

# EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO URBANO DE SALTILLO, COAHUILA MEDIANTE TÉCNICAS DE UMBRALIZACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES

FERNANDO CLEMENTE COVARRUBIAS  
VELÁZQUEZ

JORGE SEBASTIÁN FUENTES DE LA CRUZ

JOSUÉ GÓMEZ CASAS

CARLOS ALBERTO TORO ARCILA

JESÚS SALVADOR GALINDO VALDÉS

CÉSAR CARRILLO HERNÁNDEZ

JONATHAN SEBASTIÁN OBREGÓN  
FLORES

DANIELA ESTEFANÍA ORTIZ RAMOS

1. Facultad de Ingeniería,  
Unidad Sureste, UAdeC.

Correspondencia  
jogomezc@uadec.edu.mx  
<https://orcid.org/0000-0002-1136-3187>

Fecha de recepción  
26 de febrero de 2025.

Fecha de aceptación  
18 de marzo de 2025.

## ASSESSMENT OF URBAN GROWTH IN SALTILLO, COAHUILA USING SATELLITE IMAGE THRESHOLDING TECHNIQUES

### RESUMEN

El aumento de la temperatura se ha convertido en una gran preocupación en el siglo XXI, especialmente en ciudades en expansión. Actualmente, el crecimiento urbano en Saltillo, Coahuila enfrenta desafíos significativos, incluyendo altos costos de mantenimiento y problemas ambientales graves como la deforestación y destrucción de hábitats naturales, lo que ha llevado a la formación de islas de calor urbanas. Este estudio propone una metodología para detectar la evolución de la urbanización a través de técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes en Saltillo del año 1960 hasta el año 2023, utilizando técnicas de visión por computadora para evaluar su relación. Los resultados obtenidos revelan que el crecimiento urbano descontrolado en Saltillo ha influido significativamente en el incremento de las temperaturas locales, contribuyendo de manera notable al fenómeno de isla de calor urbana. La metodología propuesta ofrece una herramienta valiosa para la planificación urbana al proporcionar una evaluación basada en umbralización de la urbanización. La implementación del algoritmo propuesto demostró un crecimiento urbano de 4.8 % en 1960, para 1990 el porcentaje de urbanización aumentó significativamente hasta el 35.12 % y para el año de 2023 el área urbanizada alcanzó un notable 86.77 %. Esta metodología puede ser aplicada a otras ciudades para evaluar patrones de urbanización y sus efectos ambientales mediante técnicas de visión por computadora.

**Palabras clave:** *análisis de imágenes satelitales; urbanización; cambio climático; temperatura; islas de calor urbanas.*

## ABSTRACT

*The increase in temperature has become a big concern in the 21st century, especially in expanding cities. Currently, urban growth in Saltillo, Coahuila faces significant challenges, including high maintenance costs and serious environmental issues such as deforestation and destruction of natural habitats, leading to the formation of urban heat islands. This study proposes a methodology to detect the evolution of urbanization through advanced image processing techniques in Saltillo from 1960 to 2023, using computer vision techniques to assess its relationship. The results reveal that uncontrolled urban growth in Saltillo has significantly influenced the increase in local temperatures, notably contributing to the urban heat island phenomenon. The proposed methodology offers a valuable tool for urban planning by providing an assessment based on urbanization thresholding. The implementation of the proposed algorithm showed urban growth of 4.8% in 1960, with urbanization increasing significantly to 35.12% by 1990 and reaching a notable 86.77% urbanized area by 2023. This methodology can be applied to other cities to assess urbanization patterns and their environmental effects using computer vision techniques.*

**Keywords:** *satellite image analysis; urbanization; climate change; temperature; urban heat islands.*

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano acelerado es un fenómeno global que plantea problemas tanto en términos de planificación como financieros debido a su gran costo de mantenimiento y el impacto que provoca en el medio ambiente (Grekousis, 2019), lo que se traduce en un impacto ambiental significativo entre ellas el aumento de las temperaturas urbanas y la formación de islas de calor causado por la edificación descontrolada en Saltillo, Coahuila (Cortez y col., 2016). El aumento de temperatura se ve agravado por la deforestación de los entornos naturales, lo que intensifica aún más este fenómeno climático. La falta de una gestión adecuada de la urbanización conduce a un incremento en la construcción de edificaciones, las cuales absorben y retienen el calor, generando un efecto de isla de calor urbano en Saltillo. Es fundamental



abordar estos desafíos con políticas urbanas sostenibles que promuevan un crecimiento equilibrado y respetuoso con el medio ambiente. La planificación urbana adecuada, la inversión en infraestructuras verdes y la conservación de espacios naturales son medidas esenciales para mitigar el impacto del crecimiento urbano en el aumento de la temperatura en Saltillo y garantizar un desarrollo urbano más sostenible en el futuro (Mendoza-Hernández y col., 2013).

