

MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO URBANO DE SANTIAGO DE CALI MEDIANTE EL MODELO SLEUTH: ANÁLISIS CUANTITATIVO PARA SOPORTE A LA PLANIFICACIÓN TERRITORIAL

Presentado por:

**JUAN SEBASTIAN CUBILLOS
CARDONA
CRISTIAN DAVID RAMOS HURTADO**

Director

JORGE HERNAN NAVARRO

Codirector

FRANCISCO HERNÁNDEZ



**Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Ingeniería Topográfica
2025**

DEDICATORIA

Cristian David Ramos

Dedico esta tesis en especial a mi madre, mi mayor pilar, ejemplo de fortaleza y amor incondicional. Gracias por ser la guía constante en mi vida y por enseñarme el significado de resiliencia. A mis hermanas, que son y siempre serán el mayor motivo de mi lucha diaria; su existencia le da sentido a cada paso que doy. A mi padre, porque a pesar de sus desaciertos, su presencia me ha dejado valiosas lecciones. Gracias a él también he aprendido sobre la vida, la resiliencia y la importancia de forjar mi propio camino con convicción.

A mi familia, ese bastón firme que me ha sostenido en cada etapa, quienes con su amor, esfuerzo y ejemplo han moldeado al profesional y al hombre que hoy soy. Este trabajo nunca fue un camino solitario; aunque el título lleve mi nombre, en él habita cada uno de ustedes, quienes han estado detrás de cada logro alcanzado y de los muchos que vendrán con la ayuda de Dios. A la memoria de mis familiares, cuya sabiduría y ejemplo siguen guiando mis pasos. Aunque ya no estás físicamente, tu legado vive en mí y en este logro que con orgullo les dedico.

Y a mis amigos, gracias. Ustedes también forman parte de este proceso. Con su apoyo y su presencia en los momentos difíciles han sido un respaldo invaluable e incondicional.

Juan Sebastián Cubillos

Suelo creer que los logros no son completamente personales, pues detrás de ellos hay siempre el aporte invaluable de quienes nos rodean. Este no es un caso aislado. Esta tesis no habría sido posible sin el ejemplo, el apoyo y el esfuerzo de cada una de las personas que formaron parte de este proceso.

En primer lugar, dedico este logro a las mujeres de mi familia, quienes me han enseñado con el ejemplo los valores del respeto, el trabajo y la responsabilidad. A mi madre, a quien amo con todo mi corazón y a quien siempre he visto con ojos de admiración por su infinita fortaleza; a mis abuelas, por su apoyo incondicional y el profundo orgullo que siento de ser su nieto; a mi tía, quien me acogió como a un hijo y me hizo sentir a mis prim@s como verdaderos hermanos y hermanas; a mi hermana, a quien quiero con el alma y de quien estoy seguro de que llegará aún más lejos. A mi padre, por sus consejos y por su constante acompañamiento, y a mi tío, por su valioso ejemplo de esfuerzo y dedicación.

Son tantas las personas que aportaron en este camino que sería imposible nombrarlas a todas, pero en mí viven sus recuerdos y todo lo que aprendí de cada una de ellas. A mis compañeros de carrera, que me acompañaron y apoyaron a lo largo de cada semestre, gracias por ser parte de este viaje. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

A todos, infinitas gracias.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos en primer lugar a Dios, por guiarnos con sabiduría, fortaleza y paciencia a lo largo de este camino. Su presencia ha sido fundamental en los momentos de mayor dificultad y también en los logros alcanzados.

A nuestra alma mater, la Universidad del Valle, por acogernos y brindarnos una formación integral y de excelencia. Al Programa Académico de Ingeniería Topográfica, que nos permitió desarrollar nuestras capacidades profesionales y humanas, y del cual nos enorgullece recibir nuestro título.

Expresamos un sincero agradecimiento a nuestro director de tesis, el profesor Jorge Hernán Navarro López, por su orientación constante y compromiso durante el desarrollo de esta investigación, además de su confianza y poner a nuestra disposición los requerimientos técnicos utilizados en el desarrollo de este trabajo. Su acompañamiento fue clave para la culminación de este proceso. De igual forma, agradecemos a nuestro codirector Francisco Hernández, por ser un apoyo fundamental y estar siempre dispuesto a guiarnos con dedicación y criterio.

Reconocemos también el trabajo de todos los profesores de la facultad, quienes aportaron con su conocimiento y vocación a nuestra formación. En especial, agradecemos al profesor César Edwin García, por estar siempre dispuesto a colaborar y contribuir con generosidad al desarrollo de nuestro trabajo.

Extendemos nuestro agradecimiento a los jurados evaluadores, quienes se tomaron el tiempo de revisar con atención este valioso trabajo y aportar observaciones que enriquecieron significativamente el resultado final.

Finalmente, agradecemos a nuestros compañeros de carrera, quienes fueron un apoyo incondicional en cada etapa de este recorrido. Compartir esta experiencia con ustedes fue fundamental para superar los desafíos y disfrutar de cada logro.

A todos, gracias por ser parte de este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	6
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	7
CAPÍTULO II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
CAPÍTULO III. OBJETIVOS.....	9
Objetivo Principal	9
Objetivos Específicos:.....	10
CAPÍTULO IV. JUSTIFICACIÓN.....	10
CAPÍTULO V. REVISIÓN DE LITERATURA.....	12
MARCO TEÓRICO.....	12
MARCO CONCEPTUAL.....	16
MARCO REFERENCIAL	17
CAPÍTULO VI. METODOLOGÍA.....	18
CAPÍTULO VII. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	33
DISCUSIÓN	43
CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES.....	47
CAPÍTULO IX. TRABAJOS FUTUROS.....	48
CAPÍTULO X. BIBLIOGRAFÍA.....	49

Tabla de tablas

Tabla 1. Datos de entrada SLEUTH.	13
Tabla 2. Datos de entrada para Santiago de Cali.	20
Tabla 3. Estadísticas de calibración SLEUTH.	28
Tabla 4. Especificaciones técnicas de formato para las capas de entrada.	30
Tabla 5. Datos de calibración zona Norte de la ciudad.	31
Tabla 6. Datos de calibración zona Sur de la ciudad.	32
Tabla 7. Datos de predicción para el Norte y Sur de la ciudad.	32
Tabla 8. Tabla de coeficientes vs otros estudios SLEUTH.	43

Tabla de figuras

Figura 1. Funcionamiento básico de un autómata celular.	12
Figura 2. Relación entre reglas de crecimiento y coeficientes de crecimiento del modelo SLEUTH.	14
Figura 3. Reglas de automodificación del SLEUTH.(Clarke et al., 1997).	16
Figura 4. Zona de estudio.	19
Figura 5. Diagrama de metodología basado en (CAMPINAS BRASIL).	19
Figura 6. Gif de entrada de urbanización 1984.	23
Figura 7. Gif de entrada de urbanización 1997.	23
Figura 8. Gif de entrada de urbanización 2008.	24
Figura 9. Gif de entrada de urbanización 2020.	24
Figura 10. Gif de entrada de vías 1984.	25
Figura 11. Gif de entrada de vías 2020.	25
Figura 12. Gif de exclusión.	25

Figura 13. Gif de pendiente.....	25
Figura 14. Gif de sombreado.....	26
Figura 15. Tamaño representativo de corte - zona Norte	27
Figura 16. Tamaño representativo de corte - zona Sur	27
Figura 17. Representación gráfica de coeficientes de predicción zona Norte vs zona Sur de la ciudad.	34
Figura 18. Representación gráfica del índice Lee Salle y Kappa para el Norte vs Sur de la ciudad. .	35
Figura 19. Representación gráfica del comportamiento de los coeficientes para la zona Norte de la ciudad hasta el año 2050.	36
Figura 20. Representación gráfica del comportamiento de los coeficientes para la zona Sur de la ciudad hasta el año 2050.	37
Figura 21. Salida cartográfica de predicción para el año 2050, Norte de la ciudad.....	39
Figura 22. Salida cartográfica de predicción para el año 2050, Sur de la ciudad.	39
Figura 23. Representación gráfica del porcentaje de urbanización año a año en la zona Norte 2021- 2050.....	40
Figura 24. Representación gráfica de urbanización año a año por km ² zona Norte 2021-2050.	40
Figura 25. Representación gráfica del porcentaje de urbanización año a año en la zona Sur de la Ciudad 2021-2050.....	41
Figura 26. Representación gráfica de urbanización por km ² año a año en la zona zona Sur 2021-2050.	42
Figura 27. Representación gráfica comparativa de porcentaje de urbanización Norte vs Sur 2021- 2050.....	42
Figura 28. Representación gráfica de crecimiento urbano acumulado para 2050 en Km ²	43
Figura 29. Representación gráfica del coeficiente Slope obtenido vs Slope de otros estudios SLEUTH.	45
Figura 30. Representación gráfica del coeficiente Road gravity obtenidos vs Road gravity de otros estudios SLEUTH.	46

RESUMEN

Este estudio aplicó el modelo de crecimiento urbano SLEUTH para simular y predecir la expansión urbana de Santiago de Cali entre 2021 y 2050. La investigación integró teledetección, sistemas de información geográfica (SIG) y análisis espacial multitemporal, dividiendo la ciudad en dos zonas (norte y sur) debido a su marcada heterogeneidad. La calibración del modelo alcanzó métricas de ajuste destacables, con un índice Lee-Sallee de 0.80 en la zona norte y 0.61 en la sur, superando estudios similares realizados en Praia (0.58), Mangaluru (0.51) y Kaduna (0.39). Los resultados mostraron patrones diferenciados: el norte proyecta un crecimiento contenido, mientras que el sur experimenta una expansión acelerada hasta 2037. La validación con imágenes satelitales de 2024 arrojó un coeficiente Kappa de 0.89 (norte) y 0.78 (sur), confirmando la solidez del modelo. SLEUTH se consolida, así, como una herramienta eficaz para anticipar dinámicas urbanas, sustentar decisiones de planificación y formular estrategias diferenciadas para el crecimiento urbano sostenible en contextos complejos como Cali.

Palabras claves: Crecimiento Urbano, Autómatas Celulares, Simulación urbana, modelo SLEUTH, Teledetección.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El siglo XXI ha sido testigo de transformaciones profundas en las dinámicas poblacionales a escala global. Entre ellas, la urbanización se consolida como uno de los procesos más determinantes del cambio territorial (Brian, 2008). La distinción entre lo urbano y lo rural se ha desvanecido progresivamente, reflejando una transformación en las formas de organización social, de interacción colectiva y de afrontamiento de los retos estructurales contemporáneos.

Este escenario plantea una necesidad urgente de fortalecer la planificación territorial como herramienta clave para garantizar la sostenibilidad ambiental, la equidad social y la eficiencia en la provisión de servicios. La urbanización no planificada genera efectos negativos como presión sobre los recursos naturales, aumento de la desigualdad socioeconómica, congestión vial y deterioro ambiental (Pérez, 2019). Frente a este panorama, el uso de modelos predictivos y herramientas de análisis espacial adquiere un papel protagónico en la gestión urbana.

Diversos enfoques han sido desarrollados para simular el crecimiento urbano, desde modelos basados en agentes, modelos gravitacionales, redes neuronales hasta autómatas celulares, cada uno con diferentes niveles de representación espacial, social y ambiental (Mas, 2010). La selección de una metodología debe considerar su capacidad de adaptación al contexto local, su robustez técnica y su nivel de precisión.

En este estudio se ha elegido el modelo SLEUTH, desarrollado por Keith C. Clarke en la Universidad de California, debido a su demostrada eficacia en entornos urbanos complejos (Linares & Clarke, 2018). Esta selección se sustentó en una revisión exhaustiva de la literatura y en la evaluación de su capacidad para modelar procesos espaciales con base en autómatas celulares. SLEUTH permite integrar variables clave como uso del suelo, pendiente, restricciones normativas y red vial, lo que lo convierte en una herramienta versátil y altamente personalizable.

Estudios previos han demostrado su utilidad en contextos diversos (CESPAO, 2007; Pedro & Zamyatin, 2006), permitiendo simular escenarios futuros de urbanización y facilitar la toma de decisiones en materia de ordenamiento territorial. En el caso de Santiago de Cali, la aplicación del modelo SLEUTH se orienta a anticipar patrones de crecimiento urbano y generar insumos técnicos que favorezcan estrategias sostenibles de planeación.

Desde el enfoque metodológico, se realizó una clasificación supervisada multitemporal de imágenes satelitales Landsat mediante Google Earth Engine. Posteriormente, las capas de uso del suelo, red vial, áreas excluidas y pendiente fueron procesadas y rasterizadas para ser utilizadas como insumos del modelo. La calibración del modelo se ejecutó en tres fases (gruesa, fina y final), empleando validación cruzada con la métrica Lee-Sallee, y la predicción se extendió hasta el año 2050. El análisis se realizó por zonas diferenciadas (norte y sur de Cali), dada la heterogeneidad espacial evidenciada en los patrones históricos de crecimiento.

Los resultados del modelo evidenciaron patrones diferenciados de crecimiento urbano en las zonas norte y sur de la ciudad. Mientras la zona norte mostró una expansión más controlada,

influenciada por las restricciones normativas y físicas del territorio, la zona sur reflejó un crecimiento más acelerado, condicionado por la disponibilidad de suelo y la presencia de vías estructurantes. Estas proyecciones permiten visualizar posibles escenarios de urbanización futura y constituyen una herramienta valiosa para la formulación de políticas públicas.

CAPÍTULO II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas (UN DESA, 2018), la población urbana mundial pasó de 751 millones en 1950 a 4.200 millones en 2018, con proyecciones que indican que alcanzará los 6.700 millones en 2050. Esto implica que, para ese año, el 68 % de la población mundial vivirá en zonas urbanas, frente al 55 % registrado en 2018. Este crecimiento, más allá de su carácter demográfico, representa un reto multidimensional en la gestión territorial y el desarrollo urbano. En las regiones en desarrollo, este fenómeno se ha intensificado. En América Latina y el Caribe, el porcentaje de población urbana creció del 40 % en 1950 al 80 % en 2018 (UNDESA, 2018).

Colombia no ha sido la excepción. (DANE, 2021) indica que el país ha transitado hacia una estructura predominantemente urbana, con capitales que superan el 90 % de urbanización.

Santiago de Cali, capital del departamento del Valle del Cauca, ubicado en el suroccidente colombiano, dentro del valle geográfico del río Cauca, delimitado por la Cordillera Occidental y la Cordillera Central de los Andes. Esta localización estratégica ha facilitado su desarrollo como un nodo urbano clave del suroccidente del país, consolidándola como la tercera ciudad más poblada de Colombia, con más de 2.3 millones de habitantes para el año 2023 (DANE, 2023). Su área metropolitana abarca aproximadamente 560 km², lo que evidencia su importancia no solo en términos poblacionales, sino también territoriales. Los datos del Censo Nacional de Población y Vivienda evidencian que la cabecera municipal alcanzó una cobertura urbana del 99,4 %, mientras que en la ciudad fue del 99,3 % (DANE, 2019). Asimismo, se reporta un incremento superior a 100.000 viviendas en zonas urbanas durante la última década.

Durante las últimas décadas, Cali ha experimentado un proceso sostenido de expansión urbana, impulsado principalmente por el crecimiento demográfico, la presión por el acceso a vivienda, la demanda de servicios públicos, y la ampliación de la infraestructura vial y de transporte (Camargo, Potes y Aguilera, 2022). Este crecimiento ha transformado significativamente la estructura territorial de la ciudad, extendiendo la mancha urbana sobre áreas rurales y zonas ambientalmente sensibles, en particular en el sur de la ciudad, donde se ha evidenciado una urbanización intensiva sin una adecuada planificación previa.

Una de las manifestaciones más claras de esta dinámica se refleja en el aumento del número de viviendas. Entre los años 2017 y 2023, en sectores del sur de Cali, el número de viviendas pasó de 7.944 a 14.567 unidades, lo que representa un incremento del 83,35 % (Alcaldía de Santiago de Cali, 2022). Este crecimiento acelerado, al no estar articulado con instrumentos de planificación territorial actualizados, ha generado serias problemáticas sociales, ambientales y de infraestructura. Se destacan entre ellas la aparición de asentamientos informales, la sobrecarga de servicios públicos, el aumento de la congestión vehicular, la disminución de la cobertura vegetal, y la vulnerabilidad ante riesgos naturales como inundaciones y deslizamientos (Vergara, Arias y Rodríguez; 2020).

Estudios como los de (Mercedes Hoyos, 1990) ya advertían desde hace décadas sobre los

efectos negativos del crecimiento urbano sin control, especialmente cuando las dinámicas de expansión se desarrollan al margen de los Planes de Ordenamiento Territorial (POT). En el caso de Cali, el POT vigente desde 2014 ha sido ampliamente sobrepasado por la velocidad de la expansión, generando vacíos normativos y administrativos en la gestión del suelo urbano. Esta situación ha llevado a que se prioricen soluciones fragmentadas como proyectos habitacionales sin soporte de servicios integrales, en lugar de estrategias de urbanismo sostenible y equitativo.

Por otro lado, el crecimiento urbano de Cali entre 1990 y 2010 respondió en buena parte a una explosión demográfica que no fue acompañada de un proceso riguroso de planificación. La ciudad creció más por necesidad que por diseño, y gran parte del tejido urbano actual responde a lógicas de mercado y ocupación espontánea más que a decisiones técnicas o sociales estructuradas (Fundación Corona, 2020). Esta falta de enfoque integral ha impedido que Cali se planifique de acuerdo con sus características geográficas, sociales y ambientales, dificultando la consolidación de un modelo de ciudad sostenible, incluyente y resiliente.

Ante este escenario, resulta fundamental desarrollar herramientas de análisis espacial y prospectivo que permitan modelar el crecimiento urbano futuro de la ciudad. Los modelos de simulación territorial, como SLEUTH o Cellular Automata, han demostrado ser útiles para proyectar escenarios de expansión bajo diferentes condiciones y restricciones (Silva y Clarke, 2002; Herold et al., 2005). Aplicar estos enfoques en contextos como el de Cali podría permitir anticipar los impactos territoriales del crecimiento, así como orientar de forma más eficiente la toma de decisiones en planificación urbana, gestión de suelos y protección ambiental.

En este contexto, surgen las siguientes preguntas orientadoras que guían esta investigación:

¿Cómo se ha comportado espacial y temporalmente la expansión urbana en la ciudad de Cali durante las últimas décadas?

¿Cuáles son los principales factores que han influido en la expansión desorganizada del sur de Cali y qué patrones pueden identificarse a partir de la evidencia empírica?

¿Cómo puede modelarse el crecimiento urbano futuro en Cali?

Estas preguntas permiten delimitar el problema central de investigación: la ausencia de herramientas analíticas y de modelación que permitan anticipar, evaluar y planificar el crecimiento urbano de Santiago de Cali, ha contribuido a una expansión desorganizada con consecuencias negativas sobre la calidad de vida, el entorno ambiental y la eficiencia del uso del suelo urbano. Modelar estas dinámicas de expansión, desde una perspectiva territorial y técnica, es clave para contribuir a una gestión urbana más informada, sostenible y resiliente.

CAPÍTULO III. OBJETIVOS

El presente trabajo se enfoca en la modelación del crecimiento urbano de la ciudad de Cali mediante la aplicación del modelo SLEUTH. Este sistema de simulación juega un papel fundamental en la comprensión y anticipación de las dinámicas urbanas, permitiendo una planificación territorial más efectiva y sostenible.

Objetivo Principal

Implementar el modelo SLEUTH para predecir el crecimiento urbano en la ciudad de Santiago de Cali entre 2021 y 2050.

Objetivos Específicos:

Recolectar y analizar los datos espaciales y temporales sobre el crecimiento urbano de Santiago de Cali, incluyendo imágenes satelitales y registros geoespaciales, para alimentar el modelo SLEUTH.

Calibrar y adaptar el modelo al contexto físico e histórico para la ciudad de Santiago de Cali, utilizando técnicas de validación y ajuste paramétrico, con el fin de asegurar una simulación confiable del crecimiento.

Evaluar la capacidad predictiva del modelo mediante métricas de precisión, para generar recomendaciones orientadas a la planificación urbana de la ciudad.

CAPÍTULO IV. JUSTIFICACIÓN

El crecimiento urbano es una dinámica compleja que influye y afecta la vida de millones de personas en el mundo (Zhang et al., 2023), desde la calidad de aire, de vida y tiempos de movilidad de las personas del entorno en el que se desarrolla. Predecirlas para entender y anticiparse a ellas es una tarea fundamental en la gestión territorial, con el fin de desarrollarlo de una manera accesible, óptima y equitativa (Zhang et al., 2023).

Aún con la importancia que anticiparse a estas dinámicas supone, en la ciudad de Cali no existen modelos predictivos de crecimiento urbano, pues de la variabilidad de modelos existentes, ninguno ha sido ajustado al entorno caleño, aún cuando este ha experimentado un crecimiento acelerado en las últimas décadas. Al ser la tercera ciudad más importante y poblada del país, según registros oficiales del DANE, se observa cómo ha crecido urbanísticamente hasta el año 2018 ya que en las viviendas urbanas de estrato 1 en 1973 eran 134.060 y pasaron a ser 503.555. en el caso de los estratos 2 y 3 eran de 3.262 para el año 1973 y en el año 2018 terminó con un censo de 20.960, representando este crecimiento desmedido dentro de la ciudad (Patrones y Tendencias de La Transición Urbana En Colombia, n.d.).

