



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Evaluación del crecimiento urbano sobre el secuestro y el
almacenamiento de carbono orgánico en el Suelo de
Conservación de la Ciudad de México

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciada en Ciencias de la Tierra

PRESENTA :

Emily Rivera Mondragon

DIRECTORA DE TESIS:

Dra. Yosune Miquelajauregui Graf

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1. Datos del alumno

Rivera

Mondragon

Emily

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Licenciatura en Ciencias de la Tierra (Ciencias Ambientales)

312150152

2. Datos del tutor

Dra. en Ciencias Forestales

Yosune

Miquelajauregui

Graf

3. Datos del sinodal 1

Dr.

Leopoldo

Galicia

Sarmiento

4. Datos del sinodal 2

Dra.

Nadia Silvana

Santini

González

5. Datos del sinodal 3

Dr.

Víctor Daniel

Ávila Akerberg

6. Datos del sinodal 4

Dra.

Alma Virgen

Mendoza

Ponce

7. Datos del trabajo escrito

Evaluación del crecimiento urbano sobre el secuestro y el almacenamiento de carbono orgánico en el Suelo de Conservación de la Ciudad de México

105 p.

2024

Resumen

La Ciudad de México forma parte de una de las metrópolis más grandes en el mundo. Como parte de su división administrativa, el 58% del territorio representa Suelo de Conservación, el cual provee diversos servicios ecosistémicos, entre ellos se encuentran una amplia diversidad biológica, la recarga del acuífero del Valle de México, la mejora de la calidad del aire y el almacenamiento y la captura de carbono, entre otros. Esta zona ha presentado una constante presión, y crecimiento de suelo urbano, y ha derivado en la pérdida de cobertura forestal, y a su vez, pérdidas significativas de carbono orgánico almacenado en la biomasa y el suelo. En el presente trabajo se realizó la simulación y la predicción del crecimiento del suelo urbano dentro del Suelo de Conservación de la Ciudad de México en los años 2030, 2040, 2050 y 2060 considerando tres escenarios alternativos de crecimiento urbano mediante el modelo SLEUTH (Slope, Land Use, Exclusion, Urban, Transportation and Hillshade). Los resultados de dicho modelo se ingresaron al modelo InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) para simular las consecuencias derivadas de la urbanización en el almacenamiento de carbono en el Suelo de Conservación de la Ciudad de México. Las proyecciones sugieren que la cobertura urbana en el Suelo de Conservación incrementaría cerca de 33,230 ha, 25,462 ha 7,767 ha, respectivamente, para el año 2060, bajo el escenario tendencial (EST), escenario con restricciones (ECR) y escenario sin restricciones (ESR). El EST proyecta un futuro en la Ciudad de México donde el desarrollo urbano prevalecerá sin cambios significativos en las tendencias actuales. El ECR se basa en políticas territoriales sostenibles que limitan la expansión urbana en áreas de alto valor socioecológico. El (ESR) plantea un futuro en el que las instituciones gubernamentales y políticas públicas priorizan el desarrollo en áreas de conservación y alto valor socioecológico. Los resultados sugirieron que, dependiendo de las políticas aplicadas en el territorio, se presentarán diferentes trayectorias plausibles de crecimiento urbano. Así mismo, se esperaba una reducción del carbono orgánico en los diversos reservorios de carbono, y la magnitud de esta reducción variará según el tipo de escenario. Es importante destacar que el escenario sin

restricciones fue el que mostró la mayor pérdida de carbono. Se concluye que deben integrarse herramientas que prioricen el manejo de áreas que provean servicios ecosistémicos para el mejoramiento de la planificación urbana.

Dedicatoria

A **Dios**, quien hizo posible que esta carrera se llevara a cabo de principio a fin. Solo Dios hizo y hace posible todas las cosas, todos los éxitos que llegaron y que están por venir. ¡Muchas gracias Dios!

