la importancia de mejorar la disponibilidad y calidad de los datos piezométricos y geotécnicos en la región, para avanzar hacia modelos predictivos más completos y confiables. La metodología empleada puede ser replicada en otros contextos donde la subsidencia sea una amenaza emergente, contribuyendo al diseño de políticas públicas fundamentadas en evidencia científica y orientadas hacia la sustentabilidad territorial.

Referencias

- Arabameri, A., Saha, S., Roy, J., Tiefenbacher, J. P., Cerda, A., Biggs, T., Pradhan, B., Thi Ngo, P. T., & Collins, A. L. (2020). A novel ensemble computational intelligence approach for the spatial prediction of land subsidence susceptibility. *Science of the Total Environment*, 726, 138595. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138595>
- Bayes, T., & Price, null. (1997). LII. An essay towards solving a problem in the doctrine of chances. By the late Rev. Mr. Bayes, F. R. S. communicated by Mr. Price, in a letter to John Canton, A. M. F. R. S. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 53, 370-418. <https://doi.org/10.1098/rstl.1763.0053>
- Burbey, T. J. (2002). The influence of faults in basin-fill deposits on land subsidence, Las Vegas Valley, Nevada, USA. *ResearchGate*, 10(5), 525-538. <https://doi.org/10.1007/s10040-002-0215-7>
- Chaussard, E., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., & Amelung, F. (2014a). Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series. *Remote Sensing of Environment*, 140, 94-106. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.038>
- Chen, C., Peng, M., Motagh, M., Guo, X., Xing, M., & Quan, Y. (2024). Mapping susceptibili-

ty and risk of land subsidence by integrating InSAR and hybrid machine learning models: A case study in Xi'an, China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 1-15. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3522995>

Cigna, F., & Tapete, D. (2022). Land Subsidence and Aquifer-System Storage Loss in Central Mexico: A Quasi-Continental Investigation With Sentinel-1 InSAR. *Geophysical Research Letters*, 49(15), e2022GL098923. <https://doi.org/10.1029/2022GL098923>

CONAGUA. (2021a). *Consumo del agua en México 2019-2021*. Looker Studio. http://lookerstudio.google.com/reporting/a68b7e3d-701d-406f-9d4f-42a8accac6f4/page/p_ars55n48zc?feature=opengraph

CONAGUA. (2021b). *GeoVisor de Consulta de Mediciones Piezométricas (Mapa de Pozos)*. <https://sigagis.conagua.gob.mx/rp20/>

CONAGUA. (2024). *LOCREPDA v.2021*. <https://sigagis.conagua.gob.mx/locrepda20/>

Esquivel, R., Hernández, A., & Zermeno, M. E. (2006). GPS for Subsidence Detection, the Case Study of Aguascalientes. En F. Sansò & A. J. Gil (Eds.), *Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles* (pp. 254-258). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-38596-7_31

Figueroa-Miranda, S., Tuxpan-Vargas, J., Ramos-Leal, J. A., Hernández-Madrigal, V. M., & Villaseñor-Reyes, C. I. (2018). Land subsidence by groundwater over-exploitation from aquifers in tectonic valleys of Central Mexico: A review. *Engineering Geology*, 246, 91-106. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.09.023>

Gómez-Aranda, J. J. (1989). Geología preliminar del Graben de Aguascalientes. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 8(1), 22-31.

Guerrero-Martínez, L., Hernández-Marín, M., Burbey, T. J., Guerrero-Martínez, L., Hernández-Marín, M., & Burbey, T. J. (2018). Estimation of natural groundwater recharge in the Aguascalientes semiarid valley, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 35(3), 268-276. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2018.3.1022>

Hernández-Marín, M., González-Cervantes, N., & Pacheco-Martínez, J. (2015). Discussion on the origin of surface failures in the Valley of Aguascalientes, México. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 372, 235-238. <https://doi.org/10.5194/piahs-372-235-2015>

Hernández-Marín, M., Guerrero-Martínez, L., Zermeno-Villalobos, A., Rodríguez-González, L., Burbey, T. J., Pacheco-Martínez, J., Martínez-Martínez, S. I., & González-Cervantes, N. (2018). Spatial and temporal variation of natural recharge in the semi-arid valley of Aguascalientes, Mexico. *Hydrogeology Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1819-x>