La visión por computadora, a través del procesamiento de imágenes, plantea una forma de medir esta problemática, mediante esta técnica se busca cuantificar el crecimiento utilizando la técnica de umbralización en imágenes satelitales de la ciudad (Szeliski, 2022). Las imágenes satelitales fueron obtenidas a través del software QGIS (Quantum GIS), las cuales fueron utilizadas como entrada del sistema para cuantificar el crecimiento urbano (Xu y col., 2021). Esta técnica se propone como una solución para medir de forma automática el crecimiento de la urbanización y su relación con el aumento de la temperatura ambiental en la ciudad de Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México.

La economía de la ciudad de Saltillo se basa en la industria automotriz desde inicios de la década de los ochenta, por lo tanto, los proveedores de autopartes se asentaron en la región para facilitar la comunicación, la producción y la logística de la cadena productiva del ensamble de vehículos. Con el paso del tiempo, el clúster automotriz en la región sureste del estado de Coahuila se ha afianzado como uno de los más importantes del norte del país (Rodríguez Pérez y col., 2021), la planificación urbana en Saltillo es un proceso que está intrínsecamente ligado a una serie de parámetros legales y regulaciones (Levy y col., 2009). El crecimiento no planificado de las ciudades conduce a la generación de islas de calor urbano, donde las superficies pavimentadas y la falta de áreas verdes absorben y retienen el calor, elevando las temperaturas locales (Romero y Vásquez, 2005), este no solo afecta el confort térmico de los residentes urbanos, sino que también tiene implicaciones más amplias en la salud pública y el medio ambiente, como el aumento de enfermedades relacionadas con el calor, mayor consumo energético, así como la alteración de ecosistemas urbanos (Pérez, 2003). La falta de un indicador estandarizado para la gestión de recursos hídricos urbanos añade una capa adicional de complejidad a este desafío (Koop y van Leeuwen, 2015). La disponibilidad de agua y su calidad son elementos críticos en la planificación urbana y el desarrollo sostenible.

El programa PRONACES (Programas Nacionales Estratégicos) de SECIHTI (La Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación) menciona la importancia de la implementación de estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático, así como políticas de planificación urbana que prioricen la resiliencia y la sostenibilidad. Estas medidas son fundamentales para abordar los desafíos presentes y futuros relacionados con la temperatura y otros aspectos de la urbanización en Saltillo. La creación de infraestructuras verdes ofrece soluciones a largo plazo para mejorar la calidad de vida de los habitantes y garantiza la sostenibilidad de los entornos urbanos y regionales (Bojórquez y Aguilar, 2015). Sin embargo, los métodos convencionales para medir el crecimiento urbano son laboriosos, propensos a errores humanos y limitados en su capacidad para procesar grandes volúmenes de datos. Estos enfoques tradicionales, como las encuestas de campo y la interpretación visual manual de imágenes satelitales, suelen ser lentos y costosos, lo que limita su aplicabilidad en estudios a gran escala y en tiempo real. Según los datos de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México (SEMARNAT) (Perevochtchikova, 2013), se ha observado un cambio en el uso del suelo urbano debido a las condiciones climáticas cambiantes. El aumento urbano presenta del 9.5 % entre 2001 y 2024, mientras que las zonas agrícolas disminuyen un 5.97 %. Los cuerpos de agua también muestran una reducción del 4.21 % en áreas boscosas (Landa y col., 2008).