A una persona con quien he compartido más de 20 años de mi vida y a quien admiro profundamente, mi ser. A pesar de las decepciones y los obstáculos, persististe hasta alcanzar lo máximo. Esta meta es solo el comienzo de una vida mejor.

A la University of California, Merced en Estados Unidos, por elegirme para participar en uno de sus programas de verano más importantes. Agradezco el apoyo para continuar mis estudios sobre el clima, así como a todos sus profesores, compañeros y amigos con quienes compartí esta experiencia increíble durante todo el verano.

Agradezco enormemente al Dr. Paul Almeida, con quien trabajé en investigación durante todo el verano en UC Merced. Agradezco su confianza en mí, en mi trabajo y en mis capacidades para llevar a cabo una investigación de alto nivel.

Un agradecimiento especial a la Universidad de Merced por proporcionar una beca completa para trabajar en proyectos de investigación sobre el clima durante todo el verano, así como a mi gran mentor, el Dr. Paul Almeida, quien es un excelente ser humano. A todos los que me acogieron y apoyaron durante mi estancia de investigación, ¡muchas gracias!

Considero que el camino en el área de las ciencias exactas no es fácil, al igual que el camino universitario en la facultad de ciencias. Me siento orgullosa de haber dado un paso más en la carrera de la vida, pues la satisfacción lograda por el esfuerzo vale más que cualquier otra cosa. Este camino implicó superar conflictos internos, enfrentar el desafío del conocimiento nuevo y reflexionar sobre la vida. Ha sido un camino duro, en el que he caído muchas veces, pero he continuado con determinación.

Espero que el trabajo en el que he dedicado cientos de horas sea útil para la sociedad y para México, país al que amo y admiro. Espero que este trabajo invite a reflexionar sobre nuestras acciones como individuos y como sociedad, así como sobre el cuidado de las zonas de alto valor ambiental, que no debe ser una opción sino una obligación para una mejor calidad de vida.

Acrónimos

- **UNAM** Universidad Nacional Autónoma de México
- **ZMCM** Zona Metropolitana de la Ciudad de México
- **CDMX** Ciudad de México
- **SLEUTH** *Slope, Land Use, Exclusion, Transportation & Hillshade Model*
- **InVEST** Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs
- **OSM** *Optimum Sleuth Metric*
- **SC** Suelo de Conservación
- **CONAFOR** Comisión Nacional Forestal
- **CONABIO** Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
- **INFyS** Inventario Nacional y de Suelos
- **INEGI** Instituto Nacional de Estadística y Geografía
- **SEDEMA** Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México
- **PAOT** Programa Ambiental y de Ordenamiento Territorial de la Ciudad de México
- **IPCC** Intergovernmental Panel on Climate Change
- **ONU** Organización de las Naciones Unidas
- **CEPAL** Comisión Económica para América Latina y el Caribe
- **SE** Servicios Ecosistémicos

Índice general

Resumen	III
Acrónimos	VII
Índice de figuras	X
Índice de tablas	XII
Introducción.....	14
1.1. La urbanización como agente de cambio	14
1.2. Impactos de la urbanización sobre los servicios ecosistémicos en áreas peri-urbanas	15
1.3. Secuestro y almacenamiento de carbono en ecosistemas terrestres	18
1.4. Modelos de crecimiento urbano y técnicas de monitoreo de la dinámica de carbono en ecosistemas terrestres.....	22
1.5. Dinámica del carbono en el Suelo de Conservación de la Ciudad de México	28
1.6. Justificación.....	30
1.7. Objetivos.....	32
Métodos	33
2.1. Área de estudio	33
2.2. El modelo de crecimiento urbano SLEUTH.....	36
2.2.1. Calibración y validación del modelo SLEUTH.....	41
2.2.2. Construcción de tres escenarios alternativos de crecimiento urbano	43
2.3. El modelo InVEST	47
2.3.1. Secuestro y almacenamiento de carbono orgánico bajo los escenarios alternativos de crecimiento urbano.....	51
Resultados.....	54