La modernización urbana y la expansión de la ciudad han estado vinculadas a la construcción de nuevas vías y la demolición de edificaciones antiguas para ampliar estas según el artículo del autor (Varela et al., 2020), siendo una de las causas de este crecimiento urbano. La administración municipal no dimensionó a futuro una estructura de ciudad-región acorde con el desarrollo y las constantes migraciones poblacionales, lo que sugiere que la planificación ha sido insuficiente en la ciudad. Sin embargo, a lo largo de los últimos 48 años, los usos del suelo destinados a vías han experimentado una disminución constante, con tasas de reducción del 10% cada veinte años desde 1969. Este enfoque en la expansión como un medio para abordar la congestión que ha contribuido al crecimiento no planificado de la ciudad (Varela et al., 2020).

La falta de planificación urbana adecuada y de actualización del plan vigente han dado lugar

a una serie de problemas en Cali, incluyendo daños a humedales y fuentes hídricas, congestión creciente, la aparición de asentamientos informales, la insuficiencia de infraestructura básica y la amenaza de inundaciones, entre otros desafíos. Estos problemas no solo afectan la calidad de vida de los habitantes de la ciudad, sino que también plantean preocupaciones ambientales y de seguridad a largo plazo como lo mencionó Varela (2020).

Para abordar los desafíos del crecimiento urbano de manera efectiva, se enfatiza la necesidad de una toma de decisiones informada. Los planificadores y los líderes clave deben acceder a datos precisos y proyecciones exactas sobre el crecimiento y el uso del suelo. Esto implica la implementación de un seguimiento continuo y reportes detallados sobre la evolución urbana. La importancia de contar con una modelización precisa del proceso de urbanización se destaca como un factor crucial para llevar a cabo análisis y planificación efectiva. Este enfoque, respaldado por (R et al. 2018), subraya la necesidad de una comprensión precisa de la dinámica de la urbanización para tomar decisiones informadas y estratégicas que aborden los desafíos de dicho crecimiento.

Según Zhang et al. (2023) se considera cada vez más el crecimiento urbano futuro en la etapa de planificación, lo que hace que las proyecciones de crecimiento urbano sean esenciales para la planificación urbana a largo plazo. Los modelos de crecimiento urbano son la herramienta principal para generar proyecciones de crecimiento urbano.

Para predecir el crecimiento urbano en áreas centrales, se ha recurrido al uso del modelo de automatización celular. Este modelo matemático se emplea para simular la dinámica de sistemas complejos, entre ellos, el crecimiento urbano. Al adaptar los modelos predictivos de crecimiento, el enfoque de la automatización celular se ha convertido en un recurso ampliamente utilizado en la investigación de sistemas urbanos, incluyendo el análisis del crecimiento urbano y la planificación del uso del suelo (Shen et al., 2007).

Un aspecto importante de este proyecto radica en comprender cómo la infraestructura vial, especialmente las vías de transporte, influye en el crecimiento urbano. SLEUTH aborda integralmente esta dimensión, ofreciendo valiosas perspectivas sobre cómo las redes de transporte pueden influir, dirigir o impulsar el desarrollo urbano, una perspectiva esencial para la planificación basada en evidencia. La influencia del transporte en la creación de nuevas áreas urbanas se destaca en el estudio de (Rafiee et al., 2009), lo que enfatiza la relevancia de la proximidad de las vías como un factor en el crecimiento urbano de la ciudad. En países en desarrollo, la disponibilidad de datos es una preocupación clave para este tipo de análisis, considerando la alta sensibilidad de SLEUTH a la resolución espacial de los datos (Al-Shalabi M, 2013).

El desarrollo de este proyecto generará varios productos técnicos y científicos que pueden ser utilizados tanto por entidades públicas como por la comunidad académica. Entre ellos se encuentran: mapas temáticos de proyección de crecimiento urbano para el periodo 2021–2050, reportes técnicos con el análisis de escenarios alternativos de expansión urbana, y un documento metodológico detallado sobre la aplicación del modelo SLEUTH en el contexto de Cali.

Estos productos están diseñados para ser herramientas de apoyo en la toma de decisiones por parte de instituciones como la Subdirección de Ordenamiento Territorial de la Alcaldía de Santiago de Cali, el Departamento Administrativo de Planeación Municipal (DAPM), la CVC,

organismos de gestión de riesgo, y centros de investigación en planificación territorial. De igual forma, podrán ser utilizados en el ámbito académico para replicar o adaptar la metodología en otros contextos urbanos de Colombia y América Latina.

Los usos esperados de estos productos incluyen la actualización o formulación de instrumentos de planificación como el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), planes parciales de desarrollo, proyectos de infraestructura urbana y estrategias de mitigación del crecimiento descontrolado. Además, facilitarán la identificación de zonas de alta presión urbana, posibles conflictos de uso del suelo, y áreas prioritarias para conservación ambiental o inversión en equipamiento.

Como beneficios derivados de estos usos, se espera mejorar la calidad de los procesos de planificación urbana mediante información científica y espacialmente explícita, contribuir a una expansión urbana más ordenada y sostenible, prevenir la ocupación de zonas de riesgo o ambientalmente sensibles, y optimizar la asignación de recursos públicos para infraestructura. A nivel académico, el proyecto aportará una experiencia aplicada de modelación urbana en un entorno latinoamericano complejo, fortaleciendo las capacidades locales en el uso de herramientas de simulación espacial.

CAPÍTULO V. REVISIÓN DE LITERATURA

MARCO TEÓRICO

Los autómatas celulares (AC) son sistemas que consisten en una colección de pequeñas unidades llamadas "celdas", que se organizan en una cuadrícula o en una estructura similar (Kari, 2005). Cada celda tiene un conjunto específico de estados posibles y se actualiza en función de los estados de las celdas vecinas en el paso del tiempo anterior. Esto significa que el estado futuro de una celda depende de su estado actual y del estado de las celdas que la rodean. En cada paso de tiempo, las celdas cambian de estado en función de las reglas de transición locales que se aplican a las celdas vecinas. Estas reglas de transición pueden ser determinísticas o estocásticas y pueden ser simples o complejas. Los ACs son sistemas descentralizados, lo que significa que no hay una entidad central que coordine su comportamiento. En cambio, cada celda sigue reglas locales simples para actualizar su estado. Los autómatas celulares se han utilizado para modelar una amplia variedad de sistemas, desde la física y la biología hasta la economía y la sociología. Además, los autómatas celulares son una herramienta útil para explorar la complejidad y la emergencia de patrones en sistemas dinámicos (Kari, 2005), específicamente para los sistemas urbanos, los AC son idóneos debido a su dinámica y cualidades espaciales, así como la expresión de características de los sistemas complejos, adicionalmente el espacio de cuadrículas de los autómatas dinamiza el uso de plataformas SIG.(Márquez Lobato, 2008).

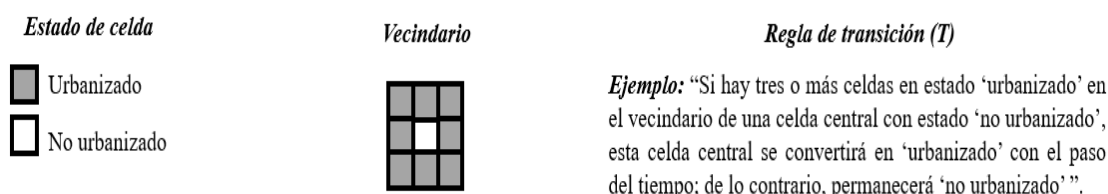


Figura 1. Funcionamiento básico de un autómata celular.

El modelo SLEUTH consta principalmente de; 2 sub-modelos, modelo de cobertura terrestre (LCD) y urban growth model (UGM), el primero se encarga de las capas de uso del suelo por lo cual es opcional usarlo, pues el modelo puede funcionar solo con UGM, capas de entrada, el proceso de calibración y la automodificación. (Bajracharya, 2016).

El modelo SLEUTH es uno de los modelos de simulación urbana más populares, que son aplicados en diferentes contextos, aparte de la ventaja de ser un modelo basado en AC, el entorno de código abierto y los pocos datos requeridos lo han hecho más popular (Dey & Sharma, 2024), El modelo SLEUTH simula y predice el crecimiento urbano basándose en la tendencia generada a partir de los datos históricos de entrada. (Chaudhuri, 2019). El modelo es un acrónimo de (Slope, Land, Exclusión, Urbanization, Transportation, Hillshade) que corresponden a las variables de entrada, que deben ser cargadas al modelo en formato GIF de 8 bits. El modelo funciona con estados binarios en sus celdas (urbanizado/ no urbanizado).(Clarke et al., 1997).

Entradas

Tabla 1. Datos de entrada SLEUTH.

ENTRADAS MODELO SLEUTH DE CLARKE				
Variables		# Escenas mínimo	Tipo	Descripción
Slope	Pendiente	1	Obligatorio	Capa de pendientes de la zona de estudio
Land Use	Clasificación de suelo	2	Opcional	Clasificación de suelo de la zona de estudio
Exclusion	Exclusión	1	Obligatorio	Zonas donde se prohíbe urbanizar
Urbanization	Urbanización	4	Obligatorio	Zonas urbanizadas de la zona de estudio
Transportation	Transporte	2	Obligatorio	Vías de transporte de zona de estudio
Hillshade	Sombreado	1	Opcional	Capa de sombreado con fines de visualización

Coeficientes de crecimiento

Los coeficientes de crecimiento son el factor impulsor y determinante de cambios en el avance del modelo, SLEUTH se basa en 5 coeficientes de crecimiento, estos coeficientes controlan las 4 reglas de crecimiento, la relación entre estos se expone en la (Figura 2), los coeficientes pueden tener valores entre 0 y 100, los coeficientes son: DIFFUSION el cual establece la dispersión general de la distribución de cada celda individual y sus vecinas así como la creación de nuevos asentamientos hacia afuera a través de carreteras, BREED determina la probabilidad de que un asentamiento nuevo se convierta en un centro de crecimiento, SPREAD es el determinante de la expansión “orgánica” o común que tiene hacia afuera el sistema SLOPE o PENDIENTE es el factor que influye si los asentamientos se extienden por pendientes pronunciadas e ROAD GRAVITY O INFLUENCIA DE CARRETERAS, tiene por objeto atraer nuevos asentamientos al sistema de carreteras según la influencia de esta.(NCGIA, 2025;Clarke et al., 1997).

Reglas de crecimiento

Las transiciones de las celdas se establecen a partir de las 4 reglas de crecimiento, crecimiento espontáneo, difusión de nuevos centros de crecimiento, borde de crecimiento e influencia de carretera. El crecimiento espontáneo (SPONTANEOUS) ocurre cuando una celda elegida aleatoriamente está cercana (lo suficiente) a una celda ya urbanizada reflejando la influencia de antiguas áreas a los nuevos entornos de urbanización; el crecimiento difusivo (DIFFUSIVE) urbaniza celdas cercanas al crecimiento espontáneo, para determinar si se convierte en un nuevo centro de crecimiento; el crecimiento orgánico (ORGANIC) determina la probabilidad de expandirse a partir de centros de expansión existente también llamado crecimiento de borde y por último el crecimiento por carreteras (ROAD INFLUENCED), como su nombre indica simula el crecimiento que tiene lugar influenciado por la infraestructura de vías y su accesibilidad; (NCGIA, 2025;Clarke et al., 1997).

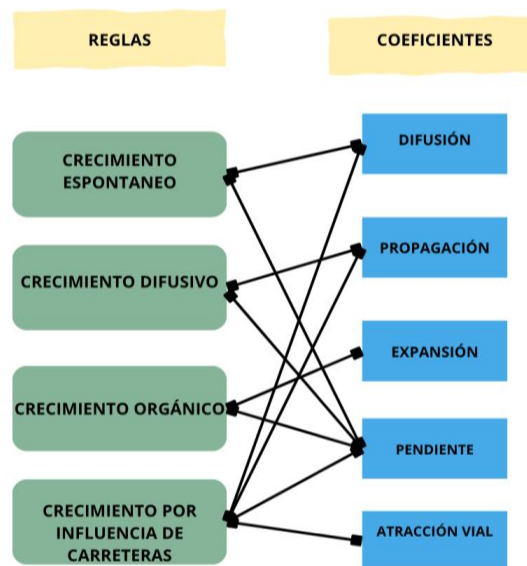


Figura 2. Relación entre reglas de crecimiento y coeficientes de crecimiento del modelo SLEUTH.

El ajuste del modelo se realiza a través de un método de fuerza bruta que se divide en tres etapas progresivas para encontrar los valores precisos de los coeficientes y así se ajuste a la zona de estudio requerida, las tres etapas consisten en reducir la resolución de los datos de entrada e ir progresivamente reduciendo el rango de valores hasta encontrar los valores óptimos, con el fin de elegir los mejores coeficientes del modelo se utiliza la métrica LEE-SALLE detallada en secciones posteriores.(NCGIA, 2025).

(calibración gruesa): Se inicia con la exploración de un amplio rango de cinco coeficientes de control de crecimiento, utilizando valores variados para cada coeficiente y reduciendo la resolución de los datos a una cuarta parte de su tamaño original. Esta fase establece un punto de partida para la refinación posterior (Silva & Clarke, 2002; Rafiee et al., 2009).

(calibración fina): Se reduce la resolución de los datos a la mitad y se realizan múltiples iteraciones Monte Carlo para afinar los cinco coeficientes, utilizando como base los valores identificados en la fase de exploración inicial. Aunque la resolución es mayor que en la etapa inicial, aún no alcanza la resolución completa. Los resultados de esta fase se toman como referencia para la última etapa (Silva & Clarke, 2002; Rafiee et al., 2009).

(calibración final): En esta fase, se utiliza la resolución completa de los datos y se ejecutan

más iteraciones Monte Carlo para ajustar los coeficientes de manera más precisa. Estos ajustes se basan en los valores refinados obtenidos en la etapa de ajuste previa, con el objetivo de lograr una calibración precisa y final del modelo (Silva & Clarke, 2002; Rafiee et al., 2009).

Automodificación

Es uno de los mecanismos principales del SLEUTH, se encarga de establecer dinámicamente los coeficientes de crecimiento a partir del comportamiento del sistema durante la simulación. pretende reflejar de manera realista cómo un entorno urbano puede presentar fases de aceleración (BOOM) o desaceleración (BUST) del crecimiento, basado en las condiciones internas del sistema y a sus tasas de expansión.(Clarke et al., 1997).

Para cada ciclo de crecimiento (cada año de simulación), SLEUTH calcula una tasa de crecimiento total, que es la suma de las áreas urbanizadas mediante los 5 tipos de crecimiento (DIFUSSION, BREED, SPREAD, ROAD GRAVITY ,SLOPE). Basándose en esta tasa, el modelo evalúa si se encuentra en un estado de crecimiento rápido (BOOM), estable(NORMAL) o de crecimiento lento o nulo (BUST). (Márquez Lobato, 2008). El creador (Clarke et al., 1997) y la web oficial (NCGIA, 2025) del modelo lo explica de la siguiente manera:

Crecimiento rápido - BOOM

Si la tasa de crecimiento urbano anual supera el umbral con nombre CRITICAL_HIGH, se deduce que el sistema está en una fase de crecimiento acelerado. En este caso,

- El coeficiente de DIFUSSION se multiplica por un valor mayor a 1.0

- El coeficiente SPREAD se multiplica por un valor mayor a 1.0

- El coeficiente BREED se multiplica por un valor mayor a 1.0

Esta configuración estimula el crecimiento.

Crecimiento NORMAL

Cuando la tasa de crecimiento se mantiene entre valores CRITICAL_LOW y CRITICAL_HIG, el sistema se considera en estado de crecimiento moderado o estable. En este escenario

- Si la pendiente promedio es mayor al 10% se aumenta DIFUSSION

- Proporcionalmente a la densidad de la red vial aumenta ROAD GRAVITY

- SLOPE_RESISTANCE se ajusta aumentando un 0.2% por cada porcentaje de suelo urbano existente

Estos ajustes pretenden ajustar el crecimiento de manera más sensible a las características del terreno y la infraestructura urbana.

Crecimiento lento o nulo - BUST

Si la tasa de crecimiento cae por debajo del umbral CRITICAL_LOW, el modelo interpreta que el sistema está en estado de desaceleración o saturación. En respuesta

- El coeficiente DIFUSSION se multiplica por un valor menor a 1.0

- El coeficiente SPREAD se multiplica por un valor menor a 1.0

- El coeficiente BREED se multiplica por un valor menor a 1.0

Esto reduce la capacidad del modelo de expandir el área urbana, simulando la forma en que las ciudades desaceleran su crecimiento en contextos de saturación, falta de recursos, o restricciones físicas.

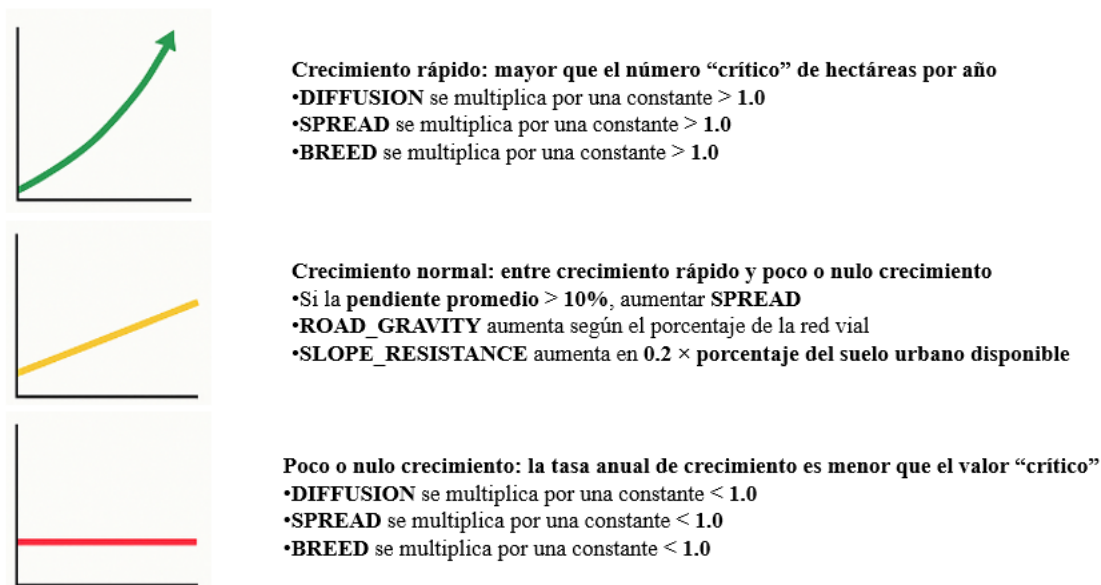


Figura 3. Reglas de automodificación del SLEUTH.(Clarke et al., 1997).

MARCO CONCEPTUAL

Los autómatas celulares son modelos matemáticos discretos utilizados para simular sistemas complejos y dinámicos. Estos modelos consisten en una cuadrícula de celdas, cada una de las cuales puede adoptar uno de varios estados posibles. En cada iteración temporal, las celdas cambian de estado en función de las reglas de transición locales aplicadas a las celdas vecinas. Estas reglas pueden ser determinísticas o estocásticas, y su nivel de complejidad varía según el fenómeno que se modela (Aburas et al., 2016; Kari, 2005). En el contexto del crecimiento urbano, los autómatas celulares han demostrado ser una herramienta efectiva para modelar patrones espaciales de expansión de las ciudades.

El crecimiento urbano es un fenómeno asociado a la expansión física de las ciudades debido a factores como el aumento de la población, el desarrollo económico y las decisiones de planificación territorial. Este proceso conlleva oportunidades económicas, pero también genera desafíos administrativos y ambientales (Preston, 1979). En el caso de Santiago de Cali, el crecimiento urbano ha estado marcado por la ocupación informal del suelo y la expansión de la periferia, lo que hace necesario contar con herramientas precisas para su análisis y proyección.

La planificación urbana es una disciplina clave en la distribución y gestión del suelo dentro de las ciudades. Su propósito es garantizar un desarrollo equilibrado, optimizando el uso de los recursos disponibles y minimizando los impactos negativos en el entorno. Entre sus objetivos se encuentran la conservación de recursos naturales y culturales, la reducción del consumo excesivo de suelo y la mitigación de efectos ambientales adversos (Chengzhi et al., 2023).

Los modelos de simulación de uso del suelo desempeñan un papel esencial en la planificación urbana al permitir la predicción de cambios en la estructura espacial de las ciudades. Uno de los modelos más utilizados es SLEUTH, basado en autómatas celulares, que permite prever la expansión urbana mediante la integración de seis capas de entrada: pendiente (Slope), uso

del suelo (Land Use), exclusión (Exclusion), expansión urbana (Urban Extent), transporte (Transportation) y sombreado del relieve (Hillshade) (Linares & Clarke, 2018).

El proceso de calibración de SLEUTH es esencial para ajustar el modelo a las condiciones específicas de una ciudad. Se desarrolla en tres fases: calibración gruesa, calibración fina y calibración final (Clarke & Johnson, 2020).

MARCO REFERENCIAL

El modelo SLEUTH ha sido objeto de múltiples estudios sobre expansión urbana en diferentes lugares del mundo, convirtiéndose en una herramienta fundamental para examinar y predecir patrones de crecimiento urbano en distintos entornos geográficos, al considerar variables como uso del suelo, redes de transporte, pendiente y restricciones de expansión.

(Zhang et al. 2023) destacan que en la planificación urbana actual es cada vez más común considerar la proyección del crecimiento futuro, con base en factores geográficos y datos históricos. En este sentido, los modelos de crecimiento urbano juegan un papel crucial al proporcionar estimaciones precisas que facilitan la toma de decisiones para la planificación a largo plazo, siempre que se garantice una adecuada calidad de los datos de entrada.

(Márquez Lobato, 2008) empleó una clasificación supervisada de imágenes satelitales para generar mapas de cobertura del suelo, los resultados indicaron que el crecimiento urbano futuro tiende a concentrarse hacia el suroeste de la ciudad, en zonas ya parcialmente urbanizadas.