Herrera-García, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., López-Vinielles, J., Rossi, M., Mateos, R. M., Carreón-Freyre, D., Lambert, J., Teatini, P., Cabral-Cano, E., Erkens, G., Galloway, D., Hung, W.-C., Kakar, N., Sneed, M., Tosi, L., Wang, H., & Ye, S. (2021). Mapping the global threat of land subsidence. *Science*, 371(6524), 34-36. <https://doi.org/10.1126/science.abb8549>

Hogenson, K., Arko, S. A., Buechler, B., Hogenson, R., Herrmann, J., & Geiger, A. (2016). Hybrid Pluggable Processing Pipeline (HyP3): A cloud-based infrastructure for generic processing of SAR data. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2016, IN21B-1740.

Hooper, A. (2008). A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35(16). <https://doi.org/10.1029/2008GL034654>

INEGI. (2016). *Estudio de los hundimientos por subsidencia en Aguascalientes con métodos satelitales. Reporte técnico*. INEGI.

INEGI. (2019). *Detección de zonas de subsidencia en México con técnicas satelitales: Vol. Volumen 1*.

INEGI. (2021). *Detección de zonas de subsidencia en México con técnicas satelitales: Vol. Volumen 2*.

INEGI. (2022). *Detección de zonas de subsidencia en México con técnicas satelitales: Vol. Volumen 3*.

Kennedy, J., Anderson, R., Biessel, R., Chase, T., Ellis, O., Fairbanks, K., Fleming, C., Horn, W., Johnston, A., Kristenson, H., Logan, T., Meyer, F., Miller, R., Rine, J., Showalter, C., Short, G., Zhu, J., & Player, A. (2021). Skip the Processing: On Demand Analysis-Ready InSAR from ASF. 2021, G45B-0395. *AGU Fall Meeting Abstracts*.

Lee, S., Park, I., & Choi, J.-K. (2012). Spatial Prediction of Ground Subsidence Susceptibility Using an Artificial Neural Network. *Environmental Management*, 49(2), 347-358. <https://doi.org/10.1007/s00267-011-9766-5>

Luna-Villavicencio, H., Pacheco-Martínez, J., Ochoa-González, G. H., Hernández-Marín, M., Hernández-Madrigal, V. M., López-Doncel, R. A., & Reyes-Cedeño, I. G. (2023). Determination of Susceptibility to the Generation of Discontinuities Related to Land Subsidence Using the Frequency Ratio Method in the City of Aguascalientes, Mexico. *Remote Sensing*, 15(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/rs15102597>

Orlandi, D., Díaz, E., Tomás, R., Galatolo, F. A., Cimino, M. G. C. A., Pagli, C., & Perilli, N. (2024). A machine learning approach for mapping susceptibility to land subsidence caused by ground water extraction. *Applied Computing and Geosciences*, 24, 100207. <https://doi.org/10.1016/j.acags.2024.100207>

Pacheco-Martínez, J., Cabral-Cano, E., Wdowinski, S., Hernandez-Marín, M. H., & Zermeno-de-León, M. E. (2015). Application of InSAR and Gravimetry for Land Subsidence Hazard Zoning in Aguascalientes, Mexico. *Remote Sensing*, 7(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/rs71215868>

Pacheco-Martínez, J., Hernandez-Marín, M., Burbey, T. J., González-Cervantes, N., Ortíz-Lozano, J. Á., Zermeno-de-León, M. E., & Solís-Pinto, A. (2013). Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México. *Engineering Geology*, 164, 172-186. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.06.015>

Park, I., Choi, J., Jin Lee, M., & Lee, S. (2012). Application of an adaptive neuro-fuzzy inference system to ground subsidence hazard mapping. *Computers & Geosciences*, 48, 228-238. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.01.005>

Poland, J. F., & Davis, G. H. (1969). Land Subsidence Due to Withdrawal of Fluids*. En D. J. Varnes & G. Kiersch (Eds.), *Reviews in Engineering Geology* (Vol. 2, p. 0). Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/REG2-p187>