3.1. Cambio de cobertura urbana en el Suelo de Conservación mediante el modelo SLEUTH.....	54
3.2. Evaluación del secuestro y el almacenamiento de carbono orgánico en el SC bajo los escenarios alternativos de crecimiento urbano	58
3.3. Distribución espacial del almacenamiento de carbono orgánico en el SC proyectada al 2060	63
Discusión	65
4.1. Simulación de la cobertura urbana en SC a través del modelo SLEUTH	65
4.1.1. Problemáticas particulares del Suelo de Conservación de la Ciudad de México relacionadas con el crecimiento urbano.....	68
4.2 Cambios proyectados sobre el secuestro y el almacenamiento de carbono orgánico en el Suelo de Conservación a través de los escenarios de crecimiento urbano futuro	71
4.2.1 Sobre la planeación sostenible en términos del Suelo de Conservación	75
4.3 Ventajas y limitaciones de los modelos InVEST y SLEUTH	78
Conclusiones.....	81
Apéndice A	83
Apéndice B	86
Apéndice C	90

Índice de figuras

Figura 1.1. Servicios ecosistémicos. Tomada y adaptada de: Piret Vacht <i>et al.</i> , 2019.	16
Figura 1.2. National Oceanic and Atmospheric Administration. (2019). Ciclo del carbono. https://www.noaa.gov/education/resource-collections/climate/carbon-cycle	19
Figura 1.3. Datos de entrada del modelo de balance de carbono del sector forestal canadiense CBM-CFS3. Tomado y adaptado de Kurz <i>et al.</i> , 2016.	26
Figura 2.1. Localización y extensión del Suelo de Conservación de la Ciudad de México. Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2016).	35
Figura 2.2. Proceso de Cambio Inicial y Agrupamiento. Tomada de Clarke, 2008.	39
Figura 2.3. Proceso de envejecimiento y eliminación de deltatrónes. Tomada de Clarke, 2008.	40
Figura 2.4. Propagación y reincorporación de deltatrónes en el mapa de uso del suelo. Tomada de Clarke, 2008.	41
Figura 3.1. Cambio de cobertura urbana (ha) en el SC para el 2060 relativo al periodo histórico bajo los tres escenarios alternativos de crecimiento urbano: escenario sin restricciones (ESR), escenario con restricciones (ECR) y escenario tendencial (EST).	55
Figura 3.2. Se muestra el área urbana en color rojo para el período histórico en 2014 y en los diversos escenarios proyectados hasta 2060: (a) período histórico 2014, (b) escenario tendencial EST 2060, (c) escenario sin restricciones ESR 2060 y (d) escenario con restricciones ECR 2060.	56
Figura 3.3: Porcentaje de cambio promedio proyectado a 2060 respecto al año histórico aplicando diferentes restricciones: (a) escenario tendencial EST; (b) escenario sin restricciones ESR; (c) escenario con restricciones ECR.	64
Figura B.1. En la figura (a), se representa el área urbana correspondiente al período histórico en 2014. Las figuras (b) a (e) muestran los escenarios sin restricciones (ESR) proyectados hasta 2060: (b) ESR 2030, (c) ESR 2040, (d) ESR 2050 y (e) ESR 2060.	87

Figura B.2. En la figura (a), se representa el área urbana correspondiente al período histórico en 2014. Las figuras (b) a (e) muestran los escenarios con restricciones (ECR) proyectados hasta 2060: (b) ECR 2030, (c) ECR 2040, (d) ECR 2050 y (e) ECR 2060..... 88

Figura B.3. En la figura (a), se representa el área urbana correspondiente al período histórico en 2014. Las figuras (b) a (e) muestran los escenarios tendenciales (EST) proyectados hasta 2060: (b) EST 2030, (c) EST 2040, (d) EST 2050 y (e) EST 2060. 89