La llegada de nuevas tecnologías que podrían facilitar el análisis de imágenes, como el análisis color en imágenes ha demostrado ser una herramienta valiosa para entender los patrones de urbanización y su impacto ambiental como se a demostrado en estudios previos (Divya y col., 2021). La relación entre la urbanización y el clima es crucial; el aumento de la temperatura urbana y las islas de calor, documentados por Buyantuyev y col. (2010) y Kleerekoper y col. (2012) destacan la necesidad de estrategias de diseño urbano sostenible. La segmentación de imágenes, como la técnica RGB-IS utilizada por Shahtahmassebi y col. (2012), proporciona una herramienta para monitorear los cambios en el uso del suelo urbano y evaluar el impacto de la urbanización en el medio ambiente. Los mapas de uso del suelo de alta resolución, producidos utilizando imágenes de satélite y técnicas de segmentación, son una herramienta valiosa para comprender la dinámica de la urbanización y su impacto en el medio ambiente (Bartesaghi-Koc y col., 2021). Estos mapas no solo proporcionan una representación visual de la expansión urbana, sino que también permiten evaluar la pérdida de áreas verdes y la fragmentación del paisaje urbano. La capacidad para identificar y

monitorear cambios en la infraestructura urbana, como la expansión de carreteras y edificios, puede ayudar a prevenir y mitigar los riesgos asociados con la urbanización rápida y no planificada. Los resultados obtenidos por Li y col. (2017) demuestran que las estructuras de edificios son multidimensionales y ofrecen oportunidades para comprender mejor los procesos de cambio urbano y sus implicaciones ambientales. La integración de técnicas de segmentación de imágenes en la planificación urbana representa una herramienta valiosa para apoyar la gestión urbana sostenible. Su aplicación no se limita a estas áreas, también puede emplearse para realizar un seguimiento de los cambios, como el uso del suelo, la infraestructura, la densidad poblacional, el medio ambiente y la configuración del paisaje urbano, proporcionando información relevante para una amplia gama de tomadores de decisiones (Chapa y col., 2019).

A diferencia de enfoques previos, este trabajo introduce un método combina técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes y aprendizaje automático para mejorar la precisión en la detección de cambios urbanos, ofreciendo una contribución significativa a la planificación y gestión de las ciudades. Para este proyecto, se utilizaron imágenes tomadas por un helicóptero desde la década de los sesenta e imágenes satelitales actuales obtenidas del software QGIS (Quantum GIS).

## MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología mostrada en la Figura 1 fue empleada para analizar el crecimiento urbano en el municipio de Saltillo, Coahuila, a través de imágenes satelitales y se fundamenta en técnicas avanzadas de visión por computadora, específicamente en el procedimiento de umbralización de imágenes.

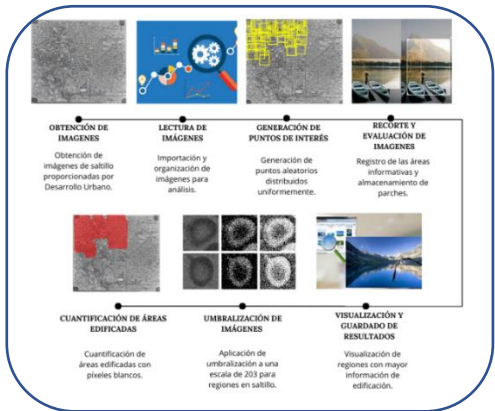


Figura 1. Metodología utilizada para realizar el proceso de umbralización de imágenes.

Este enfoque permite una interpretación precisa y objetiva de las transformaciones en el paisaje urbano, facilitando la identificación de áreas construidas y no construidas en función de las variaciones en la intensidad de los píxeles como se presenta en el diagrama de flujo en la Figura 2. Así, se obtiene una representación clara y detallada de la evolución algorítmica del entorno urbano, lo que posibilita la toma de decisiones informadas para una planificación más sostenible.

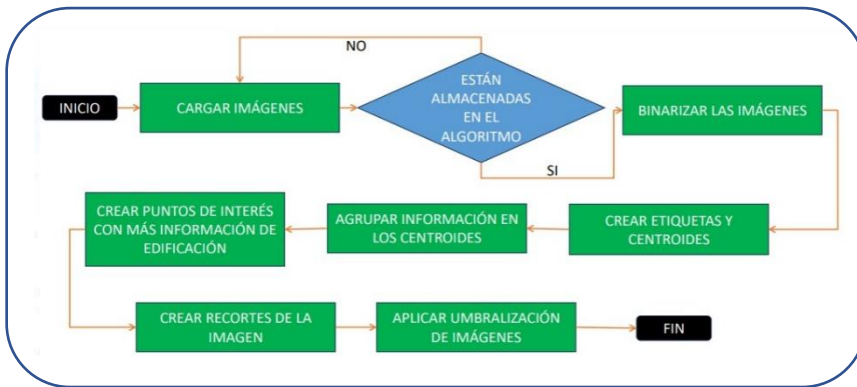


Figura 2. Diagrama de flujo del algoritmo de umbralización para el análisis del crecimiento urbano.