En el caso de Campinas, Brasil (Marques et al., 2021), se utilizaron fuentes de datos públicas para alimentar las capas del modelo, incluyendo información catastral y datos de infraestructura vial. Además, extrajo su Modelo Digital de Elevación (MDE) desde la plataforma de la USGS, específicamente el SRTM, el proceso de simulación permitió el uso del modelo como una herramienta auxiliar para la formulación de políticas urbanas locales.

(Wu y Webster, 2001) aplicaron el modelo en la Bahía de San Francisco para simular la expansión urbana, demostrando su capacidad de anticipación de tendencias. De manera similar, (Clarke y Gaydos 1998) desarrollaron una proyección a largo plazo del desarrollo urbano en San Francisco y Washington/Baltimore, integrando sistemas de información geográfica (SIG) con autómatas celulares, y alimentando el modelo con datos históricos multitemporales, un enfoque replicado en el presente proyecto.

Feng et al. (2023) usaron SLEUTH en Jinan, China, para analizar el impacto de las políticas de uso del suelo en la expansión urbana, mientras que Mallouk, en Casablanca, Marruecos, integró el modelo en un entorno SIG mediante ArcGIS para proyectar el crecimiento hasta 2040, utilizando procesos de calibración detallados similares a los aplicados aquí.

Otro aspecto fundamental es la validación. En los estudios realizados en Praia (Cabo Verde) (Goncalves et al., 2019) y Mangaluru (India) (K et al., 2022), se utilizó la métrica Lee-Sallee para evaluar el ajuste espacial entre las simulaciones y los mapas reales de urbanización. En Praia se complementó además con el cálculo del coeficiente Kappa, hallando una fuerte coincidencia entre los escenarios simulados y el desarrollo real de la ciudad, concluyendo que la expansión futura se concentra principalmente en zonas adyacentes a las vías principales y con baja pendiente, además el crecimiento tenderá a formar nuevos núcleos urbanos cerca de las vías existentes.

(Gangnani, 2017) aplicó el modelo en la ciudad de Udaipur (India), destacando la importancia de adaptar los parámetros del modelo a las condiciones locales.

CAPÍTULO VI. METODOLOGÍA

Contextualización del área de estudio

La ciudad Santiago de Cali, capital del departamento del Valle del Cauca, se localiza en el suroccidente de Colombia, entre las coordenadas geográficas aproximadas 3°27'00" N y 76°32'00" O. Tiene una extensión territorial de 560,3 km², distribuida en 120,9 km² de área urbana (comunas), 437,3 km² de zona rural (corregimientos) y 2,2 km² de áreas protegidas asociadas al río Cauca.

Santiago de Cali se encuentra dentro del valle geográfico del río Cauca, una depresión interandina con un ancho promedio de 35 km a la altura de la ciudad. La ciudad se extiende predominantemente sobre el margen occidental del río y presenta un relieve que varía desde planicies aluviales hasta zonas montañosas. La altitud promedio del casco urbano es de 995 metros sobre el nivel del mar, mientras que, al occidente, en los Farallones de Cali parte de la Cordillera Occidental de los Andes se alcanzan alturas superiores a los 4.000 m s. n. m.

Desde el punto de vista climático, la ciudad presenta un clima de tipo tropical monzónico (Am) según la clasificación de Köppen. Registra una temperatura media anual de 24–25 °C y una precipitación promedio que varía entre 900 y 1.800 mm/año, con dos temporadas lluviosas marcadas: de marzo a mayo y de septiembre a noviembre (IDEAM, 2020).

Cali limita al norte con los municipios de Yumbo y La Cumbre, al nororiente con Palmira, al oriente con Candelaria y Puerto Tejada (Cauca), al sur con Jamundí, al suroccidente con el área rural de Buenaventura y al noroccidente con Dagua.

En cuanto a infraestructura, la ciudad cuenta con una red vial de aproximadamente 960 km, incluyendo arterias primarias, secundarias y terciarias. Asimismo, dispone de 243 km de corredores operativos del sistema de transporte masivo tipo BRT (Masivo Integrado de Occidente – MIO), que conectan la mayoría de las comunas y principales centralidades del área urbana.

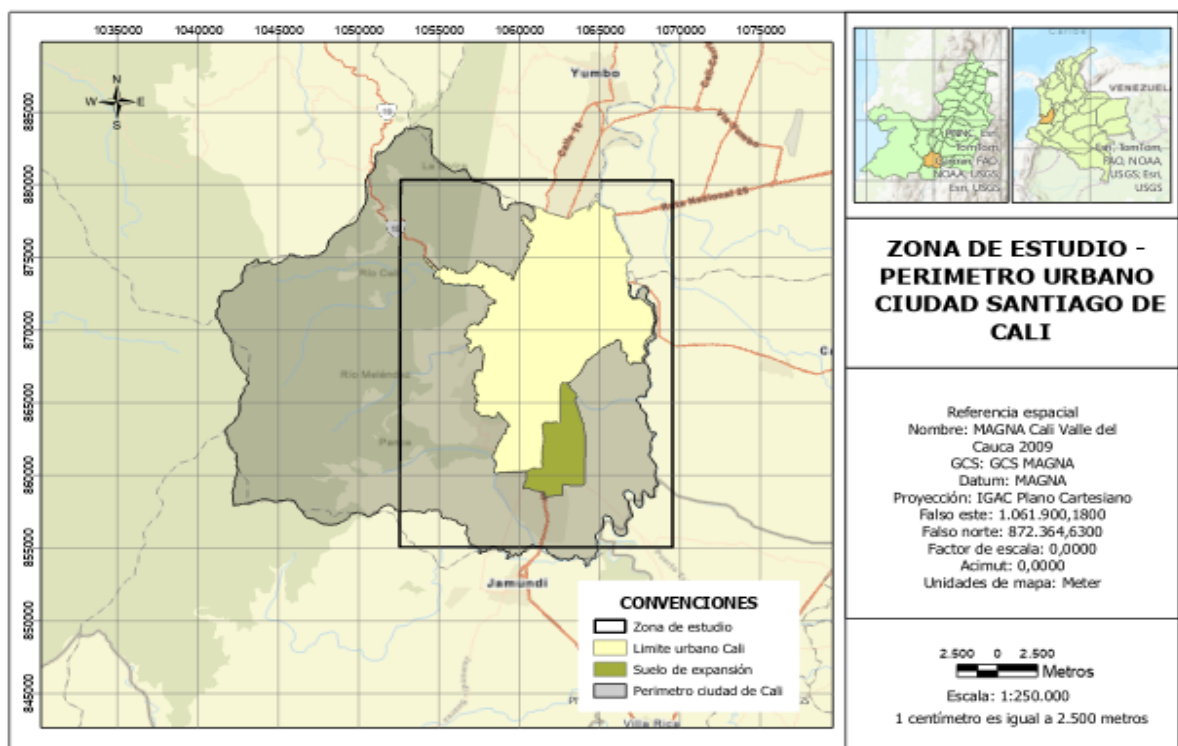


Figura 4. Zona de estudio.

El modelo SLEUTH requiere inicialmente de un conjunto de capas rasterizadas que representen las condiciones físicas y espaciales del territorio para poder simular la expansión urbana. En esta investigación, el modelo fue implementado con base en datos geoespaciales preparados específicamente para la ciudad de Cali, Colombia.

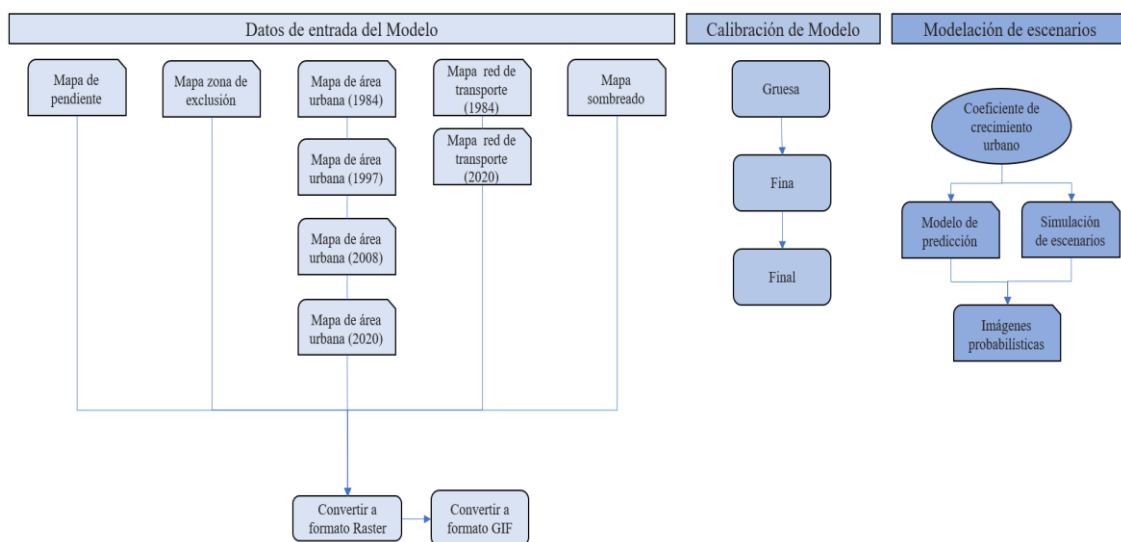


Figura 5. Diagrama de metodología basado en (CAMPINAS BRASIL).

Datos de entrada:

A continuación, se describen las capas de entrada utilizadas en el modelo y sus respectivas fuentes y formatos:

Tabla 2. Datos de entrada para Santiago de Cali.

CAPA	PREPARACIÓN/FUENTE	FORMATO/AÑO
Extensión urbana	Clasificación supervisada a partir de imágenes satelitales multiespectrales Landsat 5 TM, 8 OLI.	Raster 1984 - 1997 - 2008 - 2020 Rasterizado
Áreas excluidas	Cuerpos de agua según la página de la IDESC.	Rasterizado (vectorial a raster) 2014
Red vial	Por medio de digitalización empleando imágenes Landsat y capas de la IDESC.	Rasterizado (vectorial a raster) 1984 - 2020
Pendiente	Modelo digital de elevación (DEM) de la USGS	Raster
Sombreado	Modelo digital de elevación (DEM) de la USGS	Raster

Usualmente dentro de los datos de entrada se obtiene el los descritos anteriormente en la tabla 2, adicional a estos está el uso de suelo en dos fechas diferentes, aunque estos datos de entrada no son obligatorios para la ejecución del modelo ya que sin estos datos el modelo puede ejecutarse y realizar su procesamiento normal, al igual que lo han realizado en muchos proyectos anteriores como (PRAIA), por lo tanto, se decidió excluirlas.

Para llevar a cabo el análisis de la expansión urbana de Cali, se realizó por medio de clasificación supervisada en Google Earth Engine (GEE) por medio de codificación , para esto inicialmente se implementó la capa de zona de estudio donde se delimitó por un shp. Teniendo esta capa fue la que se empleó inicialmente como el área para la búsqueda de imagen.

En esta búsqueda para los años 1984, 1997 y 2008 se obtuvieron por imágenes Landsat 5 las cuales están suministradas desde el año 1984 hasta el año 2013, para el año más actual que fue el año 2020 se usaron del satélite Landsat 8. La selección de Landsat se debe a su alta resolución temporal (con imágenes disponibles desde 1972) y espacial (30 metros), lo que lo convierte en una herramienta adecuada para el seguimiento de cambios en el uso del suelo (Hua et al., 2014) estas imágenes se filtraron por medio de un porcentaje del 10% de nubosidad.

Una vez generadas las imágenes satelitales procesadas en Google Earth Engine, se procedió a la creación de las muestras de entrenamiento para la clasificación supervisada del uso del suelo. Estas muestras se definieron en función de cinco categorías principales, basadas en la metodología de clasificación Corine Land Cover (CLC), ampliamente utilizada para estudios de ocupación del suelo en Europa y adaptada a diversas regiones del mundo por su precisión conceptual.

Se establecieron cuatro clases de referencia esenciales, la clase 1 se asignó a zonas urbanas, representando áreas artificializadas y ocupadas por infraestructura construida, como viviendas, edificaciones comerciales e industriales, redes de transporte y espacios recreativos. La clase 2 correspondió a cuerpos de agua y humedales, incluyendo ríos, quebradas y zonas con alta saturación de humedad, como ciénagas y humedales

permanentes. Estas clases se alinean con las categorías 4 y 5 del sistema CLC, referidas a zonas húmedas y cuerpos de agua respectivamente.

Por otro lado, la clase 3 fue destinada a áreas agrícolas, especialmente cultivos, pastizales y otras coberturas vegetales asociadas a actividades agropecuarias. Con el objetivo de mejorar la precisión de la clasificación, se creó un subconjunto adicional dentro de esta clase para capturar diferencias tonales en las coberturas agrícolas, producto de variaciones en el tipo de cultivo o en el estado fenológico de la vegetación. Ambas muestras fueron codificadas con el mismo valor, pero permitieron refinar el aprendizaje del clasificador.

De forma similar, la clase 4 se asignó a zonas boscosas y espacios seminaturales, incluyendo vegetación densa, matorrales y praderas naturales. Al igual que en el caso agrícola, se identificó una submuestra adicional con distinta tonalidad, relacionada con la densidad y tipo de cobertura forestal, que fue incluida bajo la misma categoría para preservar la consistencia del análisis.

El método de clasificación empleado fue la interpretación visual asistida, un enfoque recomendado para identificar y asignar correctamente las clases de uso del suelo a partir de imágenes satelitales de mediana y alta resolución (Hua et al., 2014). Este método se basa en la inspección visual de las imágenes, apoyada por el conocimiento del área de estudio y referencias cartográficas adicionales, lo que permitió garantizar una segmentación más realista y precisa de las coberturas terrestres.

Se creó una nueva capa con el perímetro urbano de lo que hoy se conoce como zona urbana según las imágenes satelitales de Google, ya definida la capa se agregó al código, con el fin de validar que al realizar la clasificación lo que identificara como zona urbana fuera de dicho perímetro no lo tomará según la combinación de bandas que empleamos para que la zona urbana o suelo urbano destaca y se diferenciara de otros usos.

Además de esta capa también se empleó la capa de exclusión dada por la CVC, la que representa los cuerpos de agua usándolo como referencia para que el código pudiera ser más exacto a la hora de realizar el proceso y más en cuestión de lo que identificara como cuerpos de agua, siendo clase 2.

Ya teniendo esto, el código generó la clasificación supervisada para cada año determinado, ya teniendo la clasificación se visualizaron en el aplicativos ArcGIS con el objetivo de apreciar más el crecimiento, como se puede ver dentro de las ciudades hay zonas que no están urbanizado en su totalidad y esto se debe a su uso, como lo es la base aérea, la base militar y la universidad del Valle, por lo tanto el código no pudo definirlos como tal, entonces se creó una capa para estas, con el objetivo de extraer de los ráster por medio de vectorización la parte urbana, se realizó la unión de la urbanización del primer año (1984) con la de los lugares ya descritos anteriormente.

Después de haber obtenido esta capa de urbanización, se fue realizando la unión con cada año posterior con el objetivo de que los píxeles siempre quedarán sobrepuesto de lo que es la urbanización ya que el código no lo realizó de forma muy precisa, teniendo en cuenta la validación de las imágenes obtenidas para cada año.

Para los datos de redes de carreteras existentes, fueron obtenidas por medio de la conexión WFS con la IDESC a partir de las bases de datos de las entidades públicas locales de la

ciudad que estaban registradas en el POT del año 2014 teniendo en cuenta las vías principales, secundaria y interregional al igual que para el año 2021, considerando las nuevas vías de conectividad que llegaron con la expansión hasta ahora, haciendo una comparación sincrónica con las imágenes obtenidas anteriormente. La infraestructura vial es un factor fundamental en el crecimiento urbano, ya que las vías de transporte influyen directamente en la expansión de áreas urbanas, según diversos estudios (Al-Shalabi et al., 2013). Estos datos permitieron analizar cómo la proximidad de las carreteras ha influido en el patrón de expansión urbana de Cali a lo largo del tiempo.

La capa de exclusión se obtuvo del geovisor de la IDESC conectadas por medio de WFS en el aplicativo QGIS, tales como zonas protegidas, cultivos protegidos y zonas de alto riesgo que son áreas cercanas a humedales, cuerpos de agua o zonas propensas a inundaciones, lo que ayuda a asegurar que el modelo tenga en cuenta las restricciones ambientales y de uso del suelo que no deben ser urbanizadas (Al-shalabi et al., 2013).

Para el ráster de pendiente y de sombreado del terreno, factores clave para la simulación de la expansión urbana, debido a que influyen en la viabilidad de las áreas para su desarrollo urbano. Se utilizó un modelo digital de elevación (DEM), con el fin de calcular la pendiente en cada punto de la ciudad. Este modelo se realizó por medio de su proceso de pendiente y sombreado en el software QGIS.

Una vez obtenidos los datos geoespaciales, todas las variables (extensión urbana, uso del suelo, pendiente, sombreado, redes viales, áreas de exclusión) fueron convertidas a formato ráster con un tamaño de píxel de 30 metros (Hua et al., 2014), que es la resolución estándar utilizada en el modelo SLEUTH para asegurar la consistencia en los análisis espaciales (Hua et al., 2014) al igual que para el ajuste del modelo en cada uno de sus procesos de calibración.

La capa de extensión urbana al ser rasterizada se reclasificó, dándole valor de 0 a 100, donde 0 representa el área no urbanizada y 100 el área urbana de igual forma para convertir en ráster las capas red vial en un único ráster, pero para este caso específico se implementó un procedimiento en dos fases utilizando ArcGIS Pro.

Inicialmente, se aplicó un proceso de reclasificación sobre el ráster correspondiente al área delimitada. Este ráster, en su estado original, contenía un único valor categórico, lo que dificulta su correcta integración con el ráster de la red vial. Se asignó el valor presente en la capa de área, transformándolo en 0, de modo que representará correctamente el entorno sin interferir en la categorización de la red vial.

Tras la reclasificación, se procedió a la unificación de ambas capas ráster, para el año 1984 y 2020 se realizó el mismo proceso, usando el mismo ráster reclasificado del área de estudio.

Este procedimiento permitió generar un ráster único en el que se mantiene la clasificación original de la red vial (con valores 1 - interregional, 2 - principal y 3 - secundarias, representando las diferentes jerarquías de las vías) y se integró el área delimitada con el valor 0, representando el entorno sin interferencias en la categorización vial.

Los resultados de las simulaciones y las capas de información procesadas fueron convertidos a formato GIF para ser utilizados en la visualización del crecimiento urbano proyectado. Este formato es útil para la creación de animaciones que permitan representar de manera dinámica y visual el crecimiento urbano de la ciudad a lo largo del tiempo. Además, este formato es

compatible con diversas plataformas y facilita la presentación de resultados en informes y presentaciones, así como la integración con otros sistemas de análisis espacial.

Las imágenes obtenidas se grabaron en formato GIF con el fin de emplearlas en la ejecución del modelo, en los casos que se reclasificó dependiendo de la importancia como en el caso de uso de suelo y la clasificación de la cobertura del uso del suelo.

Las figuras 6 a 9 presentan los mapas de entrada de urbanización correspondientes a los años 1984, 1997, 2008 y 2020, los cuales fueron utilizados como insumos fundamentales para la calibración y simulación del modelo de crecimiento urbano. Estos mapas permiten visualizar la expansión espacial del área urbanizada a lo largo del tiempo, evidenciando patrones de desarrollo y consolidación de la mancha urbana. La codificación binaria utilizada en los mapas distingue claramente entre las zonas urbanizadas y no urbanizadas, lo que facilita el análisis espacial y temporal de los cambios en la cobertura del suelo. La comparación secuencial entre las imágenes permite identificar las principales direcciones de crecimiento, la densificación del área urbana existente y la aparición de nuevos núcleos urbanos periféricos, información clave para la validación del modelo y la formulación de escenarios futuros.