Índice de tablas

Tabla 2.1. Insumos requeridos para la inicialización del modelo SLEUTH.	37
Tabla 2.2: Parámetros del mejor ajuste y métrica de ajuste correspondientes al modelo SLEUTH.	43
Tabla 2.3: Valores de exclusión dados en porcentaje (%) asignados a las distintas unidades territoriales para cada escenario alternativo de crecimiento urbano.	46
Tabla 2.4. Datos de entrada requeridos por el modelo de almacenamiento y secuestro de carbono.	48
Tabla 2.5. Categorías asignadas al uso de suelo y tipo de vegetación con base en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (CONAFOR, 2018).	49
Tabla 2.6: Matriz del almacenamiento de carbono (MgC/ha) para los cuatro reservorios y para cada categoría utilizados como datos de entrada en el modelo InVEST. La fuente de donde se recopilaron los datos para el almacenamiento de carbono se encuentra en el Apéndice A.	50
Tabla 3.1. Área total (ha) proyectada al 2060 y el porcentaje de pérdida relativo al periodo histórico 2014 asociados a cada categoría de tipo de suelo y vegetación bajo los tres escenarios alternativos de crecimiento urbano: escenario sin restricciones (ESR), escenario con restricciones (ECR) y escenario tendencial (EST).	57
Tabla 3.3. Tasa de secuestro de carbono en MgC/ha*año calculado para diferentes periodos de tiempo y para las distintas categorías de uso del suelo y vegetación.	59
Tabla 3.4 Carbono total almacenado (MgC/ha), cambio neto (MgC/ha) y porcentaje de cambio promedio (%) para cada tipo del suelo y vegetación evaluados bajo los tres escenarios alternativos de crecimiento urbano: escenario sin restricciones (ESR), escenario con restricciones (ECR) y escenario tendencial (EST).	62
Tabla A1. Principales estudios de estimación de contenido de carbono (MgC/ha) en cuatro reservorios	84

Tabla C1. Zonas federales utilizadas para la construcción de la capa de exclusión de SLEUT.
..... 90

Tabla C2. Fuente de donde fue obtenida la información para la construcción de la capa de
exclusión de SLEUT..... 90

Capítulo 1

Introducción

1.1. La urbanización como agente de cambio

La urbanización es uno de los agentes de cambio más importantes a nivel regional y global (Civeira, 2016; ONU, 2018). La magnitud y la aceleración con las que ocurre la urbanización han llevado a que se le incluya como uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 de la Asamblea General de las Naciones Unidas (ONU, 2018). Las ciudades albergan cerca del 55% de la población mundial, y se espera que para el año 2050 el 68% de la población mundial habite en ciudades (Haase *et al.*, 2014; UN, 2019; Márquez, 2008; Perevochtchikova y Torruco, 2014). El proceso de urbanización conlleva, generalmente, el impulso de actividades humanas relacionadas con la industrialización, el desarrollo de infraestructura urbana, la vivienda y el transporte, los servicios públicos y el desarrollo tecnológico (Márquez, 2008; Suárez y Delgado, 2006).

En América Latina, la tasa de expansión urbana ha sido muy acelerada (McDonald *et al.*, 2013; Xiao *et al.*, 2020), y ha resultado en patrones de expansión y dispersión de los centros urbanos sobre áreas naturales (Soto-Cortés, 2015; Torres-Lima y Cruz-Castillo, 2019). En México, por ejemplo, entre 1980 a 2010, la población que vivía en zonas metropolitanas y ciudades presentó un aumento del 61% al 70% como consecuencia del desarrollo de 176 nuevos centros urbanos (Sobrino, 2011). Uno de los factores conducentes a este aumento poblacional fue la migración interna, que refiere a los flujos de personas provenientes de áreas rurales que llegaron a estos centros urbanos en busca de una mejor calidad de vida (Sobrino, 2011).