### OBTENCIÓN DE IMÁGENES

Las imágenes fueron obtenidas en 1960 mediante medios aéreos, proporcionadas por la Dirección de Desarrollo Urbano del Municipio de Saltillo, Coahuila; mientras que las más recientes provienen de satélites.

## LECTURA DE IMÁGENES

Las imágenes fueron organizadas y cargadas en la memoria del algoritmo para su posterior análisis, de manera que todas las imágenes relevantes fueran procesadas de manera sistemática. La Tabla 1 describe el proceso de segmentación y anotación de estas imágenes. En primer lugar, se cargan y recortan para su procesamiento, después se generan cuadros de segmentación alrededor de las subregiones de la imagen, basados en los centros previamente identificados. A cada subregión se le asigna una etiqueta y se realiza una anotación en la imagen original, añadiendo rectángulos. Posteriormente, cada subregión se convierte a formato binario, y se calcula la suma de los píxeles blancos, lo cual se utiliza para evaluar su densidad de información. Finalmente, las subregiones procesadas se almacenan para análisis posteriores.

**Tabla 1.** Segmentación de imágenes

<b>Algoritmo 1 Pseudocódigo general para la segmentación de imágenes</b>	
1.	<b>Entrada:</b> imágenes satelitales en una carpeta especificada
2.	<b>Salida:</b> sub-imágenes seleccionadas con las áreas más desarrolladas.
3.	Definir la ruta de la carpeta con las imágenes satelitales.
4.	Obtener una lista de los archivos de imagen y ordenarlos en forma natural.
5.	Cargar todas las imágenes en una matriz multidimensional.
6.	Definir parámetros para la <i>segmentación</i> : <i>número_de_grupos</i> , <i>máximas_iteraciones</i> , <i>tolerancia</i> .
7.	<b>Para</b> cada imagen cargada <b>hacer</b> :
8.	Redimensionar la imagen.
9.	Aplicar <code>SEGMENTARIMAGEN</code> para obtener la imagen segmentada y los centros de los grupos detectados.
10.	Definir cuadros alrededor de los centros.
11.	Generar sub-imágenes basadas en los cuadros definidos.
12.	Convertir las sub-imágenes en binarias y calcular la suma de píxeles blancos.
13.	Ordenar y seleccionar las regiones más desarrolladas basándose en las sumas calculadas.
14.	Anotar la imagen original con las regiones seleccionadas.
15.	Guardar las regiones seleccionadas en matrices para el siguiente paso
16.	<b>Fin para</b>
17.	Mostrar la última imagen procesada con anotaciones.
18.	<b>Para</b> cada sub-imagen seleccionada <b>hacer</b> .
19.	Guardarla en formato PNG con un nombre único.
20.	<b>Fin para</b>
21.	<b>Fin</b>

## GENERACIÓN DE PUNTOS DE INTERÉS

Se generaron centroides en las imágenes con el objetivo de identificar áreas potenciales de interés. Estos puntos fueron distribuidos de manera que se minimizara la superposición entre ellos, utilizando la distancia Euclidiana para asegurar que cubrieran adecuadamente la imagen sin concentrarse demasiado en áreas cercanas entre sí. En este caso, en la Tabla 2, para determinar el agrupamiento, se identifica el centroide más cercano a cada píxel para asignarlo a su grupo correspondiente. La distribución de los puntos se realizó de tal forma que se mantuviera una distancia mínima entre ellos, garantizando una cobertura uniforme de la imagen.

La distancia euclidiana cuadrada entre un píxel  $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$  y un centroide  $c_j = (c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jn})$  es mostrado en la ecuación (1):

$$d^2(p, c_j) = \sum_{k=1}^n (p_k - c_{\{jk\}})^2 \quad (1)$$

La ecuación (1) representa la distancia euclidiana cuadrada entre un punto  $p$  y un centroide  $c_j$  en un espacio  $n$ -dimensional. Aquí,  $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_n)$  es un vector que define las coordenadas del punto, mientras que  $c_j = (c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jn})$  es el vector de coordenadas del centroide. La expresión  $(p_k - c_{\{jk\}})^2$  calcula la diferencia cuadrada entre las coordenadas  $k$ -ésimas del punto y el centroide. La suma  $\sum_{k=1}^n x$  acumula estas diferencias cuadradas a través de todas las dimensiones del espacio. Esta formula es ampliamente utilizada en algoritmos de agrupamiento como  $k$ -means (Ikotun y col., 2023), ya que permite medir la proximidad relativa entre puntos y centroides sin necesidad de calcular la raíz cuadrada, optimizando así el rendimiento computacional.