Figura 6. Gif de entrada de urbanización 1984

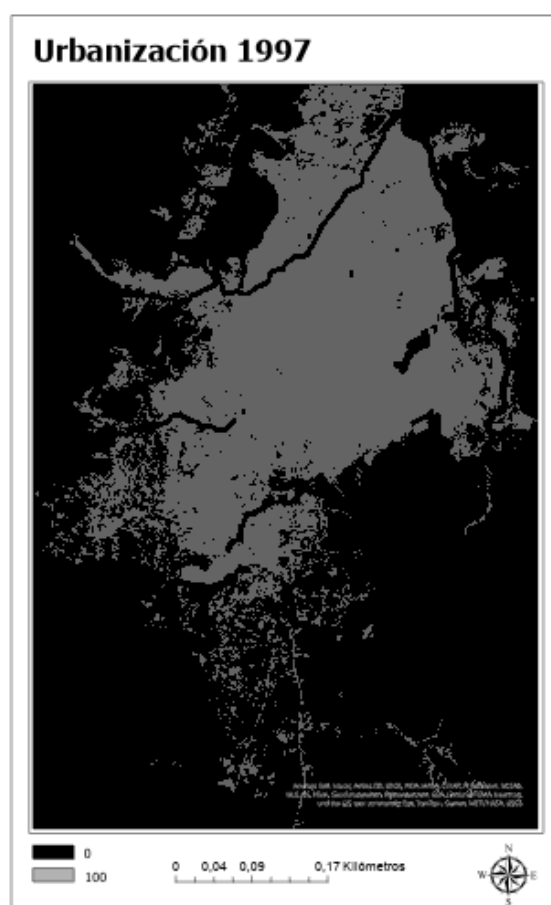


Figura 7. Gif de entrada de urbanización 1997

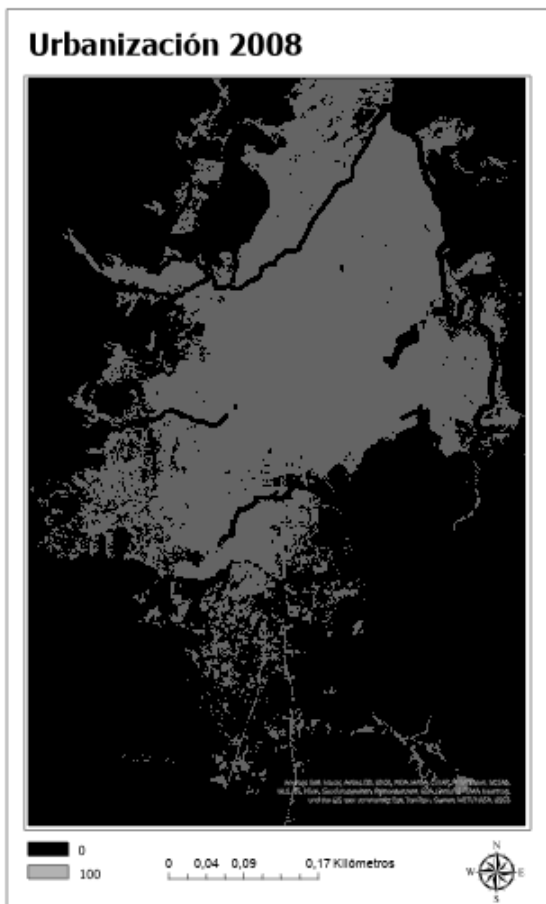


Figura 8. Gif de entrada de urbanización 2008

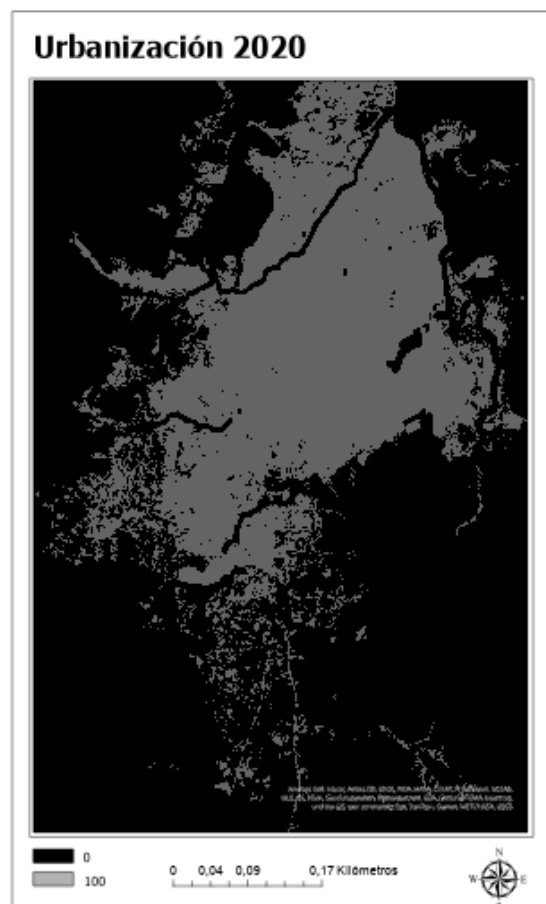


Figura 9. Gif de entrada de urbanización 2020

Las figuras 10 a 14 ilustran el conjunto de capas temáticas adicionales que alimentan el proceso de calibración del modelo. Las figuras 10 y 11 muestran la red vial para 1984 y 2020, respectivamente, evidenciando la densificación y extensión del sistema de transporte, actúa como eje de atracción para la expansión. La figura 12 corresponde a la capa de exclusión, en la que se delimitan áreas restringidas al desarrollo (cuerpos de agua, zonas protegidas y suelos con riesgo), estableciendo límites espaciales estrictos para la simulación. La figura 13 presenta el mapa de pendiente derivado del MDE, empleado para evitar la urbanización en terrenos con alta inclinación, mientras que la figura 14 muestra el sombreado (hillshade) del relieve, utilizado como referencia visual para verificar la correspondencia espacial entre las capas y el terreno real. En conjunto, estos insumos complementan la información de urbanización histórica, proporcionando las restricciones y factores de atracción necesarios para representar de forma realista la dinámica de expansión urbana en el modelo.

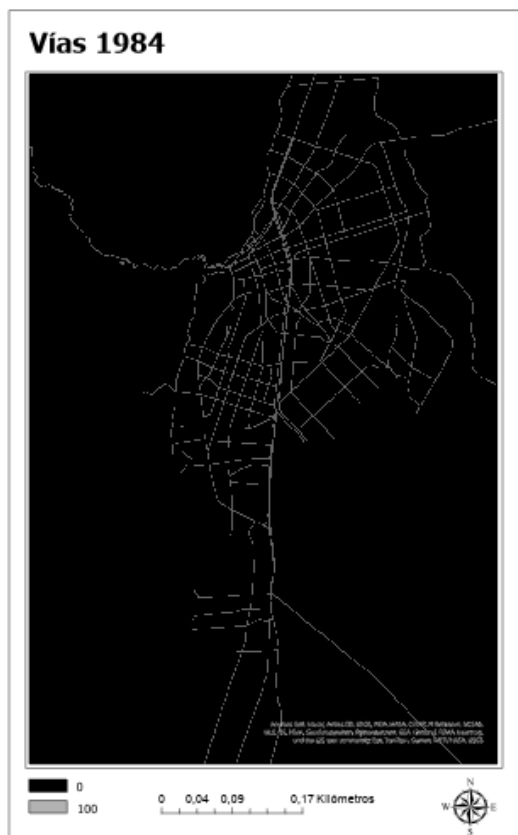


Figura 10. Gif de entrada de vías 1984

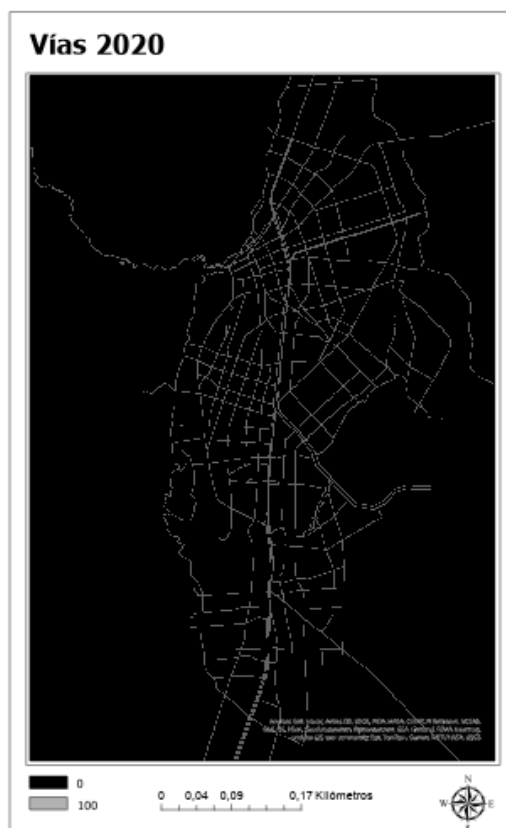


Figura 11. Gif de entrada de vías 2020



Figura 12. Gif de exclusión

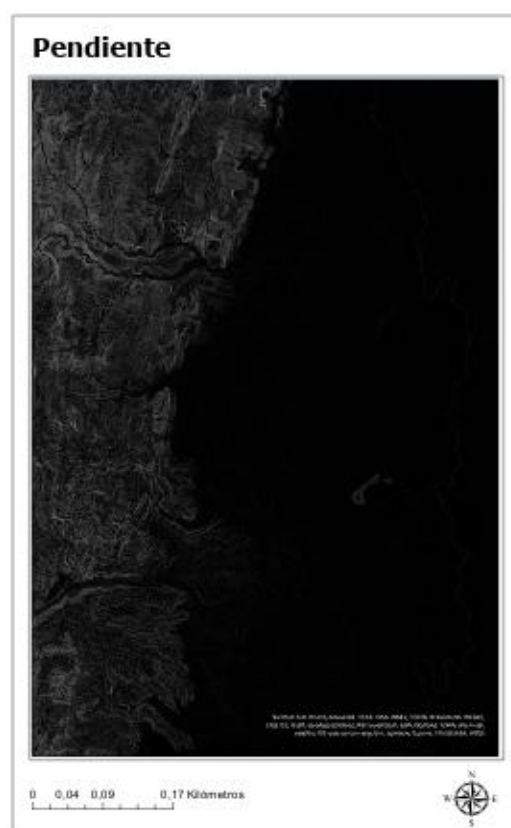


Figura 13. Gif de pendiente

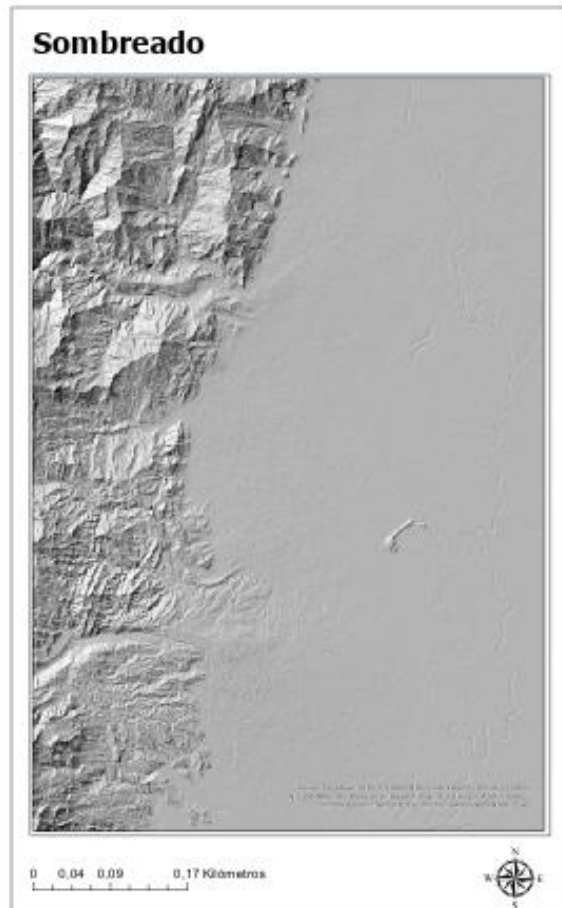


Figura 14. Gif de sombreado

Debido que los patrones de crecimiento de la ciudad son heterogéneos en las zonas norte y sur, fue necesario recortar las imágenes. El recorte se realizó considerando aproximadamente de la mitad de la imagen en el sentido norte sur. Para realizar el recorte las imágenes se transformaron al formato TIFF garantizando que los píxeles quedaran alineados y del mismo tamaño. Se utilizó la capa de pendiente para realizar el remuestreo. Posteriormente se recortaron con una máscara y finalmente se exportaron al formato GIF nuevamente.

Las imágenes originales eran de 565 columnas por 835 filas y al recortarlas el lado norte quedó con 568 columnas por 399 filas y el lado sur con 562 columnas por 493 filas. En la figura 15 se presenta el ejemplo del recorte de la zona norte de la imagen de pendiente y en la figura 16 la zona sur.



Figura 15. Tamaño representativo de corte - zona Norte



Figura 16. Tamaño representativo de corte - zona Sur

La calibración del modelo SLEUTH representa una etapa fundamental para garantizar la fidelidad de las simulaciones del crecimiento urbano (Márquez Lobato, 2008). Este proceso se encarga de encontrar la mejor combinación de los valores para los 5 coeficientes de crecimiento urbano, con el fin que las simulaciones del modelo representen con la mayor precisión posible el comportamiento histórico observado, permitiendo generar predicciones confiables (Clarke & Silva, 2001), el proceso de calibración se detalla en la página oficial del código <https://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig/index.html>.

El procedimiento se centra en la comparación de las salidas simuladas por SLEUTH y los datos reales insertados por las capas de entrada, se toma como año semilla el primer año disponible (1984) en este caso y como años de control aquellos que se insertaron en las capas de urbanizado (1984, 1997, 2008 y 2020). Los ciclos de crecimiento corresponden a los años de evolución del sistema, se genera una imagen de simulación para cada año de control, a partir de esta se calculan las 13 métricas (Product, compare, pop, edges, clusters, cluster size, lee_salle, slope, %urban, x-mean, y-mean, rad y f-match) comprendidas en CONTROL_STATS.LOG y descritas a continuación.(NCGIA, 2025;Bajracharya, 2016).

Tabla 3. Estadísticas de calibración SLEUTH.

MÉTRICA	DESCRIPCIÓN
Product	Multiplicación de todas las variables
Compare	Población modelada para el año final/población real para el año final
Pop	Puntaje de regresión por mínimos cuadrados para la urbanización modelada en comparación con la urbanización real en los años de control.
Edges	Puntaje de regresión por mínimos cuadrados para la cantidad de bordes urbanos modelada en comparación con la cantidad real en los años de control.
Clusters	Puntaje de regresión por mínimos cuadrados para la agrupación urbana modelada en comparación con la agrupación urbana observada en los años de control.
Cluster size	Puntaje de regresión por mínimos cuadrados para el tamaño promedio de los conglomerados urbanos modelado en comparación con el tamaño promedio observado en los años de control.
Lee-salle	Un índice de forma, una medida de ajuste espacial entre el crecimiento modelado y la extensión urbana observada en los años de control.
Slope	Regresión por mínimos cuadrados de la pendiente promedio de las celdas urbanizadas modeladas en comparación con la pendiente promedio de las celdas urbanas observadas en los años de control.
%urban	Regresión por mínimos cuadrados del porcentaje de píxeles disponibles urbanizados en comparación con los píxeles urbanizados observados en los años de control.
X-mean	Regresión por mínimos cuadrados de los valores promedio de x para las celdas urbanizadas modeladas en comparación con los valores promedio de x de las celdas urbanas observadas en los años de control.

Y-mean	Regresión por mínimos cuadrados de los valores promedio de y para las celdas urbanizadas modeladas en comparación con los valores promedio de y de las celdas urbanas observadas en los años de control.
Rad	Regresión por mínimos cuadrados del radio estándar de la distribución urbana, es decir, la desviación estándar normalizada en x, y.
F-match	Una proporción de ajuste entre las clases de uso del suelo.

Debido a que cada uno de los 5 coeficientes puede tener valores entre 0 y 100, las combinaciones posibles son muy amplias, esto demanda una gran capacidad de cómputo, con el fin de solucionar esta problemática SLEUTH utiliza un método de fuerza bruta para calibrarse (Clarke & Silva, 2001), restringiendo los rangos posibles de cada uno de los coeficientes.

El índice para filtrar la mejor combinación de coeficientes es decisión libre del usuario, sin embargo, en diferentes investigaciones consultadas del modelo SLEUTH se coincide en la métrica LEE-SALLE como una métrica confiable a la hora de filtrar los coeficientes (Dietzel & Clarke, 2007; Bajracharya, 2016). Esta métrica se define como el cociente entre la intersección y la unión de las áreas urbanas simuladas y reales, tal como se expresa en la ecuación (1) (Dietzel & Clarke, 2007).

$$LeeSalle = \frac{(A \cap B)}{(A \cup B)} \quad (1)$$

donde A representa la superficie urbana simulada y B la superficie urbana observada en los años de control (Dietzel & Clarke, 2007). Este índice cuantifica el grado de coincidencia espacial entre la expansión urbana predicha por el modelo y la expansión urbana real observada, y es análogo en su interpretación al coeficiente de determinación R^2 , con un rango que va de 0 a 1, donde 1 es el valor que representa el ajuste perfecto. (Clarke, K. C. et al, 1996; Bajracharya, 2016).

Entorno y formatos

El modelo SLEUTH se desarrolla en lenguaje C y requiere un entorno linux para su ejecución (NCGIA, 2025; Clarke et al., 1997). En este caso se utilizó el subsistema de Windows para linux (WSL) como plataforma de ejecución y la aplicación VISUAL STUDIO CODE como editor de texto para ajustar los valores manualmente en las fases de calibración y predicción. Los datos de entrada deben cumplir con formatos específicos (NCGIA, 2025).

Tabla 4. Especificaciones técnicas de formato para las capas de entrada.

REQUISITOS	ESPECIFICACIONES
Resolución espacial	30 metros
Formato de imagen	Gif de 8 bits en escala de grises
Proyección cartográfica	MAGNA Colombia Oeste (EPSG:3115)
Tamaño de imagen – Zona Norte	568 columnas x 399 filas
Tamaño de imagen – Zona Sur	562 columnas x 493 filas

Método Monte-carlo

El método Monte Carlo es utilizado por SLEUTH para enfrentar la naturaleza estocástica del crecimiento urbano simulado. Debido a la aleatoriedad presente en cada ciclo de crecimiento, el modelo genera múltiples simulaciones para cada combinación de coeficientes. Durante cada iteración Monte Carlo, las estadísticas de crecimiento urbano se almacenan en memoria. Al completar el número definido de simulaciones, estos valores se promedian y se comparan con los datos históricos mediante métricas de correlación y ajuste.(Márquez Lobato, 2008)

Fases de calibración

El proceso de calibración del modelo SLEUTH se estructura en 3 fases secuenciales, calibración gruesa, calibración fina y calibración final. Cada fase reduce progresivamente el rango de búsqueda de los coeficientes, esta calibración se obtiene definiendo 4 parámetros clave , START (valor mínimo), STOP (valor máximo), STEP (pasos o incrementos) y el número de iteraciones montecarlo por combinación de parámetros.(NCGIA, 2025; Marques et al., 2021)

Calibración gruesa

Se utiliza el rango completo de parámetros con incrementos grandes. (START 0 - STEP 25 - STOP 100, MONTECARLO 5) lo que obtiene como resultado 3125 escenarios. El archivo generado en CONTROL_STATS contiene los resultados de las 13 métricas evaluadas por el modelo según la combinación de coeficientes, para filtrar los coeficientes que se utilizarán en la siguiente fase de calibración se utiliza la métrica LEE-SALLE, se organiza la tabla en excel de mayor a menor según esta métrica y se filtra utilizando los 10 mejores valores .(NCGIA, 2025; Marques et al., 2021).

Calibración fina

Se utiliza el rango de parámetros reducidos a partir de la calibración anterior, con 8 iteraciones monte carlo. Los rangos fueron reducidos de modo que el valor de STEP los divida en al menos 5 partes, como en la fase gruesa se organiza los resultados de mayor a menor según la métrica LEE-SALLE y se utilizan los mejores 10 valores para elegir los rangos de la siguiente fase de calibración. (NCGIA, 2025; Marques et al., 2021).

Calibración final

Se utiliza el rango de parámetros reducidos a partir de la calibración anterior, con 10

iteraciones Monte Carlo. Los rangos fueron reducidos de modo que el valor de paso los divida en al menos 5 o 6 partes, para la zona norte se requirió correr una calibración adicional con el fin de ajustar con mayor precisión los coeficientes de SPREAD, SLOPE Y ROAD GRAVITY, siguiendo la misma lógica descrita anteriormente para dividir los valores de inicio, fin y paso.(NCGIA, 2025; Marques et al., 2021).

Modo pronóstico

Durante el proceso de calibración, el modelo SLEUTH estima los valores de los coeficientes de control que mejor reproducen el patrón de crecimiento urbano observado en el pasado. Estos valores representan el comportamiento de crecimiento urbano al final del período histórico.

Sin embargo, debido a la capacidad de auto modificación del modelo, los coeficientes pueden evolucionar dinámicamente a lo largo de la simulación. Por esta razón, los valores relevantes para la inicialización de una predicción futura no son los coeficientes iniciales, sino los que el modelo alcanza al final del periodo calibrado (es decir, en la fecha de finalización).

Para generar una predicción confiable, se debe utilizar el conjunto de coeficientes finales obtenidos al ejecutar el modelo con los mejores parámetros calibrados en el período histórico. Esta ejecución permite capturar cómo los coeficientes evolucionan internamente y cuáles valores se consolidan como representativos del comportamiento urbano reciente.

Debido a la naturaleza estocástica del modelo, es recomendable promediar los coeficientes finales obtenidos a partir de múltiples ejecuciones. Este promedio reduce el efecto del azar y proporciona un conjunto de coeficientes de pronóstico más robusto y representativo, que será utilizado como base para proyectar el crecimiento urbano futuro.(NCGIA, 2025)

En esta fase se utilizan los valores de los coeficientes mejor calibrados en la fase final, con un valor STEP 1 y 100 iteraciones Monte Carlo, se ejecuta el modelo en modo calibración y se activa la salida del archivo AVG para a partir de este elegir los coeficientes que se utilizarán en la predicción.

Datos de calibración

Tabla 5. Datos de calibración zona Norte de la ciudad.

	GRUESA	FINA	FINAL	PRONÓSTICO
CALIBRACIÓN NORTE	ITERACIONES MONTECARLO: 5	ITERACIONES MONTECARLO: 8	ITERACIONES MONTECARLO: 10	ITERACIONES MONTECARLO: 100
	ESCENARIOS:3125	ESCENARIOS: 6480	ESCENARIOS: 4500	
	LEE SALLE:0.8	LEE SALLE:0.8	LEE SALLE:0.8	
	RANGO - PASO	RANGO - PASO	RANGO - PASO	
				RANGO - PASO
DIFUSIÓN	(0,100) - 25	(0,10) - 2	(0,5) - 1	(1,1) - 1
PROPAGACIÓN	(0,100) - 25	(75,100) - 5	(80,95) - 3	(95,95) - 1

EXPANSIÓN	(0,100) - 25	(50,75) - 5	(40,60) - 5	(48,48) - 1
PENDIENTE	(0,100) - 25	(75,100) - 5	(90,100) - 2	(95,95) - 1
ATRACCIÓN VIAL	(0,100) - 25	(50,100) - 10	(60,100) - 10	(70,70) - 1

Tabla 6. Datos de calibración zona Sur de la ciudad.