En los últimos cincuenta años, la Ciudad de México (CDMX) ha experimentado un crecimiento urbano expansivo de tipo horizontal con una tendencia de aumento hacia las zonas periféricas que albergan áreas de alto valor ecológico (Cruz, 2000; SEDEMA, 2016). El crecimiento urbano en la CDMX ha sido impulsado, por una parte, por el aumento poblacional, y por otra, a la falta de instrumentos y estrategias integrales de ordenamiento ecológico, ordenamiento de los asentamientos humanos y de las actividades productivas (Bottino, 2009). Este crecimiento urbano poco planeado ha derivado en problemas ambientales, sociales y económicos graves, como el agotamiento de los recursos naturales, el deterioro del medio rural, la degradación de la tierra, la desigualdad social, los conflictos sociales, la marginación y la pobreza (Sánchez, 2012).

1.2. Impactos de la urbanización sobre los servicios ecosistémicos en áreas peri-urbanas

Los servicios ecosistémicos (SE) son todos aquellos beneficios que las poblaciones humanas obtienen de los ecosistemas (**Figura 1.1**) (MEA, 2005). El concepto de servicios ecosistémicos ha cobrado gran relevancia en el sector académico y no académico ya que hace explícita la estrecha relación entre el bienestar de la sociedad humana y la salud de los ecosistemas (Balvanera y Cotler, 2007). De acuerdo con el *Millennium Ecosystem Assessment* (2005), los SE se clasifican de la siguiente manera, provisión, regulación, soporte y cultura. Los servicios de provisión refieren a los productos obtenidos de los ecosistemas necesarios para mantener la vida humana, por ejemplo, la provisión de agua potable, alimentos y otros recursos naturales. Los servicios de regulación son todos aquellos asociados a la regulación del clima, la calidad del aire, el control de la erosión, la purificación del agua y la polinización. Los servicios de soporte son todos aquellos necesarios para la producción de todos los servicios entre los cuales se encuentran el ciclo del carbono, la retención y la formación de suelo, el ciclo de nutrientes, la diversidad genética y de especies. Los servicios culturales proporcionan beneficios no materiales como la recreación, el ecoturismo y el patrimonio cultural.

La expansión urbana acelera los procesos de peri-urbanización en áreas de transición rural-urbana los cuales son expresados como transformaciones físicas, sociales y económicas. Las áreas peri-urbanas generalmente incluyen una diversidad de ambientes forestales, agrícolas, humedales, pastizales, entre otros, que ofrecen SE esenciales para los residentes urbanos. Sin embargo, el reemplazo de la cobertura natural asociado a la urbanización impacta de manera negativa la disponibilidad y el flujo de éstos SE (Alberti y Marzluff, 2004; Das y Das, 2019; Seto *et al.*, 2012). La urbanización en áreas peri-urbanas trae además consigo un aumento en la demanda de bienes y servicios lo que podría comprometer aún más esta disponibilidad (Pathirana *et al.*, 2014).



Figura 1.1. Servicios ecosistémicos. Tomada y adaptada de: Piret Vacht *et al.*, 2019.

Estos servicios ecosistémicos los podemos encontrar en uno de los corredores biológicos más significativos, ubicado en una región de gran importancia en la zona centro de la República Mexicana el cual es conocido como Bosque de Agua. Esta área abarca 241,893 hectáreas en el Estado de México, Morelos, y la CDMX, en coordenadas que van desde 18° 53' a 19° 49'N y desde 98° 53' a 99° 40'W sobre la Faja Volcánica Transmexicana (López-García y Navarro-Cerrillo, 2021).

El Bosque de Agua es una iniciativa que surge en respuesta a los desafíos derivados de la expansión urbana en la megalópolis, particularmente en la CDMX, Cuernavaca y Toluca, que afectan las áreas naturales. Su propósito es valorar la importancia de esta región y garantizar su integridad ecológica mediante un enfoque regional que busca asegurar la coexistencia armoniosa de la naturaleza y la sociedad. Es relevante destacar que el Bosque de Agua desempeña un papel crucial en el suministro de agua a estas ciudades, ya que es una de las principales zonas de captación y recarga de los mantos acuíferos (Hoth, 2022; García-Feria *et al.*, 2022).