**Tabla 2.** Agrupamiento de datos.

<b>Algoritmo 2 Función de segmentación de imágenes</b>	
1.	<b>Entrada:</b> imagen, numero-de-grupos, máximas-iteraciones, tolerancia
2.	<b>Salida:</b> Imagen segmentada y centros detectados.
3.	Convertir la imagen en una lista de píxeles.
4.	Inicializar los centros de los grupos de manera aleatoria.
5.	<b>Para</b> cada iteración desde 1 hasta máximas-iteraciones <b>hacer</b>
6.	Calcular la distancia de cada píxel a los centros.
7.	Asignar cada píxel al centro más cercano.
8.	Calcular nuevos centros basados en los píxeles más cercanos.

9.	Verificar la convergencia comparando los nuevos centros con los anteriores.
10.	<b>Si</b> la convergencia es alcanzada <b>entonces</b>
11.	Detener iteraciones
12.	<b>Fin si</b>
13.	<b>Fin para</b>
14.	Reconstruir la imagen segmentada
15.	Devolver los centros detectados
16.	<b>Fin</b>
17.	Guardarla en formato PNG con un nombre único.
18.	<b>Fin para</b>
19.	<b>Fin</b>

## RECORTE Y EVALUACIÓN DE IMÁGENES

En el Tabla 2, se presenta como se lleva a cabo el procesamiento de las subregiones de las imágenes, ordenándolas según su intensidad y seleccionando las más relevantes. Posteriormente, se asignan etiquetas a cada subregión y se anotan en la imagen original con cuadros delimitadores. Tras procesar las subregiones, las imágenes recortadas se guardan en archivos individuales. A partir de los puntos generados, se extrajeron parches de tamaño 128x128 píxeles de cada imagen. Cada subimagen fue evaluada según su contenido informativo, transformándolo en una imagen binaria y calculando la cantidad de píxeles blancos, lo cual refleja la densidad de información. Los parches con mayor cantidad de información fueron seleccionados para un análisis más detallado.

## VISUALIZACIÓN Y GUARDADO DE RESULTADOS

Se visualizó la Figura 3 original con anotaciones que indicaban la ubicación de los puntos con mayor información. Esta visualización facilitó la identificación de las áreas más significativas dentro de las imágenes. Los parches destacados fueron almacenados como archivos individuales para su análisis y uso posterior. Este enfoque permitió identificar y extraer áreas de alta densidad de datos en las imágenes de Saltillo, facilitando un análisis más detallado y enfocado en estas regiones estratégicas.



**Figura 3.** Zona de Saltillo, Coahuila, seleccionada en regiones delimitadoras para el análisis.

## UMBRALIZACIÓN DE IMÁGENES

El proceso comenzó con la obtención de imágenes proporcionadas por el área de desarrollo urbano, en formato de escala de grises, se aplicó un umbral de segmentación, seleccionando un valor de  $T=203$  para mejorar la segmentación en la escala de grises, en función de la clase de intensidad de los píxeles. Este valor fue elegido tras una serie de pruebas de segmentación, buscando un equilibrio entre la separación adecuada de las áreas urbanas y la minimización de errores de clasificación. Este umbral se ajustó de forma que los píxeles con una intensidad entre 0 y 203 se agruparon como fondo, mientras que aquellos con una intensidad superior a 203 se clasificaron como parte del primer plano. Como resultado, la imagen se dividió en dos categorías: áreas construidas y áreas no construidas. En la imagen binaria resultante, los píxeles que superaron el umbral se asignaron al primer plano y se representaron en blanco, indicando áreas construidas, mientras que los píxeles que no alcanzaron el umbral se clasificaron como fondo y se mostraron en negro, representando áreas no construidas. Específicamente, los píxeles con valores de intensidad  $i < 203$ , que corresponden a tonalidades más oscuras e intermedias, se agruparon como fondo (áreas no construidas). En cambio, los píxeles con  $i > 203$ , que presentan tonalidades más claras (cercasas a 255) y representan zonas más brillantes o áreas de interés, se asignaron al primer plano, clasificándose como áreas construidas.