CALIBRACIÓN SUR	GRUESA	FINA	FINAL	PRONÓSTICO
	ITERACIONES MONTECARLO: 5	ITERACIONES MONTECARLO: 8	ITERACIONES MONTECARLO: 10	ITERACIONES MONTECARLO: 100
	ESCENARIOS: 3125	ESCENARIOS: 4500	ESCENARIOS: 6480	
	LEE SALLE: 0.64	LEE SALLE: 0.64	LEE SALLE: 0.64	
	RANGO - PASO	RANGO - PASO	RANGO - PASO	RANGO - PASO
DIFUSIÓN	(0,100) - 25	(0,20) - 5	(0,5) - 1	(1,1) - 1
PROPAGACIÓN	(0,100) - 25	(0,25) - 5	(0,5) - 1	(1,1) - 1
EXPANSIÓN	(0,100) - 25	(20,30) - 2	(25,30) - 1	(27,27) - 1
PENDIENTE	(0,100) - 25	(40,60) - 5	(50,60) - 2	(54,54) - 1
ATRACCIÓN VIAL	(0,100) - 25	(0,100) - 20	(40,80) - 10	(40,40) - 1

Datos de predicción

Tabla 7. Datos de predicción para el Norte y Sur de la ciudad.

COEFICIENTES DE PREDICCIÓN	NORTE	SUR
LEE-SALLE	0.8	0.61
DIFUSIÓN	1	1
PROPAGACIÓN	1	1
EXPANSIÓN	1	38
PENDIENTE	100	1
ATRACCIÓN VIAL	62	48

La tabla 7 presenta los coeficientes de predicción utilizados en la simulación del crecimiento urbano, diferenciados para las zonas norte y sur del área de estudio. Estos coeficientes son el resultado final del proceso de calibración del modelo SLEUTH, y reflejan el valor óptimo asignado a cada parámetro para obtener la mejor correspondencia con el comportamiento urbano observado.

El coeficiente Lee-Sallee mide el grado de superposición entre la urbanización simulada y la

real; un valor más cercano a 1 indica una mejor coincidencia espacial. En este caso, se obtuvo un valor de 0,8 para el norte, lo que sugiere una alta precisión en esa zona, mientras que en el sur fue 0,61, indicando un ajuste menos preciso.

Los valores de los parámetros Difusión, Propagación, Expansión, Pendiente y Atracción vial varían entre las zonas:

En la zona norte, los coeficientes son moderados o bajos, salvo Slope (pendiente), que tiene un valor de 100, lo cual indica que la pendiente fue un factor decisivo para limitar la expansión urbana.

En la zona sur, se destaca el valor elevado de Spread (38), lo que sugiere que la expansión a partir de los núcleos existentes fue más significativa. En contraste, la pendiente no tuvo gran influencia (1), y el peso de la red vial (Road Gravity) fue menor que en el norte.

Estos valores reflejan diferencias notables en la dinámica urbana entre ambas zonas, lo que justifica el enfoque diferenciado aplicado en la calibración y simulación del modelo.

La validación del modelo se realizó utilizando una matriz de confusión, a partir de una capa de concordancia generada mediante análisis interpretativo. Para ello, se comparó la urbanización proyectada por el modelo para el año 2024 con una referencia real obtenida mediante fotointerpretación de imágenes satelitales de alta resolución disponibles en Google Earth correspondiente al mismo año, así como del mapa base del software ArcGIS Pro como guía. Se generaron 350 puntos de control como muestras de referencia para esta.

CAPÍTULO VII. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El proceso de calibración para la zona norte Tabla 5 y sur de Cali Tabla 6 obtuvo en cada fase de calibración un valor de LEE SALLE de 0.8 y 0.64, respectivamente, que se considera un buen resultado en comparación con estudios similares. Por ejemplo, en la ciudad de Praia, Cabo Verde se obtuvo un LEE SALLE de 0.58 (Goncalves et al., 2019), en Mangaluru, India se alcanzó un LEE SALLE de 0.51 (K et al., 2022) y en Kaduna, Nigeria el valor fue de 0.39 (Eyelade et al., 2022) .

Además, se validó mediante la métrica Lee Salle de acuerdo con el avg.log obtenido en la ejecución final del pronóstico Tabla 7, cuyo proceso se realiza como el último ajuste de los datos para la predicción. El valor de LEE SALLE obtenido fue de 0.8 para el norte de la ciudad, lo que indica una constancia en la coincidencia con respecto a la etapa de calibración. y de 0.61 para el sur, lo que constituye una leve reducción de la coincidencia; sin embargo, sigue siendo un valor confiable para generar la predicción, proporcionando una coincidencia aceptable entre las intersecciones espaciales simuladas y las reales (Bajracharya, 2016).

Durante el proceso de calibración del modelo SLEUTH para las zonas norte y sur de la ciudad, se evidenciaron diferencias sustanciales en el ajuste y desempeño del modelo, reflejo de las características particulares del crecimiento urbano en cada sector. En términos generales, el modelo presentó un ajuste significativamente mejor en la zona norte, que sugiere que esta área ha experimentado una expansión urbana más coherente, estructurada y predecible. Por el contrario, en la zona sur, el patrón de urbanización resultó más disperso e irregular,

dificultando la calibración precisa del modelo. Cabe destacar que el procedimiento de calibración fue técnicamente uniforme en ambas zonas, con igual número de iteraciones y fases metodológicas, por lo tanto, las diferencias observadas en los resultados no obedecen a variaciones en la metodología, sino a la naturaleza de los datos de entrada y al comportamiento urbano intrínseco de cada zona.

El comparativo de los coeficientes calibrados en la Tabla 6 revela diferencias significativas en los factores que guiaron el crecimiento urbano en las zonas norte y sur de Cali. Aunque los coeficientes de Diffusion y Breed se mantienen constantes en ambos sectores con valores mínimos (1), lo que sugiere un bajo nivel de crecimiento espontáneo y escasa aparición de nuevos núcleos urbanos durante el periodo de predicción, el comportamiento de los coeficientes Spread, Slope y Road Gravity es contrastante. En la zona sur, el valor elevado de Spread (38) frente al valor mínimo en el norte (1) indica que la expansión urbana se presentó principalmente por crecimiento orgánico desde los bordes ya urbanizados, reflejando una dinámica más difusa y posiblemente menos planificada. En cuanto al coeficiente Slope, que alcanza el valor máximo (100) en el norte y se reduce a sólo 1 en el sur, se evidencia una fuerte restricción topográfica en el norte, donde se evitó el crecimiento en pendientes, mientras que en el sur se permitió la expansión en terrenos inclinados, favoreciendo una ocupación del suelo con menor control. Por último, Road Gravity presenta una clara diferencia con un valor de 62 en el norte y 48 en el sur, se observa que en el norte el crecimiento urbano estuvo más estrechamente vinculado a la red vial existente, en tanto que en el sur la expansión tuvo una relación más débil con las vías, posiblemente obedeciendo a patrones de urbanización informal o menos estructurada. Estas diferencias reflejan un comportamiento más regulado, compacto y condicionado por la infraestructura en el norte, en contraste con un patrón más disperso, permisivo y espontáneo en el sur.

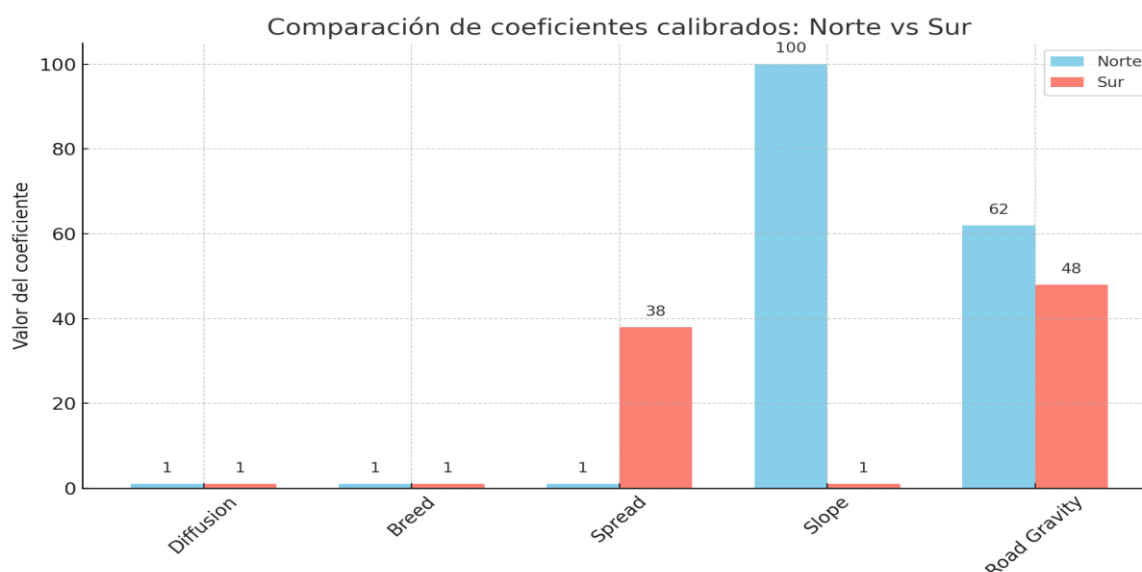


Figura 17. Representación gráfica de coeficientes de predicción zona Norte vs zona Sur de la ciudad.

Estos hallazgos permiten concluir que el modelo se desempeñó mejor en la zona norte, gracias a un patrón urbano más lineal, influenciado por las vías y con restricciones topográficas claras. Por el contrario, la zona sur presentó mayor complejidad espacial, con patrones irregulares, menor control topográfico y débil articulación con la red vial. En este contexto, la calibración precisa de los coeficientes Slope y Breed resultó determinante para capturar las dinámicas contrastantes entre ambas zonas y alcanzar una simulación realista del crecimiento urbano

futuro.

La predicción del proceso de crecimiento urbano para la ciudad de Santiago de Cali se extendió a un escenario de 29 años, tomando como referencia el año 2021 hasta el año 2050. Se crearon diferentes escenarios de forma anual diseñados por el modelo con el objetivo de observar el crecimiento en cada año. Se escogió el año 2024 como referencia para evaluar la precisión y validez del modelo, ya que para ese año se cuentan con imágenes satelitales que permiten realizar la interpretación mencionada anteriormente. Los resultados mostraron un coeficiente Kappa de 0.89 en el sector norte de la ciudad y de 0.78 en el sector sur. Estos valores indican un nivel de precisión aceptable en la fase de predicción, comparable con los resultados obtenidos en otros estudios similares, como los realizados en Praia, Cabo Verde (Goncalves et al., 2019), con un Kappa de 0.84 y en la ciudad de Adana, Turquía con un Kappa de 0.74, demostrando concordancia entre las áreas de crecimiento urbano previstas y las reales para dicho año (Berberoğlu et al., 2016) .

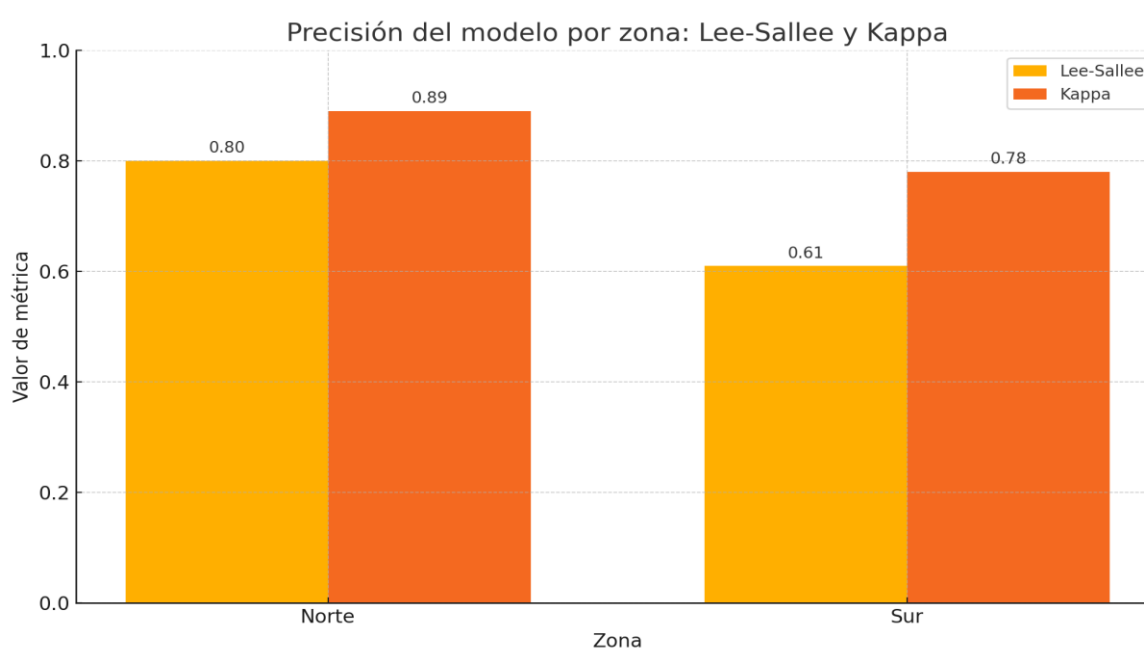


Figura 18. Representación gráfica del índice Lee Salle y Kappa para el Norte vs Sur de la ciudad.

La Figura 18 muestra una comparación de la precisión del modelo SLEUTH en las zonas norte y sur del área de estudio, utilizando como métricas los índices Lee-Sallee y Kappa. El índice Lee-Sallee evalúa la coincidencia espacial entre el área urbanizada simulada y la real, mientras que el índice Kappa mide el grado de acuerdo entre ambas considerando también el azar. En la zona norte, el modelo alcanzó un valor de 0,80 en Lee-Sallee y 0,89 en Kappa, lo que refleja una alta precisión tanto en la forma como en la distribución espacial de la urbanización simulada. Por el contrario, en la zona sur los valores fueron 0,61 para Lee-Sallee y 0,78 para Kappa, lo que indica un ajuste moderado con menor precisión en la representación espacial del crecimiento urbano. Esta diferencia en los resultados sugiere que el modelo logró una mejor calibración en el norte de la ciudad, posiblemente debido a patrones de urbanización más concentrados o una influencia más clara de los factores considerados en el modelo (como vías y pendientes).

Predicción

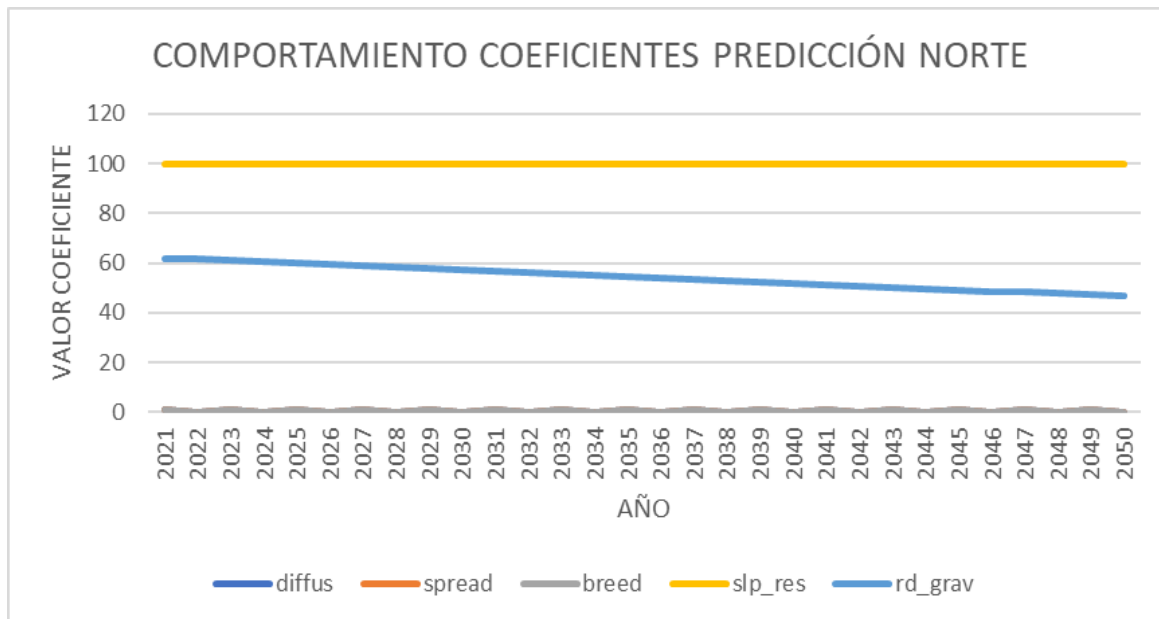


Figura 19. Representación gráfica del comportamiento de los coeficientes para la zona Norte de la ciudad hasta el año 2050.

La Figura 19 muestra la evolución temporal de los coeficientes de predicción del modelo SLEUTH aplicados a la zona norte de la ciudad para el periodo comprendido entre 2021 y 2050. En la gráfica se observa cómo los valores de los coeficientes diffus (difusión), spread (expansión), breed (nuevos núcleos), slp_res (pendiente) y rd_grav (atracción vial) varían a lo largo del tiempo. Destaca que el coeficiente de pendiente (slp_res) se mantiene constante en un valor alto (100), lo que indica que la pendiente sigue siendo un factor fuertemente limitante para el crecimiento urbano en esta zona durante todo el periodo de simulación. Por su parte, el coeficiente de atracción vial (rd_grav) permanece también constante, lo que sugiere una influencia estable de la red de vías en la expansión.

En cambio, los coeficientes diffus, spread y breed presentan una tendencia ligeramente decreciente a medida que avanzan los años, lo que puede interpretarse como una disminución progresiva en la dispersión y en la creación de nuevos núcleos urbanos a largo plazo. Esta dinámica sugiere que, en el escenario proyectado, el crecimiento urbano tendería a consolidarse en las áreas ya urbanizadas, con menor expansión hacia nuevas zonas periféricas. Este comportamiento refleja un posible patrón de saturación o estabilización del crecimiento en la zona norte hacia el año 2050.

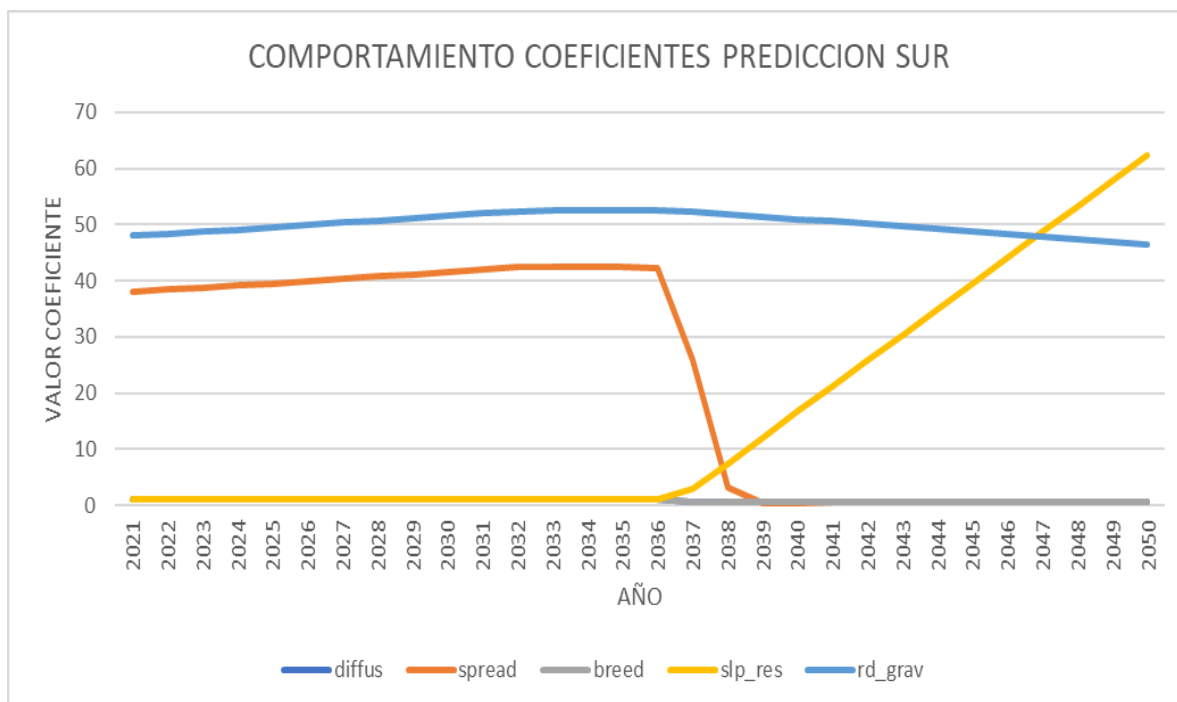


Figura 20. Representación gráfica del comportamiento de los coeficientes para la zona Sur de la ciudad hasta el año 2050.

La Figura 20 muestra la evolución de los coeficientes de predicción del modelo SLEUTH para la zona sur de la ciudad durante el periodo 2021–2050. A diferencia de la zona norte, aquí se evidencia un comportamiento más variable y con cambios abruptos. El coeficiente diffus (difusión) y spread (expansión) mantienen una tendencia relativamente estable hasta aproximadamente el año 2035, momento en el que se produce un descenso marcado en el coeficiente spread, que llega a valores cercanos a cero. Este cambio sugiere una disminución significativa en la capacidad de expansión de las áreas urbanas existentes hacia nuevas zonas, posiblemente por saturación o restricciones espaciales.

Por otro lado, el coeficiente breed, relacionado con la aparición de nuevos núcleos de urbanización, muestra un aumento progresivo hasta el año 2030, pero cae abruptamente a cero a partir de 2036, lo que indica que, en el escenario proyectado, ya no se estarían generando nuevos núcleos urbanos en la zona sur durante la segunda mitad del periodo de análisis.