Una de las áreas que integra el Bosque de Agua es el Suelo de Conservación (SC), el cual ocupa el 58% del territorio de la CDMX (SEDEMA, 2016). El SC representa un área periurbana en el que predomina los usos del suelo forestal, agrícola y pecuario (Leyva-Pablo *et al.*, 2015; CONABIO, 2016). El SC es de gran importancia para la CDMX ya que provee una diversidad de SE tales como la recarga de acuíferos, la retención y formación del suelo, el mantenimiento del ciclo del agua, la absorción de contaminantes, el mantenimiento de biodiversidad, el secuestro y el almacenaje de carbono, la regulación climática, la apreciación de zonas de conservación patrimonial y de bienes históricos, entre otros (Cram *et al.*, 2008). Sin embargo, el SC ha experimentado una importante transformación ambiental y social como resultado de la ocupación irregular del suelo, principalmente en zonas agrícolas y forestales. La expansión urbana y el crecimiento poblacional han disminuido significativamente la cubierta vegetal en el SC, provocando una reducción en la disponibilidad y flujo de SE (CONABIO, 2016; Cruz, 2000; Mollá, 2006; SEDEMA, 2016).

La CDMX presenta actualmente una dinámica económica, social y política muy compleja, interconectada y cambiante. Las presiones internas y externas hacen que zonas con alto valor ecológico dentro de la ciudad se encuentren inmersas en un proceso de crecimiento

desordenado con recurrentes problemas de uso del suelo, transporte y abastecimiento de agua (Sobrino, 2011). Debido a esta complejidad es necesario el estudio de la CDMX como un sistema socio-ecológico, es decir, un sistema complejo conformado por la interacción de elementos biofísicos, factores políticos y sociales (Torres-Lima y Cruz-Castillo, 2019). Así, este abordaje, permite tener una visión integral para determinar cómo dichas interacciones contribuyen a la dinámica del todo el sistema (Rathe, 2017). El estudio de la dinámica de los SE bajo el lente de los sistemas socio-ecológicos brinda la oportunidad de reconocer la intrincada relación entre la sociedad y el medio ambiente bajo diferentes escalas espaciales y temporales (Balvanera *et al.*, 2017), con la finalidad de contribuir a una gestión sostenible del territorio (Joaqui y Figueroa, 2014).

1.3. Secuestro y almacenamiento de carbono en ecosistemas terrestres

Los ecosistemas terrestres, los ecosistemas seminaturales, los sistemas agrícolas y las áreas peri-urbanas juegan un papel central en el ciclo biogeoquímico del carbono (Rojas-García *et al.*, 2017). El ciclo del carbono involucra todos aquellos procesos biológicos, físicos y químicos los cuales permiten el secuestro y el flujo del carbono a través de distintos reservorios o almacenes presentes en la litósfera, biósfera, hidrósfera, atmósfera y rizósfera (Martín-Chivelet, 2010). En la **figura 1.2** se muestra el ciclo global del carbono el cual implica una serie de interacciones entre distintos reservorios los cuales a través de los años se han visto impactados por las actividades antropogénicas (Ryan *et al.*, 2010). Principalmente a partir de la Revolución Industrial, los océanos han incrementado su absorción de CO₂ atmosférico debido a la influencia humana, ya que actividades como la descomposición de biomasa, la quema de combustibles fósiles y los cambios en el uso del suelo han alterado los flujos naturales entre los océanos, la atmósfera y la vegetación (Ryan *et al.*, 2010).

El secuestro y el almacenamiento de carbono en los ecosistemas terrestres se presenta cuando el CO₂ atmosférico es absorbido por las plantas mediante la fotosíntesis para posteriormente

ser almacenado en los distintos reservorios o almacenes que incluyen a la biomasa viva (e.j. tronco, ramas, hojas, flores, frutos, raíces), el detrito (hojarasca) y el suelo (Lorenz y Lal, 2010; Rojas-García *et al.*, 2017; Waring y Running, 2007). En términos generales, los ecosistemas terrestres albergan una cantidad significativa de carbono orgánico, principalmente en forma de biomasa aérea y materia orgánica en el suelo. Aunque la distribución del carbono orgánico en los distintos reservorios varía según el tipo de ecosistema, la composición vegetal y la latitud, en el caso de los suelos, puede representar hasta el 40% del carbono total ecosistémico (Dixon *et al.*, 1994; Vela Correa *et al.*, 2012).