## CUANTIFICACIÓN DE ÁREAS EDIFICADAS

Para cuantificar la extensión de las áreas edificadas, medida en términos de la cantidad de píxeles en la imagen, se calculó el total de píxeles presentes en la imagen segmentada, así como el porcentaje de área edificada en función de los píxeles blancos detectados en cada región de interés. Este cálculo se expresa mediante la ecuación (2).

$$Total_{píxeles} = IS_0 \times IS_1. \quad (2).$$

Donde  $IS_0$  representa el número de filas de la imagen segmentada y  $IS_1$  representa el número de columnas. Luego, se calculó el porcentaje de área edificada en función de la cantidad de píxeles blancos detectados en cada región de interés de la siguiente forma en la ecuación (3):

$$Porcentaje = \frac{Conteo\ de\ Píxeles\ segmentados}{Total\ de\ píxeles} \times 100 \quad (3).$$

## RESULTADOS

En la Figura 4 se muestra el desarrollo urbano en la década de 1960 en Saltillo, la ciudad carecía de la densidad edificatoria de otras urbes, se identificaba un potencial latente en su estructura urbana, se basaba en aspectos como su ubicación estratégica, recursos naturales y su capacidad para atraer inversión y talento humano.

En la Figura 5, se puede observar que para el año 2023 se presentan áreas con una densificación más marcada, este crecimiento también planteaba desafíos, siendo uno de los más destacados el aumento notable de la temperatura. Esta tendencia climática podía atribuirse, al menos en parte, al proceso de urbanización en curso, que modificaba el entorno natural.



**Figura 4.** Saltillo, Coahuila al inicio de su época de desarrollo en 1960.



**Figura 5.** Saltillo en el año 2023, mostrando un nivel alto de edificación.

Durante el 2016, se experimentó un auge considerable en el sector de la construcción, lo que expuso la falta de preparación de la infraestructura existente, la falta de una planificación adecuada se reflejó especialmente en

los errores de segmentación detectados en la distribución urbana. Tales errores pueden haber incluido una asignación desequilibrada de zonas residenciales, comerciales e industriales, así como una planificación inadecuada de las vías de acceso y tránsito.

## DETECCIÓN DE URBANIZACIÓN POR TÉCNICAS DE VISIÓN POR COMPUTADORA

La Figura 6 representa la detección de áreas urbanizadas en Saltillo, la cual se realizó mediante técnicas de visión por computadora, específicamente utilizando la técnica de umbralización en imágenes en escala de grises, permitió identificar y analizar las zonas edificadas, facilitando la evaluación de la expansión urbana. El análisis del crecimiento urbano mediante la umbralización de imágenes históricas ha permitido identificar un patrón de expansión significativa en las áreas construidas de Saltillo a lo largo de las últimas siete décadas. En la Tabla 3 se observan los resultados obtenidos para los años 1960, 1990 y 2023, reflejando la evolución de la urbanización.



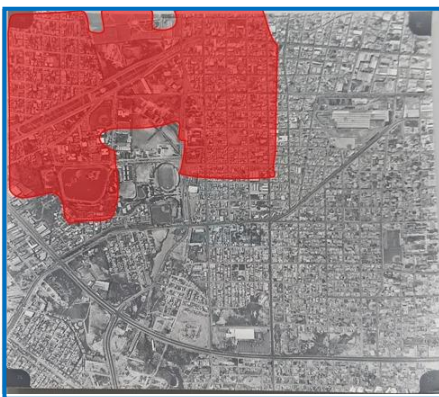
**Figura 6.** Detección de zonas edificadas a través de umbralización.

**Tabla 3.** Crecimiento urbano por medio de análisis de umbralización.

Año de imagen analizada	Porcentaje total de urbanización	Crecimiento respecto a años pasados
1960	4.86%	Sin datos
1990	35.12 %	30.26%
2023	86.77 %	51.65 %

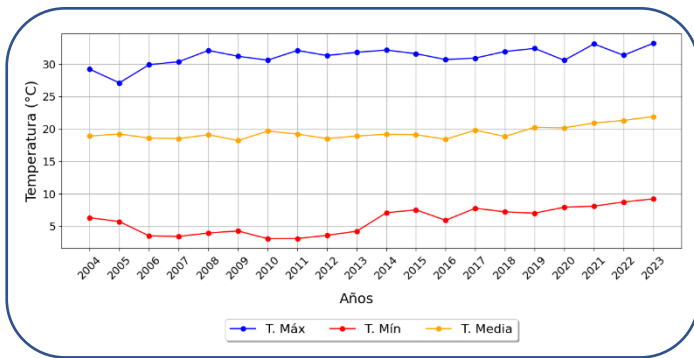
En 1960, las áreas urbanizadas representaban solo el 4.86 % del territorio total analizado. Para 1990, el porcentaje de urbanización aumentó a 35.12 %, lo que supone un incremento del 30.26 % con respecto a 1960, lo anterior asociado con diversos factores, como el aumento de la población y el crecimiento económico. En 2023, el área urbanizada alcanzó un notable 86.77 %, lo que representa un incremento del 51.65 % desde 1990. Este cambio refleja una aceleración significativa en el proceso de urbanización, probablemente impulsada por el continuo crecimiento poblacional.