Reyes-Cedeño, I. G., Hernández-Marín, M., Pacheco-Martínez, J., Rico-Martínez, R., Arzate-Cárdenas, M. A., Pacheco-Guerrero, A., Luna-Villavicencio, H., & Padilla-Ceniceros, R. (2024). Application of Vertical Electrical Sounding and Toxicity Tests for the Analysis of Vertical Hydraulic Connectivity through the Vadose Zone. *Water*, 16(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/w16020222>

Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. <https://doi.org/10.1002/9780470172766>

Wen, T., Tiewang, W., Arabameri, A., Asadi Nalivan, O., Pal, S. C., Saha, A., & Costache, R. (2022). Land-subsidence susceptibility mapping: Assessment of an adaptive neuro-fuzzy inference system—genetic algorithm hybrid model. *Geocarto International*, 37(26), 12194-

12218. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2066198>

Yunjun, Z., Fattahi, H., & Amelung, F. (2019). Small baseline InSAR time series analysis: Unwrapping error correction and noise reduction. *Computers & Geosciences*, 133, 104331. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.104331>

Zermeño de León, M. E., Esquivel-Ramírez, E. R., Rubén, Hernández-Navarro, A., Mendeza-Otero, E., & Arellano-Sanchez, J. (2005). Influencia de la extracción del agua en el subsuelo y el agrietamiento. *Investigación y Ciencia*, 13, 15-22.

Hugo Luna-Villavicencio

Ingeniero Civil por la Universidad Autónoma de Zacatecas. Maestro en Ingeniería Civil con especialidad en Ambiental y Doctor en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos con énfasis en Ingeniería Civil, ambos por la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Su línea de investigación se centra en el análisis de riesgos geohidrológicos, aplicando técnicas de percepción remota, exploración directa in situ y exploración indirecta con técnicas geofísicas.

Isaí Gerardo Reyes-Cedeño

Ingeniero civil con maestría y doctorado summa cum laude en Ingeniería Civil y Ciencias de los Ámbitos Antrópicos. Profesor investigador y director de posgrados en la Universidad Panamericana, Campus Aguascalientes, cuenta con el grado A en el sistema de profesores categorizados con énfasis en investigación. Sus líneas de investigación incluyen Hidrología, Gestión de Recursos Hídricos, Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Fotogrametría, Ecomateriales y Gestión BIM.

Raudel Padilla-Ceniceros

Ingeniero Civil por la Universidad Autónoma de Zacatecas. Maestro en Ingeniería Civil con especialidad en Construcción y Doctor en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos con énfasis en Ingeniería Civil, ambos por la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Sus líneas de interés es la aplicación de técnicas no destructivas en edificios patrimoniales, exploración geofísica y geotecnia.

Michelle Ivonne López-Escobar

Arquitecta por el Instituto Tecnológico de Zacatecas y Maestría en Ingeniería Civil en la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Actualmente, es estudiante del Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos en la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Su investigación se enfoca en el área de Patrimonio edificado, especialmente en el estudio del fenómeno de la humedad y el impacto que tiene en los edificios históricos.

William Herbe Herrera-León

Ingeniero Civil por el Instituto Tecnológico de Tepic, Maestro en Ciencias de la Ingeniería con línea termina Mecánica de Suelos por la Universidad Autónoma de Querétaro y Doctor en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos por la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Sus líneas de interés son: riesgos asociados a subsidencia, geotecnia e hidrología.



Política de acceso abierto

La Revista Artificio proporciona un acceso abierto a su contenido, basado en el principio de que ofrecer un acceso libre a las investigaciones ayuda a incrementar el intercambio global del conocimiento. Artificio no cobra ni cobrará ningún cargo a sus lectores por concepto de suscripción, ni a los autores por enviar, procesar o publicar sus artículos.

Como condición de publicación, los autores acuerdan liberar sus derechos de autor bajo una licencia compartida, específicamente la licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Esta licencia permite a cualquier persona compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato bajo los siguientes términos:

- *Dar crédito al autor del texto
- *No hacer uso del material con propósitos comerciales
- *No transformar o modificar el material.