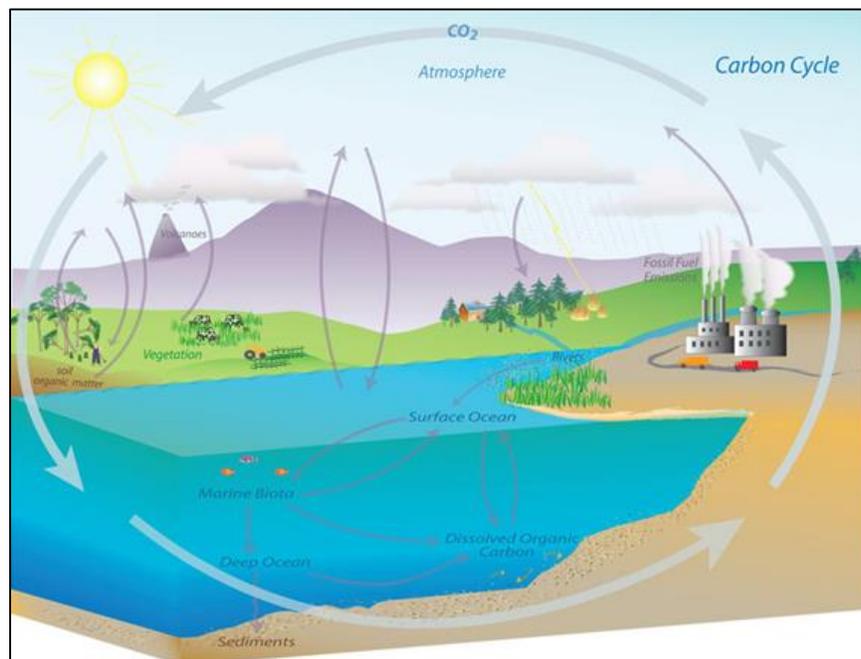


Figura 1.2. National Oceanic and Atmospheric Administration. (2019). Ciclo del carbono. <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/climate/carbon-cycle>

Aproximadamente el 50% del carbono total presente en los ecosistemas terrestres se encuentra en los suelos y la biomasa de los ecosistemas forestales, que incluyen diversos tipos de bosques, como los tropicales, templados y boreales, en contraste, las praderas retienen aproximadamente el 33% del carbono, mientras que los sistemas agrícolas albergan

alrededor del 17% del carbono, respectivamente (Gallardo y Merino, 2007). Aunque los ecosistemas forestales funcionan como sumideros de carbono también pueden fungir como fuentes importantes de carbono como resultado de la respiración, de los disturbios naturales y humanos (Archer, 2011; Miquelajauregui, 2013; Sil *et al.*, 2017). Así, la eficiencia de los ecosistemas terrestres para secuestrar y almacenar carbono es afectada por variaciones en las propiedades que lo limitan como son la composición vegetal, la tasa de crecimiento y mortalidad, la composición química del material biológico, el tipo de suelo, la topografía y el clima (Lorenz y Lal, 2010; Foley *et al.*, 2005).