Al analizar los datos utilizando segmentación, se logró identificar y comparar las áreas con mayor crecimiento de edificaciones en Saltillo. En la Figura 7, las zonas marcadas en rojo destacan las áreas con un incremento significativo en la urbanización. La combinación de segmentación y umbralización en imágenes en escala de grises utilizando como referencia los mapas de calor proporcionados por desarrollo urbano y los resultados de los algoritmos presentados en las Tablas 1 y 2 proporcionaron una herramienta poderosa para visualizar el cambio en la distribución de edificaciones a lo largo del tiempo, lo que es clave para el estudio del crecimiento urbano y su impacto en la planificación de la ciudad.

**Figura 7.** Resultados en segmentación de áreas con mayor crecimiento en la zona de análisis.

## DISCUSIÓN

Desde 2004, la SEMARNAT ha registrado un aumento progresivo en las temperaturas mensuales. Este incremento de la temperatura ha impactado en el desarrollo urbano de Saltillo. El histograma de la Figura 8 subraya un cambio climático significativo en Saltillo, Coahuila, México, que se ha evidenciado desde 2004, interrumpiendo una estabilidad climática que prevalecía desde décadas atrás. Este aumento de temperatura coincide con un período de crecimiento demográfico rápido y significativo en la ciudad, la expansión metropolitana ha desencadenado un fenómeno conocido como



**Figura 8.** Comportamiento de la temperatura desde el año 2004 hasta el año 2023 en Saltillo Coahuila.

"isla de calor urbana", donde las áreas urbanas absorben y retienen el calor, intensificando tanto las temperaturas veraniegas como invernales (Palme y col., 2024). Es crucial reconocer que la crisis climática no solo impacta el entorno natural, sino que

también tiene repercusiones directas en la calidad de vida y la salud de los habitantes de Saltillo. El aumento de las temperaturas puede agravar problemas de salud, además de generar nuevos desafíos, como el estrés térmico en la población. Además, la alteración del clima puede afectar la seguridad alimentaria y el suministro de agua en la ciudad.

## CONCLUSIONES

Este estudio ha demostrado de manera efectiva cómo las técnicas de umbralización y segmentación de imágenes satelitales han permitido cuantificar el notable aumento de urbanización en Saltillo, el cual ha escalado del 4.86% en 1960 a un impactante 86.77% en 2023. La segmentación

ejecutada ha facilitado la identificación de áreas críticas de desarrollo y la creación de islas de calor urbano, evidenciando un aumento de temperatura significativo en la región. Desde 2004, las temperaturas han incrementado, reflejando no solo el cambio climático, sino también las repercusiones directas del desarrollo urbano no planificado. Los datos técnicos obtenidos respaldan la urgente necesidad de políticas urbanas sostenibles. Los resultados cuantitativos obtenidos, junto con la efectividad del proceso de umbralización, subrayan el impacto del crecimiento descontrolado en la calidad de vida de los habitantes, acentuando problemas de salud y comprometiendo la seguridad alimentaria y el suministro de agua. Por último, es vital adoptar estrategias de planificación urbana que integren tanto el crecimiento económico como la protección ambiental. La implementación de infraestructuras verdes y la conservación de áreas naturales son esenciales para mitigar los efectos adversos del crecimiento urbano. Como trabajo a futuro se pretende extender la metodología presentada para el análisis de diferentes ciudades a través de técnicas de aprendizaje automático mediante banco de imágenes satelitales.