A diferencia, el coeficiente de pendiente (slp_res) que había sido constante en valores mínimos comienza a incrementarse rápidamente a partir del año 2036, alcanzando valores altos hacia 2050. Esto refleja una creciente influencia de las pendientes en la limitación del crecimiento urbano. Por último, el coeficiente de atracción vial (rd_grav) se mantiene relativamente estable durante todo el periodo, aunque con una ligera disminución al final.

Este comportamiento conjunto indica que el crecimiento urbano en la zona sur tenderá a desacelerarse en el futuro, con una fuerte restricción por condiciones topográficas, menos expansión hacia nuevas áreas y ausencia de generación de nuevos núcleos urbanizados.

La predicción futura del crecimiento urbano se basa en los resultados obtenidos durante el lapso de proyección comprendido entre los años 2021 y 2050, generando una simulación para cada año que responde a las condiciones del escenario realista planteado. Los valores utilizados en esta etapa corresponden a los mejores coeficientes identificados durante la fase

de calibración "pronóstico", que constituye la última y más precisa etapa del modelo SLEUTH. Estos coeficientes representan el comportamiento esperado de los factores que controlan la expansión urbana a lo largo del tiempo y son actualizados anualmente para reflejar las dinámicas proyectadas. La evolución de dichos coeficientes está representada gráficamente en la Figura 19 para la zona norte y en la Figura 20 para la zona sur, permitiendo visualizar los cambios progresivos en parámetros como difusión, expansión, nuevos núcleos, pendiente y atracción vial, fundamentales para comprender la tendencia del modelo hasta el año 2050.

La figura 19 para la zona norte, los coeficientes del modelo SLEUTH reflejan un patrón de crecimiento urbano altamente controlado y sostenido. Los coeficientes de *diffus*, *spread* y *breed* se mantienen bajos y prácticamente constantes a lo largo del periodo 2021–2050, lo que sugiere una expansión urbana moderada, adyacente a las áreas ya consolidadas, sin generación significativa de nuevos núcleos urbanos. Por su parte, el coeficiente *slp_res* permanece fijo en 100, indicando una alta resistencia al crecimiento en zonas de pendiente, que es consistente con la geografía inclinada característica de esta zona. En cuanto al coeficiente *rd_grav*, se observa una tendencia decreciente, pero con valores aún altos, lo que evidencia que la red vial continúa siendo un factor dominante en la orientación del crecimiento, aunque su influencia disminuye ligeramente con el tiempo. En conjunto, estos comportamientos refuerzan la idea de una urbanización gradual, guiada por infraestructura existente y limitada por las condiciones topográficas del área.

A diferencia, la figura 20 para la zona sur presenta un comportamiento dinámico y variable en los coeficientes de predicción, que refleja una fuerte presión urbanizadora hasta la saturación del suelo disponible. El coeficiente *diffus* comienza en valores medios, indicando un crecimiento más disperso al inicio, mientras que *spread* inicia alto y cae abruptamente después de 2036, coincidiendo con el agotamiento de áreas urbanizables, lo que marca el fin de la expansión significativa. Al igual que en el norte, *breed* permanece en valores mínimos, señalando que no se generan nuevos centros urbanos, sino que se expande lo existente. En cuanto a la pendiente *slp_res*, esta no representa una barrera en los primeros años, pero incrementa progresivamente tras la saturación del suelo plano, lo que sugiere una limitación creciente por topografía hacia el final del periodo. Por último, el coeficiente *rd_grav* mantiene una tendencia levemente descendente, indicando que, aunque la red vial influye en la expansión, su efecto es secundario frente a la disponibilidad de suelo, que es el factor predominante en esta zona.

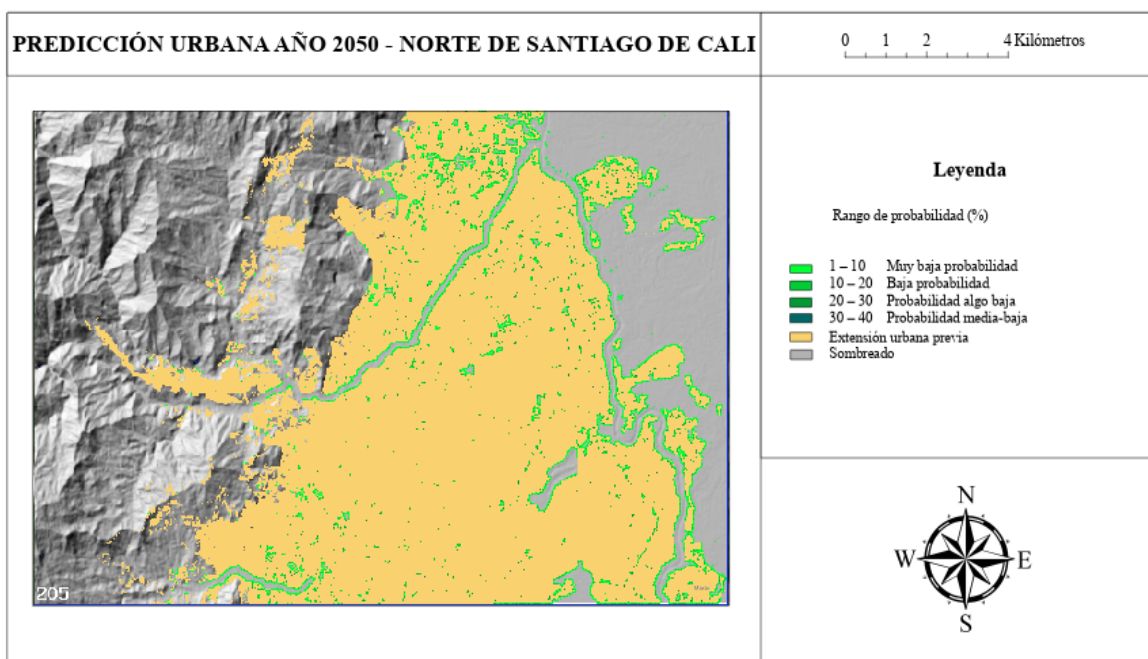


Figura 21. Salida cartográfica de predicción para el año 2050, Norte de la ciudad.

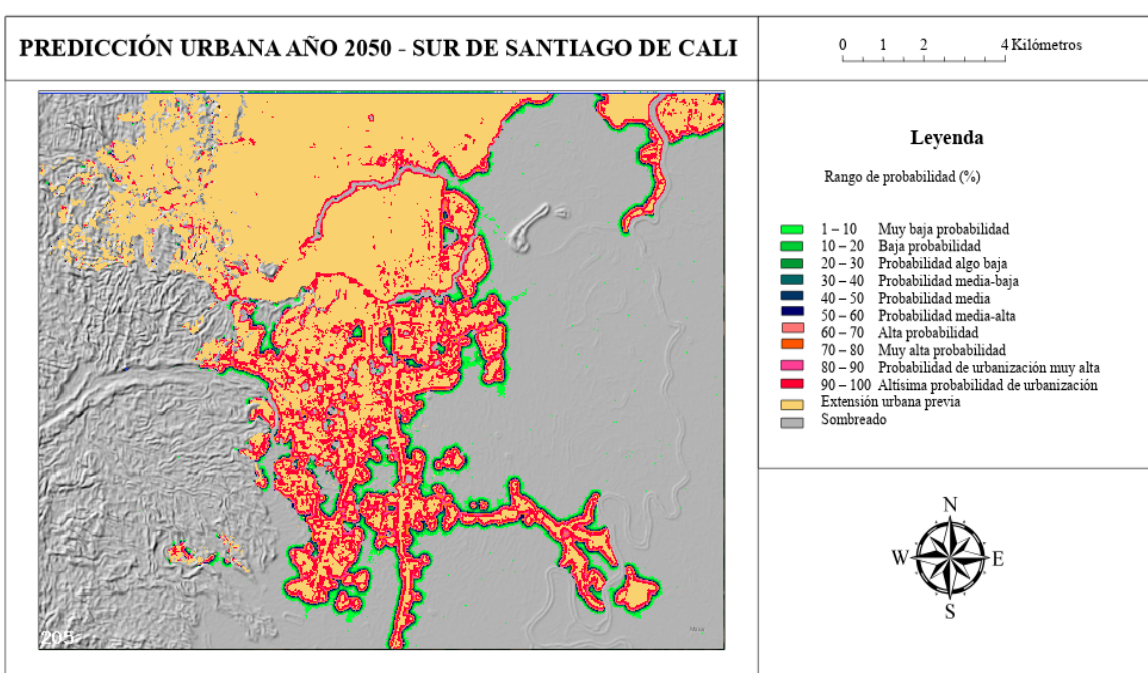


Figura 22. Salida cartográfica de predicción para el año 2050, Sur de la ciudad.

La simulación de expansión urbana proyectada al año 2050 para la zona norte de Santiago de Cali Figura 21 evidencia una dinámica de crecimiento contenida, caracterizada por una predominancia de áreas con rangos de probabilidad de urbanización entre 1 % y 40 %, correspondientes a clases de muy baja a media-baja probabilidad. Estas zonas se representan en tonos verdes y azulados, y se distribuyen mayoritariamente en los bordes del área urbana consolidada. El modelo sugiere que este sector presenta una menor presión de expansión urbana, posiblemente debido a restricciones físicas como la topografía de la zona. La extensión urbana previa (color amarillo) se muestra estable, sin indicios de un crecimiento acelerado acorde a los datos históricos. A diferencia de la zona sur, donde varían en gran

medida los distintos tipos de probabilidades de crecimiento como se evidencia en la Figura 22.

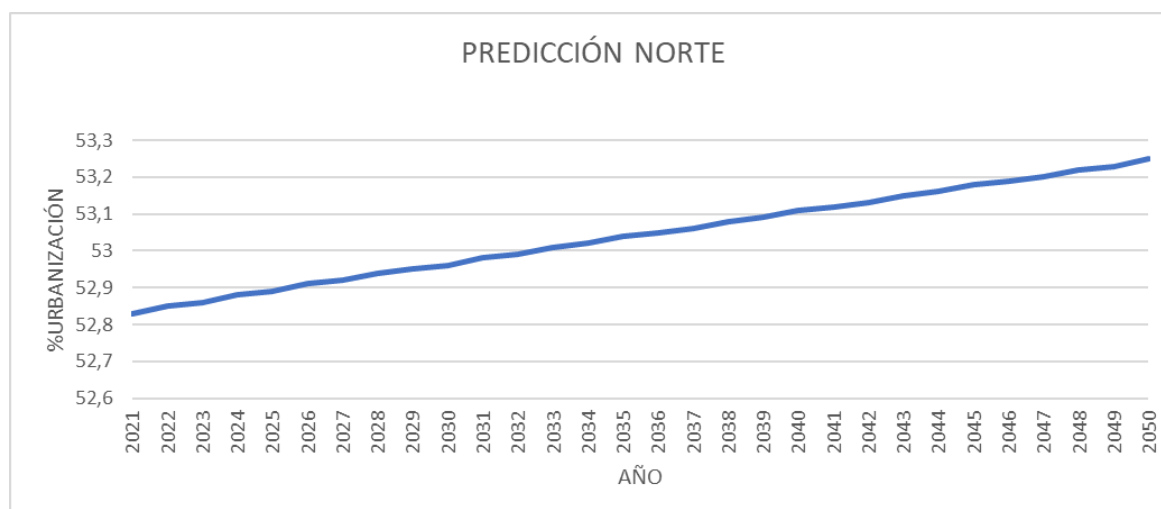


Figura 23. Representación gráfica del porcentaje de urbanización año a año en la zona Norte 2021-2050.

Este comportamiento se respalda de acuerdo con la Figura 23, donde se observa la evolución en porcentaje de urbanización para el año 2021 al año 2050, en la que se evidencia un crecimiento baja, pero constante, pasando de un 52,8% a un 53,25% para un total de apenas 0,45% en tres décadas. Lo cual confirma que el modelo para esta zona proyecta un crecimiento altamente contenido, sin crecimientos abruptos ni transformaciones intensas. La tendencia de dicho crecimiento sugiere una consolidación acorde a la urbanización existente, lo que refuerza la hipótesis de que el norte es una zona regulada, debido a sus limitaciones y condiciones existentes.

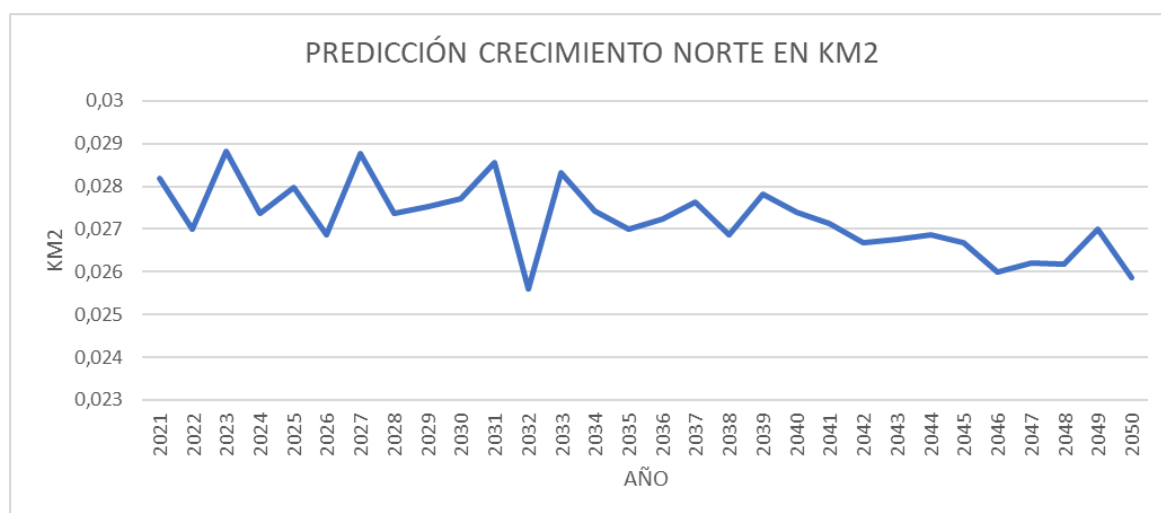


Figura 24. Representación gráfica de urbanización año a año por km² zona Norte 2021-2050.

La Figura 24 representa gráficamente la predicción del crecimiento urbano anual en la zona norte de la ciudad, expresada en kilómetros cuadrados (km²) para el periodo comprendido entre 2021 y 2050. Se observa que la expansión del suelo urbanizado se mantiene relativamente estable, con valores que oscilan entre 0,026 km² y 0,029 km² por año. Aunque se presentan ligeras variaciones, los datos se mantienen dentro de un rango estrecho, sin evidenciar picos de expansión abrupta ni caídas significativas. Esta constancia sugiere un

patrón de crecimiento urbano moderado y sostenido, en el que la expansión se distribuye de forma relativamente uniforme a lo largo del tiempo. La ausencia de tendencias marcadamente crecientes o decrecientes refuerza la idea de que, en este escenario, la zona norte continuará creciendo de forma controlada, posiblemente influenciada por factores como la consolidación de la infraestructura vial, la pendiente del terreno y la capacidad de absorción de suelo urbano disponible.

En contraste con el comportamiento observado en la zona norte en la figura 21, la simulación correspondiente a la zona sur de Santiago de Cali según la figura 22, revela un escenario de alta intensidad de crecimiento urbano para el año 2050. La presencia predominante de colores naranja, rosa intenso y rojo representan áreas con probabilidades de urbanización entre el 60 % y el 100 %, que indica una expansión urbana significativa incluso bajo el supuesto de un límite de crecimiento urbano impuesto, que se representa en color amarillo que son las zonas ya urbanizadas. Las zonas con probabilidad media-alta (60–70 %) hasta altísima (90–100 %) se concentran en sectores periféricos adyacentes a la mancha urbana consolidada, particularmente hacia el suroccidente y el corredor suroriental. Esta tendencia sugiere una fuerte presión urbanizadora motivada por la disponibilidad de suelo, conectividad vial (como la vía Panamericana) además de la expansión de proyectos de viviendas o equipamientos urbanos. El comportamiento espacial proyectado confirma que, aun con restricciones normativas, la demanda de suelo urbano y la dinámica territorial del sur de Cali impulsan un patrón de expansión acelerado y disperso que contrasta marcadamente con el observado en el norte de la ciudad.

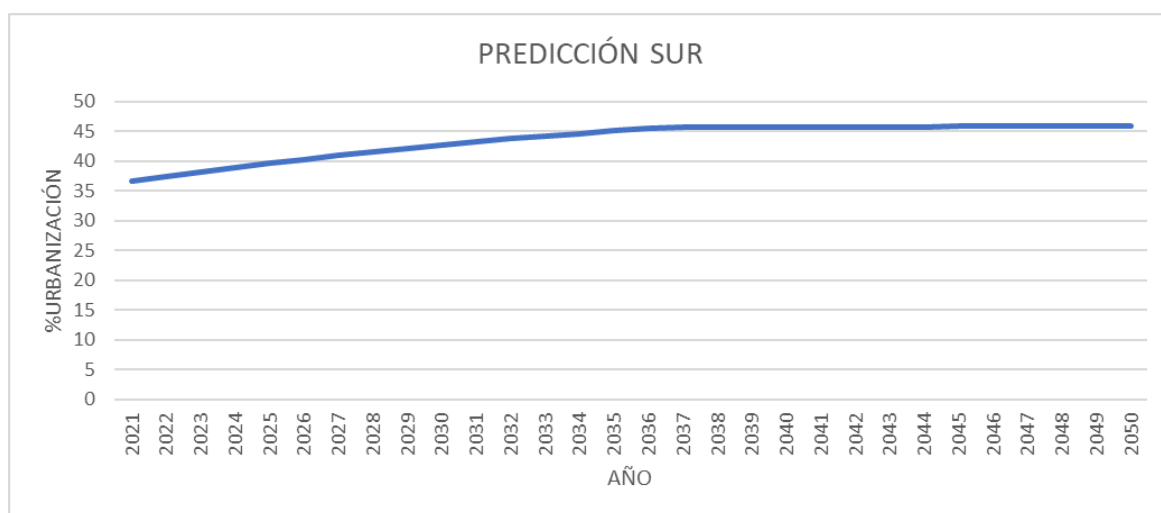


Figura 25. Representación gráfica del porcentaje de urbanización año a año en la zona Sur de la Ciudad 2021-2050.

Para la zona sur como se observa en la Figura 25 hay una expansión urbana continua y acelerada hasta el 2037, el modelo para esta zona proyecta la urbanización de zonas actualmente rurales o semiurbanas, que corresponde a una respuesta a la tendencia de conurbación entre Santiago de Cali y ciudades aledañas como es el caso de Jamundí. Se consolida que hay un paso del 37,5% de urbanización a un final de 46,9% para el año 2050, representando un crecimiento del 9,4% para este lapso, mostrando una intensificación en la ocupación del suelo urbano.

La figura 25 representa un comportamiento ascendente entre 2021 a 2037, para después de

este estabilizarse en lo que prosigue hasta el año 2050, viendo así una fase de expansión acelerada. Este patrón es el reflejo de la alta probabilidad de la urbanización proyecta que se mantiene entre el 60-100% lo que indica una saturación de los sectores periféricos más accesibles o la activación de restricciones normativas y físicas que limitan las nuevas expansiones, haciendo que este se ralentice.

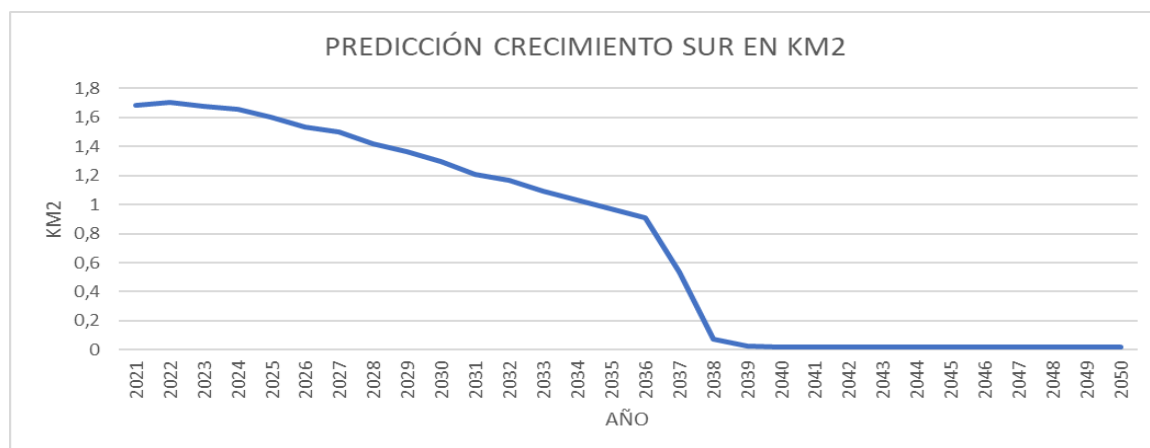


Figura 26. Representación gráfica de urbanización por km² año a año en la zona zona Sur 2021-2050.

Contrario a lo observado en la zona norte, respecto a la figura 26 la predicción del crecimiento urbano en el sur de Cali muestra un comportamiento claramente decreciente en el área urbanizable. Según el modelo SLEUTH, entre 2021 y 2036 se presenta una expansión continua, iniciando con valores cercanos a 1,7 km² por año y disminuyendo progresivamente. A partir de 2036, se observa una caída abrupta en el crecimiento, que culmina en 2039 con una tasa cercana a cero, indicando que para ese año se habría alcanzado la saturación total del suelo disponible para urbanizar. Esta transición de un crecimiento sostenido a una detención completa sugiere un agotamiento acelerado del suelo urbanizable, reflejando una ocupación intensiva y crítica en tan solo 18 años.