## REFERENCIAS

- Bartesaghi-Koc, C., Haddad, S., Pignatta, G., Paolini, R., Prasad, D., and Santamouris, M. (2021). Can urban heat be mitigated in a single urban street? monitoring, strategies, and performance results from a real scale redevelopment project. *Solar Energy*, 216: 564–588.
- Bojórquez, G.C. and Aguilar, M.d.L.R. (2015). Gobernanza climática: actores sociales en la mitigación y adaptación en el estado de Coahuila, México. *Noesis. Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 24(47- 2): 129–146.
- Buyantuyev, A., Wu, J., and Gries, C. (2010). Multiscale analysis of the urbanization pattern of the phoenix metropolitan landscape of usa: Time, space and thematic resolution. *Landscape and Urban Planning*, 94(3-4): 206–217.
- Chapa, F., Hariharan, S., and Hack, J. (2019). A new approach to high-resolution urban land use classification using open access software and true color satellite images. *Sustainability*, 11(19): 5266.
- Cortez, J.H.Z., Guajardo, J.E.G., and González, L.G. (2016). El clima variable a considerar en las empresas- región centro del estado de Coahuila. *Repositorio de la Red Internacional de Investigadores en Competitividad*, 10.

- Divya, Y., Gopinathan, P., Jayachandran, K., and Al- Quraishi, A.M.F. (2021). Color slices analysis of land use changes due to urbanization in a city environment of miami area, south florida, usa. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(1): 537–546.
- Grekouisis, G. (2019). Artificial neural networks and deep learning in urban geography: A systematic review and meta-analysis. *Computers, Environment and Urban Systems*, 74: 244–256.
- Ikotun, A.M., Ezugwu, A.E., Abualigah, L., Abuhaija, B., and Heming, J. (2023). K-means clustering algorithms: A comprehensive review, variants analysis, and advances in the era of big data. *Information Sciences*, 622: 178–210.
- Kleerekoper, L., Van Esch, M., and Salcedo, T.B. (2012). How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect. *Resources, Conservation and Recycling*, 64: 30–38.
- Koop, S.H. and van Leeuwen, C.J. (2015). Assessment of the sustainability of water resources management: a critical review of the city blueprint approach. *Water Resources Management*, 29: 5649–5670.
- Landa, R., Magaña, V., and Neri, C. (2008). *Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático*. Semarnat.
- Levy, J.M., Hirt, S., and Dawkins, C.J. (2009). *Contemporary urban planning*. Pearson/Prentice Hall Upper Saddle River.
- Li, M., Xu, J., and Zhang, X. (2017). Spatial-sensitivity analysis for urban color planning: Study of luoyang city, china. *Journal of Urban Planning and Development*, 143(1), 05016014.
- Mendoza-Hernández, J.M., Zermeño-González, A., Covarrubias-Ramírez, J.M., and Cortés-Bracho, J.J. (2013). Proyecciones climáticas para el estado de Coahuila usando el modelo precio bajo dos escenarios de emisiones. *Agrociencia*, 47(6): 523–537.
- Palme, M., & Carrasco, C. (2024). Isla de calor en ciudades de Chile: una revisión. Intensidad, variabilidad, impactos y medidas de mitigación. En R. Lemoine-Rodríguez, A. Pérez Vega, & J. F. Mas (Eds.), *Avances en el estudio de islas de calor urbano en América Latina* (pp. 306–328). Universidad de Guanajuato.
- Perevochtchikova, M. (2013). La evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales. *Gestión y política pública*, pp: 283–312.
- Pérez, B.M. (2003). Efectos de la urbanización en la salud de la población. In *Anales Venezolanos de Nutrición*, volumen 16: 97–104. Fundación Bengoa.
- Rodríguez Pérez, R.E., Meza González, L., and Castro Lugo, D. (2021). Impacto de la crisis económica del 2008 en el empleo y salarios de las industrias manufacturera y

automotriz de la región sureste de Coahuila de zaragoza. Realidad, datos y espacio. *Revista internacional de estadística y geografía*, 12(1): 4-12.

Romero, H. and Vásquez, A. (2005). Evaluación ambiental del proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de santiago de chile. *Eure (Santiago)*, 31(94): 97–117.

Shahtahmassebi, A., Yu, Z.l., Wang, K., Xu, H.w., Deng, J.s., Li, J.d., Luo, R.s., Wu, J., and Moore, N. (2012). Monitoring rapid urban expansion using a multi-temporal rgb-impervious surface model. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 13: 146–158.

Szeliski, R. (2022). *Computer vision: algorithms and applications* (2.ª ed.). Springer Nature.

Xu, S., Wang, J., Shou, W., Ngo, T., Sadick, A.M., and Wang, X. (2021). Computer vision techniques in construction: a critical review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28: 3383–3397.