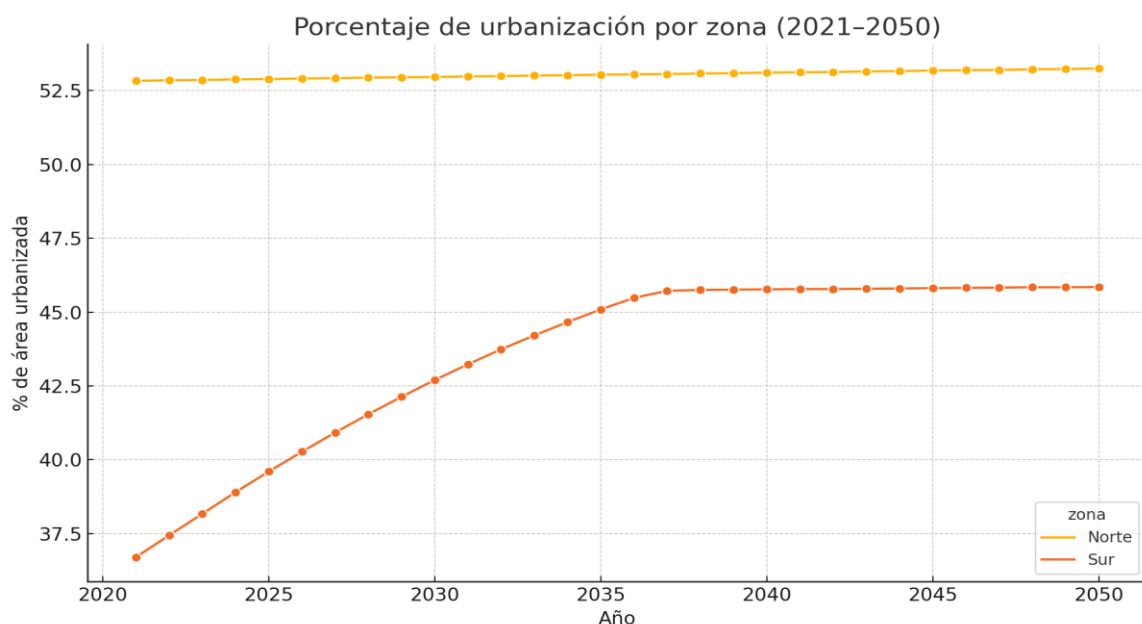


Figura 27. Representación gráfica comparativa de porcentaje de urbanización Norte vs Sur 2021-2050.

Esta Figura 27 permite sustentar todo lo dicho anteriormente, debido a que la expansión futura

de la ciudad Santiago de Cali no será homogénea, sino que se verá marcada por asimetrías territoriales que se deberán considerar en un futuro, mediante este comportamiento tan diferente entre estas zonas para las tres décadas establecidas, viendo como tales dos realidades urbanas contrastantes dentro de la misma ciudad y esto debido a sus limitaciones bien sean físicas y normativas.

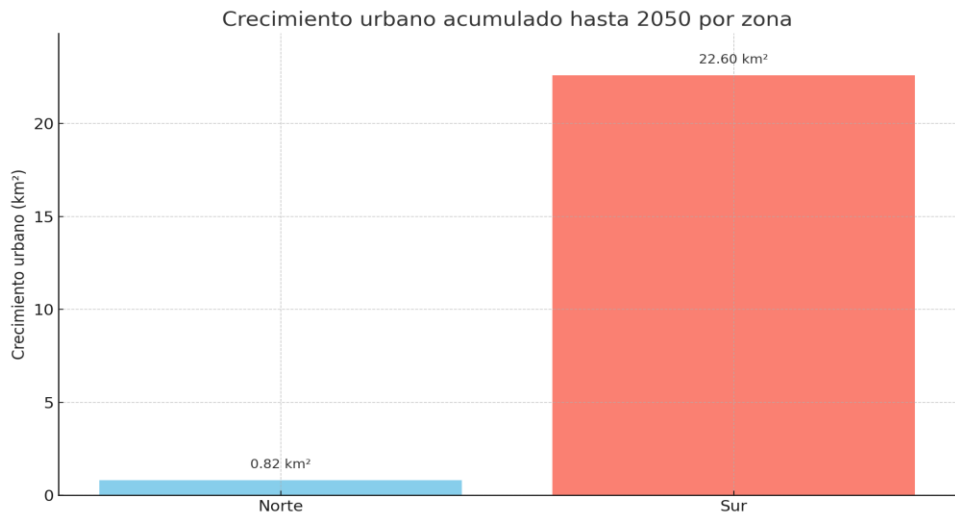
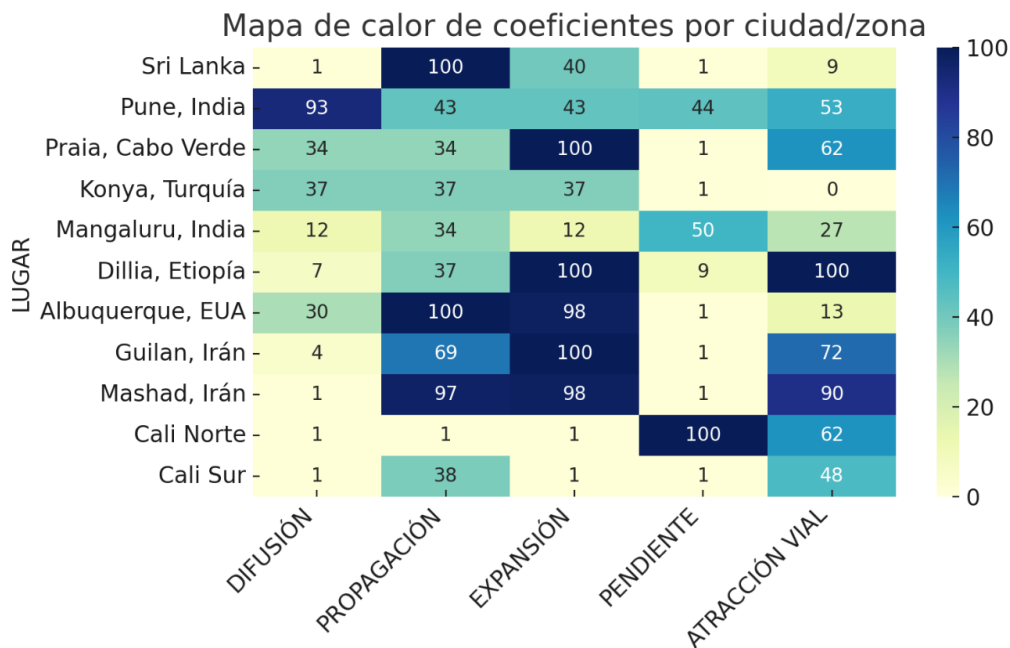


Figura 28. Representación gráfica de crecimiento urbano acumulado para 2050 en Km².

DISCUSIÓN

A partir de los resultados obtenidos anteriormente, se crea una serie de discusiones a continuación, donde se resaltan ciertas implicaciones urbanas y comparativas desde la ejecución y aceptabilidad del modelo, hasta dichos comportamientos divergentes de la ciudad.

Tabla 8. Tabla de coeficientes vs otros estudios SLEUTH.



La Tabla 8 presenta un mapa de calor con los valores calibrados para los cinco coeficientes del modelo SLEUTH aplicados en distintas ciudades del mundo, incluyendo Cali Norte y Cali

Sur. Esta representación permite identificar de forma visual y comparativa la influencia relativa de cada parámetro en el comportamiento del crecimiento urbano simulado.

Los coeficientes analizados son:

Difusión (Diffusion): crecimiento espontáneo desde píxeles individuales.

Propagación (Spread): crecimiento desde bordes urbanos existentes.

Expansión (Breed): aparición de nuevos núcleos de urbanización.

Pendiente (Slope): penalización por topografía accidentada.

Atracción vial (Road): crecimiento inducido por la infraestructura vial.

Cada uno de estos valores se encuentra normalizado en una escala de 1 a 100, donde los valores más altos reflejan mayor peso en la dinámica del modelo.

Respecto a los resultados observados en Cali Sur, se destaca que los coeficientes de Propagación (38) y Atracción vial (48) presentan los valores más elevados, lo que indica que el crecimiento urbano en esta zona se ve principalmente impulsado por la expansión de la mancha urbana existente y por la proximidad a corredores viales. En contraste, los valores de Difusión, Expansión y Pendiente permanecen en el mínimo (1), lo que sugiere baja incidencia de crecimiento espontáneo, de nuevos núcleos urbanos o de restricciones por pendiente.

En el caso de Cali Norte, el análisis muestra un comportamiento opuesto: todos los coeficientes tienen un valor mínimo (1), excepto Pendiente, que alcanza el valor máximo posible (100). Esto evidencia que el crecimiento urbano en esta zona está fuertemente limitado por las condiciones topográficas, probablemente asociadas a la presencia de laderas empinadas y áreas protegidas en los alrededores de los Farallones de Cali.

Al comparar estos resultados con otras ciudades del análisis, se observa que lugares como Albuquerque (EUA), Mashad (Irán) y Dillia (Etiopía) presentan coeficientes altos en múltiples factores (difusión, expansión y atracción vial), lo que refleja patrones de crecimiento urbano más complejos y multifactoriales. Por otro lado, ciudades como Praia (Cabo Verde) o Konya (Turquía) muestran configuraciones más equilibradas, sin predominio claro de un solo coeficiente.

En conjunto, los resultados permiten concluir que las dinámicas de crecimiento urbano en Cali presentan diferencias significativas entre zonas, lo que valida la necesidad de considerar escenarios de simulación diferenciados. Mientras que el sur de la ciudad refleja un patrón de crecimiento inducido por infraestructura vial y expansión lateral, el norte se encuentra condicionado fuertemente por factores físicos del territorio. Estos hallazgos son clave para interpretar los resultados de simulación del modelo SLEUTH en los capítulos siguientes.

La Tabla 7 permite comparar los valores encontrados para la fase de predicción para la zona norte y sur con estudios aplicados en Praia y Mashad. Con este gráfico se demuestra que Cali en su zona norte presenta un patrón de crecimiento bastante restringido, con valores mínimos en coeficientes como Difusión, Spread y Breed, además de un valor máximo de Slope y un valor alto en Road Gravity, lo que sugiere un crecimiento influenciado y condicionado por la influencia de carreteras y pendiente del terreno. Por otro lado, la zona sur de Cali se ajusta más con lo observado en Praia, donde se presentan valores bajos de Spread y Road gravity.

Sin embargo, mantiene valores bajos en Difussion, Breed y Slope, indicando crecimiento de borde y con poca influencia de los factores topográficos. Por su parte, Mashad refleja una configuración completamente distinta, con valores máximos en Spread y Breed, lo que evidencia un crecimiento disperso y con formación de nuevos núcleos urbanos (Rafiee et al., 2009). La comparación general revela que el comportamiento proyectado por SLEUTH para Cali Norte se asocia más a entornos urbanos densos y consolidados con crecimiento controlado, mientras que Cali Sur adopta una lógica intermedia entre expansión dirigida por vías y expansión por borde (Goncalves et al., 2019).

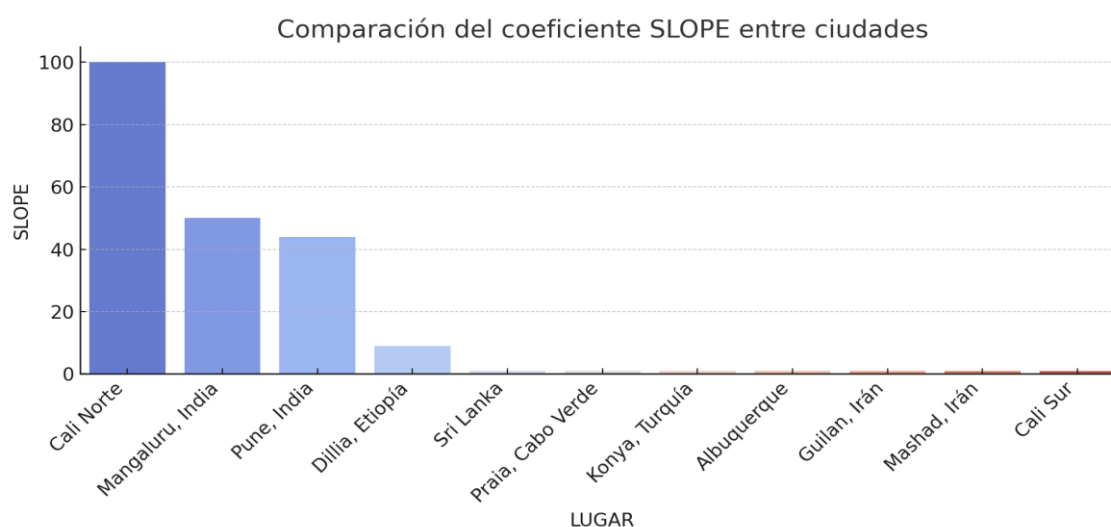


Figura 29. Representación gráfica del coeficiente Slope obtenido vs Slope de otros estudios SLEUTH.

En la Figura 29, se observa que la zona norte de Cali resalta como único caso de valor máximo de Slope, lo que indica una restricción total del crecimiento urbano en zonas con pendientes. Esta la diferencia con la zona sur de cali que presenta un valor de 1, y además se sitúa por encima del resto de ciudades comparadas, incluyendo contextos con presencia de topografía como Mangaluru, India (K et al., 2022) y Pune, India (Kantakumar et al., 2011), que tienen valores de 50 y 44 respectivamente. La decisión del modelo SLEUTH de asignar este valor extremo en el norte sugiere que, durante la calibración, el patrón histórico de urbanización evitó sistemáticamente las zonas inclinadas, reflejando una lógica de desarrollo urbano regulado o bien una topografía más escarpada naturalmente excluida del crecimiento. En otro contexto se desarrolla la zona sur de Cali y ciudades como Dillia, Mashad y Guilan donde se presenta valores mínimos en este coeficiente, indicando que en la zona sur de Cali es posible la urbanización en zonas con pendientes pronunciadas. Esta diferencia es clave para explicar por qué el crecimiento predicho en la zona sur de Cali fue mucho más amplio y acelerado, y por qué en el norte fue limitado: el coeficiente Slope, al tener tanto peso en el modelo, actúa como barrera efectiva que canaliza o frena la expansión urbana en territorios con limitantes físicas (Clarke et al., 1997).

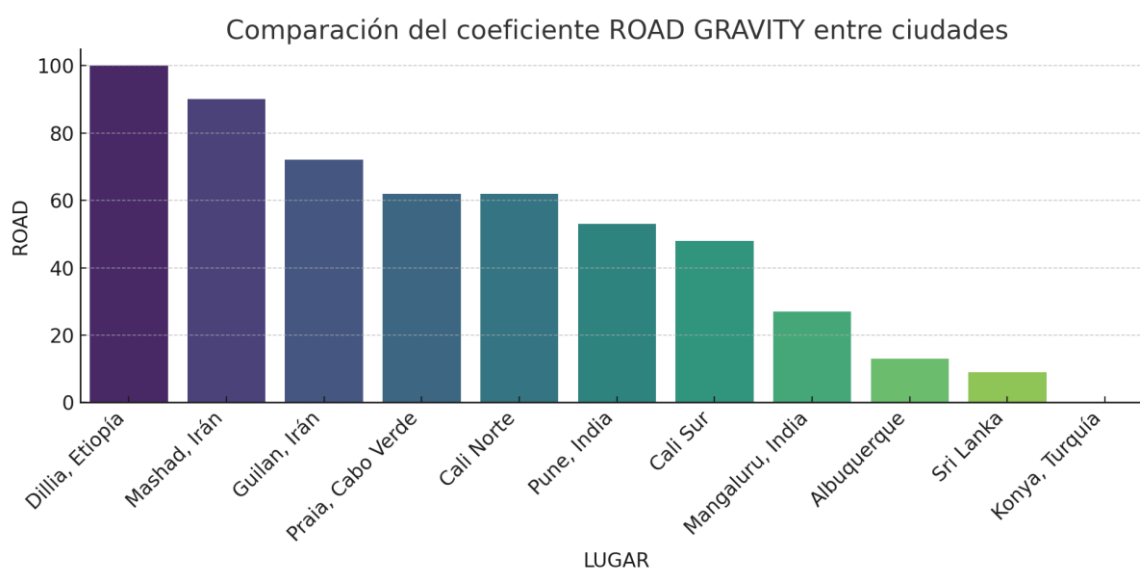


Figura 30. Representación gráfica del coeficiente Road gravity obtenidos vs Road gravity de otros estudios SLEUTH.

La Figura 30 demuestra cómo el coeficiente que mide la influencia de la red vial sobre el crecimiento urbano varía significativamente entre estudios, y posiciona a la zona norte de Cali con un valor de 62, ligeramente por encima de la zona Sur de Cali. En esta comparación, ciudades como Dillia, Etiopía (Mekonnen & Hailu, 2020), Mashad y Guilan en Irán (Rafiee et al., 2009; Dezhkam et al., 2014) destacan con valores superiores a 70, lo que refleja una expansión urbana muy orientada por el acceso a las vías. En cambio, ciudades como Konya, Turquía (Yagci & Iscan, 2024), Sri Lanka (Serasinghe Pathirana et al., 2018) y Albuquerque (Bajracharya, 2016) registran valores muy bajos, lo que indica una dinámica de crecimiento más dispersa o menos dependiente de la red vial estructural. El caso de Cali resulta interesante porque exhibe un gradiente dentro de una misma ciudad, no investigado de esta forma en otros estudios: en el norte, la expansión se da preferentemente cercana a vías existentes, mientras que en el sur el valor más bajo indica un crecimiento menos guiado por la infraestructura vial, vinculado a procesos informales, crecimiento por presión poblacional o debilidad institucional. Esta diferencia en el coeficiente Road Gravity entre norte y sur permite sustentar que el modelo SLEUTH está captando no sólo las condiciones físicas del terreno, sino también las huellas espaciales de las políticas públicas aplicadas históricamente en cada zona.

Los patrones de expansión urbana proyectados mediante el modelo SLEUTH reflejan realidades contrastantes entre la zona norte y la zona sur de Santiago de Cali, (Jaramillo, 2016) documenta la evolución diferenciada del crecimiento urbano en distintas zonas de la ciudad, que permite contrastar y validar los escenarios de simulación desarrollados en este estudio.

En la zona norte, la expansión urbana proyectada muestra un comportamiento contenido y controlado, con coeficientes bajos y estables (diffus, spread, breed), y una alta resistencia topográfica al crecimiento (slp_res = 100). Esta tendencia coincide con lo planteado por (Jaramillo, 2016), quien destaca que el desarrollo urbano de la zona norte de Cali ha estado históricamente guiado por la infraestructura vial existente, especialmente por corredores como la Autopista Suroriental, promoviendo una configuración más estructurada del crecimiento urbano. El coeficiente rd_grav, que refleja la influencia de la red vial, también se mantiene alto, aunque decreciente, que refuerza la idea de que el crecimiento urbano en esta zona está condicionado por la conectividad vial preexistente. Estas condiciones sugieren una

consolidación del suelo urbano más que una expansión, en línea con lo que se espera en sectores regulados por características físicas restrictivas.

En contraste, los resultados del modelo en la zona sur revelan una expansión urbana acelerada y menos estructurada, que se intensifica hasta el año 2037 y luego se estabiliza por agotamiento del suelo disponible. Esta dinámica ha sido evidenciada empíricamente por varios autores. Por ejemplo, (Arteaga et al., 2020) identificaron una fuerte expansión hacia el sur impulsada por migración interna y urbanización informal, lo que se traduce en una baja dependencia de la red vial (reflejada en el valor de $rd_{grav} = 48$) y una mayor ocupación de zonas con pendientes medias y altas ($slope = 1$), fuera del marco de planificación formal.

De forma complementaria (Jaramillo, 2016), mediante análisis multitemporal con imágenes satelitales, identificó un crecimiento urbano significativo hacia el sur entre 1998 y 2014, especialmente vinculado a proyectos habitacionales formales e informales. Esta observación se alinea con los resultados simulados en el presente estudio, que reflejan una expansión significativa en sectores periféricos del sur, incluso dentro de zonas rurales actualmente no urbanizadas.

Asimismo, el crecimiento observado hacia el suroccidente y corredor suroriental de Cali se relaciona con el fenómeno de conurbación hacia Jamundí, lo cual ha sido documentado por (André & Solís, 2024). En su estudio, se reporta un incremento del 144 % en el área urbana de Jamundí entre 2002 y 2021, con la construcción de más de 54.000 viviendas. Los datos históricos del DANE también corroboran la tendencia de crecimiento desbordado en Cali. Las viviendas urbanas de estrato 1 pasaron de 134.060 en 1973 a 503.555 en 2018, mientras que las de estrato 2 y 3 aumentaron de apenas 3.262 a 20.960. Este salto evidencia una presión habitacional creciente que ha promovido la expansión urbana, muchas veces por fuera de los límites establecidos en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), como lo advertía también (Mercedes Hoyos, 1990).

En conjunto, estos antecedentes permiten afirmar que la simulación realizada mediante el modelo SLEUTH no solo proyecta escenarios consistentes con la evolución territorial reciente de la ciudad, sino que también pone en evidencia las asimetrías territoriales que deben ser consideradas en la gestión del crecimiento urbano. Mientras que el norte refleja un desarrollo contenido y regulado, el sur representa una dinámica expansiva, compleja y con mayores desafíos en términos de planificación, sostenibilidad y calidad de vida.

CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES

El modelo SLEUTH demostró su capacidad para capturar la heterogeneidad espacial del crecimiento urbano en Cali, permitiendo identificar dinámicas divergentes dentro de una misma área metropolitana y proyectar, especialmente para la zona sur, una expansión intensa hasta la saturación del suelo disponible hacia 2037, en concordancia con procesos de conurbación hacia ciudades vecinas como Jamundí, previamente documentados en estudios multitemporales del crecimiento urbano. Esta proyección revela que la expansión futura podría dirigirse hacia zonas con pendientes y limitada conectividad vial, lo que plantea riesgos ambientales y sociales significativos. La aplicación del modelo se posiciona como una herramienta valiosa para anticipar escenarios de expansión no deseada, prever necesidades de infraestructura y orientar decisiones de planificación más sostenibles. Finalmente, los

resultados evidencian la necesidad de adoptar políticas diferenciadas de planificación urbana, ya que una estrategia homogénea resulta inadecuada frente a realidades urbanas tan contrastantes, siendo imprescindible consolidar y controlar el crecimiento en unas zonas, mientras que en otras se requieren acciones orientadas al fortalecimiento institucional, la contención del crecimiento y el control del desarrollo informal.

CAPÍTULO IX. TRABAJOS FUTUROS

Con base en los hallazgos obtenidos, las limitaciones identificadas en la aplicación del modelo SLEUTH y la necesidad de enriquecer las proyecciones urbanas en entornos complejos, se proponen a continuación diversas líneas de investigación que pueden ser desarrolladas en futuros estudios:

Integración de variables socioeconómicas: Incluir en el modelo datos relacionados con densidad poblacional, estratificación socioeconómica, valor del suelo, empleo, educación y servicios públicos. Esta integración permitiría capturar de manera más precisa los patrones de atracción urbana y comprender mejor la dinámica de la expansión desde una perspectiva de desigualdad territorial.

Incorporación de normativas urbanas vigentes: Considerar dentro de las capas de exclusión o restricción aquellas áreas normadas por planes de ordenamiento territorial (POT), planes parciales, zonas de protección ambiental, áreas de riesgo no mitigable y reservas ecológicas. Esto permitiría que el modelo represente de forma más fiel las barreras legales y técnicas al crecimiento urbano.

Desarrollo de modelos híbridos: Explorar la combinación de SLEUTH con modelos basados en agentes o técnicas de inteligencia artificial (como redes neuronales o algoritmos genéticos), con el fin de simular no solo el comportamiento físico del territorio, sino también las decisiones de múltiples actores urbanos como promotores inmobiliarios, autoridades locales y comunidades.

Replicación en otros contextos urbanos: Aplicar esta metodología en ciudades intermedias del Valle del Cauca, como Palmira, Tuluá o Buga, o en otras regiones metropolitanas del país. Esto permitiría realizar análisis comparativos de patrones de expansión, identificar factores comunes y específicos, y proponer lineamientos regionales de ordenamiento territorial.

Monitoreo y actualización con datos en tiempo casi real: Vincular el modelo con plataformas de monitoreo satelital como Sentinel-2, MODIS o radar de apertura sintética (SAR), para actualizar periódicamente las proyecciones con datos recientes. Esto facilitaría detectar desviaciones entre la simulación y la realidad, ajustando las políticas de intervención urbana de forma dinámica.

CAPÍTULO X. BIBLIOGRAFÍA

- Aburas, M. M., Ho, Y. M., Ramli, M. F., & Ash'aari, Z. H. (2016). The simulation and prediction of spatio-temporal urban growth trends using cellular automata models: A review. In *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* (Vol. 52, pp. 380–389). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.07.007>
- Ait El Haj, F., Ouadif, L., & Akhssas, A. (2023). Simulating and predicting future land-use/land cover trends using CA- Markov and LCM models. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100342>
- Akın, A., Erdoğan, N., Berberoğlu, S., Çilek, A., Erdoğan, A., Donmez, C., & Şatir, O. (2022). Evaluating the efficiency of future crop pattern modelling using the CLUE-S approach in an agricultural plain. *Ecological Informatics*, 71. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101806>
- Allen, J. and K. Lu. 2003. Modeling and prediction of future urban growth in the Charleston region of South Carolina: a GIS-based integrated approach. *Conservation Ecology* 8(2): <http://www.consecol.org/vol8/iss2/art2/>
- Al-Fugara, A., Al-Shabeeb, A., Al-Shawabkeh, Y., Al-Amoush, H., & Al-Adamat, R. (2018). SIMULATION AND PREDICTION OF URBAN SPATIAL EXPANSION IN HIGHLY VIBRANT CITIES USING THE SLEUTH MODEL: A CASE STUDY OF AMMAN METROPOLITAN, JORDAN.
- Al-shalabi, M., Billa, L., Pradhan, B., Mansor, S., & Al-Sharif, A. A. A. (2013). Modelling urban growth evolution and land-use changes using GIS based cellular automata and SLEUTH models: The case of Sana'a metropolitan city, Yemen. *Environmental Earth Sciences*, 70(1), 425–437. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2137-6>
- Batna City, Eastern Algeria, Using the SLEUTH model. *Bitacora Urbano Territorial*, 33(3). <https://doi.org/10.15446/bitacora.v33n3.106226>
- BID. (s.f.). github. Obtenido de <https://github.com/EL-BID/Modelo-de-prediccion-de-crecimiento-urbano->
- Burke, C. J., & Rosenblatt, M. (1958). A Markovian Function of a Markov Chain (Vol. 29, Issue 4).
- Cai, Z., Kwak, Y., Cvetkovic, V., Deal, B., & Mörtberg, U. (2023). Urban spatial dynamic modeling based on urban amenity data to inform smart city planning. *Anthropocene*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2023.100387>
- Cervero, R., & Arrington, G. B. (2008). Effects of TOD on Housing, Parking, and Travel. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/14179>
- City_life. (n.d.).
- Comportamiento poblacional <https://population.un.org/wup/Country-Profiles/>
- Camargo, A., Roca-Servat, D., & Furlong, K. (2022). La urbanización de las aguas en Colombia. In *La urbanización de las aguas en Colombia*. Editorial

- Universidad Pontificia Bolivariana. <https://doi.org/10.18566/978-628-500-066-9>
- Cong, C., Kwak, Y., & Deal, B. (2022). Incorporating active transportation modes in large scale urban modeling to inform sustainable urban development. *Computers, Environment and Urban Systems*, 91. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2021.101726>
- Chaudhuri, G., & Clarke, K. C. (2019). Modeling an Indian megalopolis– A case study on adapting SLEUTH urban growth model. *Computers, Environment and Urban Systems*, 77. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2019.101358>
- Chengzhi, Y., Jianhua, X., & Xingyu, Q. (2023). Understanding urban planning failure in China: Identifying practitioners' perspectives using Q methodology. *Cities*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104193>
- Clarke, Kansas; Gaydos, LJ Acoplamiento flexible de un modelo de autómatas celular y SIG: predicción del crecimiento urbano a largo plazo para San Francisco y Washington/Baltimore. En t. *J. Geogr. Informar. Ciencia*. 1998 , 12 , 699–714.
- Clarke, K. C., Hoppen, S., & Gaydos, L. (1996). Methods and techniques for rigorous calibration of a cellular automaton model of urban growth. *Proceedings, third international conference/workshop on integrating geographic information systems and environmental modeling*, January 21–25th, Santa Fe, NM.
- Clarke, K. C., & Johnson, J. M. (2020). Calibrating SLEUTH with big data: Projecting California's land use to 2100. *Computers, Environment and Urban Systems*, 83. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2020.101525>
- Deal, B., Pan, H., Timm, S., & Pallathucheril, V. (2017). The role of multidirectional temporal analysis in scenario planning exercises and Planning Support Systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, 64, 91–102.
- Feng, H.-H., Liu, H.-P., & Ying, L. " U. (2012). Scenario Prediction and Analysis of Urban Growth Using SLEUTH Model * 1. In *Pedosphere* (Vol. 22, Issue 2).
- García-Álvarez, D., Lloyd, C. D., Van Delden, H., & Camacho Olmedo, M. T. (2019). Thematic resolution influence in spatial analysis. An application to Land Use Cover Change (LUCC) modelling calibration. *Computers, Environment and Urban Systems*, 78. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2019.101375>
- Guzman, L. A., Escobar, F., Peña, J., & Cardona, R. (2020). A cellular automata-based land-use model as an integrated spatial decision support system for urban planning in developing cities: The case of the Bogotá region. *Land Use Policy*, 92. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104445>
- Hakan, O.; Klein, AG; Srinivas, R. Calibración del modelo SLEUTH basado en el crecimiento histórico de Houston. *J. Ciencias Aplicadas*. 2007 , 7 , 1843–

- Hersous, K., Nouari, S., Mezali, F., & Aquejdad, R. (2023). Urban sprawl prediction in Batna City, Eastern Algeria, Using the SLEUTH model. *Bitacora Urbano Territorial*, 33(3). <https://doi.org/10.15446/bitacora.v33n3.106226>
- He, C., Zhang, D., Huang, Q., & Zhao, Y. (2016). Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models. *Environmental Modelling and Software*, 75, 44–58. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.09.015>
- Hua, L., Tang, L., Cui, S., & Yin, K. (2014). Simulating urban growth using the SLEUTH model in a coastal peri-urban district in China. *Sustainability (Switzerland)*, 6(6), 3899–3914. <https://doi.org/10.3390/su6063899>
- Iván Ospina Gómez Alcalde Ricardo José Castro Iragorri, J., Andrés Sandoval Ávila, V., Escobar Morales Diana María Perilla Galvis Compiladores, G., Escobar Morales Mapas, G., & Muñoz, J. (2022). Edición: Subdirección de Desarrollo Integral-DAP Dirección editorial. <http://www.cali.gov.co/planeacion/publicaciones/137803/documentos-de-cali-en-cifras/>
- Jantz, C. A., Goetz, S. J., Donato, D., & Claggett, P. (2010). Designing and implementing a regional urban modeling system using the SLEUTH cellular urban model. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34(1), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2009.08.003>
- Kari, J. (2005). Theory of cellular automata: A survey. *Theoretical Computer Science*, 334(1–3), 3–33. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2004.11.021>
- Kiziridis, D. A., Mastrogrianni, A., Pleniou, M., Tsiftsis, S., Xystrakis, F., & Tsiripidis, I. (2023). Improving the predictive performance of CLUE-S by extending demand to land transitions: The trans-CLUE-S model. *Ecological Modelling*, 478. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110307>
- Li, J., & Liu, C. ming. (2017). Improvement of LCM model and determination of model parameters at watershed scale for flood events in Hongde Basin of China. *Water Science and Engineering*, 10(1), 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2017.03.006>
- Li, N., Miao, S., & Wang, Y. (2021). The future urban growth under policies and its ecological effect in the Jing-Jin-Ji area, China. *Heliyon*, 7(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06786>
- Li, X., & Gong, P. (2016). Urban growth models: progress and perspective. *Science Bulletin*, 61(21), 1637–1650. <https://doi.org/10.1007/s11434-016-1111-1>
- Lin, J., He, P., Yang, L., He, X., Lu, S., & Liu, D. (2022). Predicting future urban waterlogging-prone areas by coupling the maximum entropy and FLUS model. *Sustainable Cities and Society*, 80. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103812>
- Linares, S., & Clarke, K. (2018). Simulación del crecimiento urbano de la ciudad

- de Tandil (Argentina) aplicando el modelo SLEUTH.
<https://www.researchgate.net/publication/329844578>
- Liu, X., Wei, M., Li, Z., & Zeng, J. (2022). Multi-scenario simulation of urban growth boundaries with an ESP-FLUS model: A case study of the Min Delta region, China. *Ecological Indicators*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108538>
- Liu, Z., He, C., Yang, Y., & Fang, Z. (2020). Planning sustainable urban landscape under the stress of climate change in the drylands of northern China: A scenario analysis based on LUSD-urban model. *Journal of Cleaner Production*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118709>
- Mas, J.-F., Kolb, M., Houet, T., Paegelow, M., & Camacho Olmedo, M. T. (2010). Una comparación de diferentes enfoques de modelación de cambios de cobertura/uso del suelo. <https://shs.hal.science/halshs-01063482>
- Mentet, M., Hongkarnjanakul, N., Schwob, C., & Mezeix, L. (2022). Method to apply and visualize physical models associated to a land cover performed by CNN: A case study of vegetation and water cooling effect in Bangkok Thailand. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100856>
- Mercedes, A., & Hoyos, O. (1990). Presentada por Para optar el título de doctora en Geografía "Geografía, Planificación Territorial y Gestión Ambiental."
- Ojeda, J. J., Vallejo Villalta, I., & Pita López, M. F. (2010). Lha información geográfica al servicio de los ciudadanos : de lo global a lo local. Universidad de Sevilla.
- Patrones y tendencias de la transición urbana en Colombia. (n.d.).
- Preston, S. H. (1979). Urban Growth in Developing Countries: A Demographic Reappraisal (Vol. 5, Issue 2). <https://www.jstor.org/stable/1971823?seq=1&cid=pdf->
- R, A.-S. A., Al-fugara, kif, Rahman AL-SHABEEB, A., Rania, Q., Al-amoush, H., & Al-adamat, R. (2018). Simulation and prediction of urban spatial expansion in highly vibrant cities using the sleuth model: a case study of amman metropolitan simulation and prediction of urban spatial expansion in highly vibrant cities using the sleuth model: a case study of amman Metropolitan, Jordan Vahya Al-Shawabkeh simulation and prediction of urban spatial expansion in highly vibrant cities using the sleuth model: a case study of amman Metropolitan, Jordan".
- Rafiee, R., Mahiny, A. S., Khorasani, N., Darvishsefat, A. A., & Danekar, A. (2009). Simulating urban growth in Mashad City, Iran through the SLEUTH model (UGM). *Cities*, 26(1), 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2008.11.005>
- Resultados Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 Cali, Valle del Cauca. (2019).
- Rifat, S. A. Al, & Liu, W. (2022). Predicting future urban growth scenarios and

- potential urban flood exposure using Artificial Neural Network-Markov Chain model in Miami Metropolitan Area. *Land Use Policy*, 114. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.105994>
- Sanchez Gonzales, D. (2011). Aproximaciones a los conflictos sociales y propuestas sostenibles de urbanismo y ordenación del territorio en México.
- Saxena, A., & Jat, M. K. (2020). Land suitability and urban growth modeling: Development of SLEUTH-Suitability. *Computers, Environment and Urban Systems*, 81. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2020.101475>
- Silva, E. A., & Clarke, K. C. (2002). Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal. *Computers, Environment and Urban Systems*, 26(6), 525–552. [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(01\)00014-X](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(01)00014-X)
- Shen, T.-Y., Wang, W.-D., Min, H., Zhao-Cheng, G., Ling, X., & Yang, K.-Z. (2007). Study on Spatio-Temporal System Dynamic Models of Urban Growth (Vol. 27, Issue 1). *Theoretical and Empirical Researches in Urban Management*, 13(1), 37-56. Retrieved from <https://bd.univalle.edu.co/scholarly-journals/simulation-prediction-urban-spatial-expansion/docview/2003305945/se-2>
- Varela, R. V., Calderón, J. E. A., & Vásquez, M. E. R. (2020). Urban congestion in santiago de cali, a case study of public policy. In *Territorios* (Issue 42). Universidad del Rosario. <https://doi.org/10.12804/REVISTAS.UROSARIO.EDU.CO/TERRITORIOS/A.7239>
- Vergara Varela, R., Arias Calderón, J. E., Rodríguez Vásquez, M. E. (2020). Congestión urbana en Santiago de Cali, un estudio de caso de política pública. *Territorios*, (42), 1-29. Doi: <https://doi.org/10.10.12804/revistas.urosario.edu.co/territorios/a.7239>
- Wang, J., Bretz, M., Dewan, M. A. A., & Delavar, M. A. (2022). Machine learning in modelling land-use and land cover-change (LULCC): Current status, challenges and prospects. In *Science of the Total Environment* (Vol. 822). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153559>
- Zhang, Y., Kwan, M. P., & Yang, J. (2023). A user-friendly of six commonly used urban growth models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 104. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2023.102004>
- Márquez Lobato, B. Y. (2008). ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO URBANO UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICOS: CIUDAD JUÁREZ, CHIHUAHUA. <https://posgrado.colef.mx/wp-content/uploads/2009/11/TESIS-M%C3%A1rquez-Lobato-Bogart-Yail-MEA.pdf>
- FIGURA AUTOMATAS
- Leao, S., Bishop, I., & Evans, D. (2004). Simulating Urban Growth in a Developing Nation's Region Using a Cellular Automata-Based Model. *Journal of Urban Planning and Development*, 130(3), 145–158. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9488\(2004\)130:3\(145\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9488(2004)130:3(145))

- Bajracharya, P. (2016). Modeling Urban Growth and Land Use Change in Albuquerque using SLEUTH. http://digitalrepository.unm.edu/geog_etds
- Dey, B., & Sharma, P. (2024). A comprehensive review of urban growth studies and predictions using the Sleuth model. *The Scientific Temper*, 15(02), 2333–2341. <https://doi.org/10.58414/scientifictemper.2024.15.2.48>
- Clarke, K. C., Hoppen, S., & Gaydos, L. (1997). A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(2), 247–261. <https://doi.org/10.1068/b240247>
- NCGIA. (2025). Project Gigalopolis. Santa Barbara, CA: UC Santa Barbara. Retrieved 2025, from <http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig/index.html>
- Dietzel, C., & Clarke, K. C. (2007). Toward optimal calibration of the SLEUTH land use change model. *Transactions in GIS*, 11(1), 29–45. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2007.01031.x>
- Clarke, K. C., Hoppen, S., & Gaydos, L. J. (1996). Methods And Techniques for Rigorous Calibration of a Cellular Automaton Model of Urban Growth. In *Third International Conference on Integrated GIS and Modeling*. Santa Fe, NM: National Center for Geographic Information and Analysis. Retrieved from http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/clarke_keith/clarkeetal.html
- Marques, M. L., Müller-Pessôa, V., Camargo, D., & Cecagno, C. (2021). Simulação de cenários urbanos por autômato celular para modelagem do crescimento de Campinas - sp, Brasil. *Eure*, 47(142), 207–227. <https://doi.org/10.7764/eure.47.142.10>
- André, C., & Solís, V. (2024). Migración pendular, densidad y contaminación del aire: Un estudio de la expansión urbana de Cali hacia Jamundí. <https://hdl.handle.net/1992/75333>
- Arteaga, G., Escobar, D. A., & Galindo, J. A. (2020). Transformaciones urbanas. Crecimiento poblacional y migración en Cali (Colombia). 41. <https://www.revistaespacios.com>
- Bajracharya, P. (2016). Modeling Urban Growth and Land Use Change in Albuquerque using SLEUTH. http://digitalrepository.unm.edu/geog_etds
- Berberoglu, S., Akin, A., & Clarke, K. C. (2016). Cellular automata modeling approaches to forecast urban growth for adana, Turkey: A comparative approach. *Landscape and Urban Planning*, 153, 11–27. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.04.017>
- Dezhkam, S., Amiri, B. J., Darvishsefat, A. A., & Sakieh, Y. (2014). Simulating the urban growth dimensions and scenario prediction through sleuth model: a case study of Rasht County, Guilan, Iran. *GeoJournal*, 79(5), 591–604. <https://doi.org/10.1007/s10708-013-9515-9>
- Eyelade, D., Clarke, K. C., & Ijagbone, I. (2022). Impacts of spatiotemporal resolution and tiling on SLEUTH model calibration and forecasting for urban areas with unregulated growth patterns. *International Journal of Geographical Information*

- Science, 36(5), 1037–1058. <https://doi.org/10.1080/13658816.2021.2011292>
- Goncalves, T. M., Zhong, X., Ziggah, Y. Y., & Dwamena, B. Y. (2019). *Simulating Urban Growth Using Cellular Automata Approach (SLEUTH)-A Case Study of Praia City, Cabo Verde*. *IEEE Access*, 7, 156430–156442. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2949689>
- Jaramillo, Diego. (2016). *ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA EXPANSIÓN URBANA DEL CIUDAD DE SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA*. <https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/3003>
- K, D., Jain, G. V., & Angadi, D. P. (2022). *Land-use change dynamics and urban growth simulations in a medium-sized city of Mangaluru, India through CA-based SLEUTH urban growth model*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-759867/v1>
- Kantakumar, L. N., Vidyapeeth, B., Kantakumar, L., Sawant, N. G., & Kumar, S. (2011). *recasting urban growth based on GIS, RS and SLEUTH model in Pune metropolitan area*. In *INTERNATIONAL JOURNAL OF GEOMATICS AND GEOSCIENCES* (Vol. 2, Issue 2). <https://www.researchgate.net/publication/284545656>
- Mekonnen, Y., & Hailu, A. (2020). *Modeling urban growth and land use transition using SLEUTH model: the case of Dilla City*. https://www.researchgate.net/publication/347858648_Modeling_Urban_Growth_and_Land_Use_Transition_Using_SLEUTH_Model_The_Case_of_Dilla_City_Ethiopia
- Rafiee, R., Mahiny, A. S., Khorasani, N., Darvishsefat, A. A., & Danekar, A. (2009). *Simulating urban growth in Mashad City, Iran through the SLEUTH model (UGM)*. *Cities*, 26(1), 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2008.11.005>
- Serasinghe Pathiranage, I. S., Kantakumar, L. N., & Sundaramoorthy, S. (2018). *Remote Sensing Data and SLEUTH Urban Growth Model: As Decision Support Tools for Urban Planning*. *Chinese Geographical Science*, 28(2), 274–286. <https://doi.org/10.1007/s11769-018-0946-6>
- Yagci, C., & Iscan, F. (2024). *The Impact of Public Investment on Urban Growth Under Different Scenarios by Using the SLEUTH as a Forecasting Model: The Case of Konya/Turkey*. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 17(3), 1161–1182. <https://doi.org/10.1007/s12061-024-09581-y>