El secuestro y el almacenamiento de carbono en los ecosistemas terrestres ocurre cuando las tasas de producción y acumulación de compuestos orgánicos de carbono y el tiempo de residencia de éstos en los diferentes reservorios aumenta con el tiempo (Lorenz y Lal, 2010). El tiempo de residencia (o tiempo de recambio) de los materiales orgánicos de carbono se refiere al tiempo medio que una molécula de carbono pasa en un reservorio específico. Así, los reservorios pueden actuar como sumideros o fuentes de carbono los cuales presentan tasas de intercambio pueden ir variando a través de escalas de tiempo cortas o muy prolongadas (Martín-Chivelet, 2010). Por ejemplo, los bosques tropicales secuestran una cantidad importante de carbono, mitad de ella almacenada en la vegetación (212 Gt C) y la otra en el suelo (216 Gt C) (IPCC, 2007; Stolpe y Fuentes, 2020). Las condiciones húmedas y cálidas que predominan en los bosques tropicales estimulan la descomposición del material orgánico, por lo que la tasa de residencia del carbono orgánico del suelo en estos ecosistemas es relativamente corta (e.g. 10 años; Trumbore, 1993). Además, los bosques boreales tienen la capacidad de almacenar 471 Gt C en el suelo y 88 Gt C en la vegetación. La alta acumulación de carbono en los suelos de los bosques boreales principalmente se debe a las lentas tasas de descomposición debido a la alta acidez de los suelos de tipo podzol y a las bajas temperaturas que hay en este tipo de ecosistemas (IPCC, 2007; Miquelajauregui, 2013).

El cambio de uso del suelo asociado a la urbanización, las actividades de manejo, los incendios forestales y los efectos del cambio climático pueden afectar el secuestro y el almacenamiento de carbono en los ecosistemas terrestres (Gorte, 2010). El monitoreo de los almacenes y flujos de carbono se lleva a cabo a través de la cuantificación de diversos

parámetros ecológicos. Entre estos se encuentran: la productividad primaria bruta (PPB), la productividad primaria neta (PPN), la productividad neta del ecosistema (PNE), el intercambio neto del ecosistema (INE) y la productividad neta del bioma (PNB; Boisvenue y Running, 2006). La cantidad total de energía fijada por las plantas mediante la fotosíntesis se conoce como PPB y se ha estimado globalmente en 120 Pg C/año (1 Pg [Petagramo]=10¹⁵ gramos) (Chapin *et al.*, 2011). Si a la PPB se le resta la energía consumida para el mantenimiento de las funciones vitales (respiración autotrófica y otros procesos celulares) obtenemos la PPN (IPCC, 2007) la cual se ha estimado globalmente en 60 Pg C/año (Jaramillo, 2004). La PPN mide entonces la entrada y la asimilación de CO₂ en la biósfera a través de la fotosíntesis y representa la velocidad o tasa de almacenamiento de carbono en las plantas. Cuando la PPN es positiva la biomasa de las plantas del ecosistema aumenta. La PNE es la acumulación de carbono a nivel del ecosistema y se obtiene al tomar en cuenta las pérdidas de carbono derivadas de la descomposición de la materia orgánica por los organismos heterotróficos del suelo. La descomposición es un proceso básico por el cual las moléculas biológicas complejas (e.g. celulosa, lignina, proteínas, ceras) que componen los restos vegetales son fragmentadas en compuestos más sencillos gracias a la acción de distintos grupos de microorganismos y de la fauna edáfica (e.g. micro, meso y macrofauna). El material orgánico del suelo (MOS) también sufre desintegraciones mecánicas y transporte de material a través de los diferentes horizontes edáficos bajo acción directa de las precipitaciones, el viento, los cambios de temperatura, la biota edáfica y las actividades humanas (e.g. uso de maquinaria silvícola). El INE es una medida de la cantidad neta de carbono que entra y sale del ecosistema. El INE toma en cuenta todos los intercambios verticales de flujos de carbono resultado de la fotosíntesis, la respiración autotrófica y heterotrófica, así como flujos derivados de los disturbios naturales como lo son los incendios forestales que fácilmente remueven una gran cantidad de carbono. Finalmente, la PNB el cual está constituido por diversos ecosistemas con condiciones climáticas, geográficas y ecológicas similares, puede calcularse sumando la PPN de todos los ecosistemas dentro de una región o un paisaje específicos y restando las pérdidas causadas por los disturbios como el fuego, la cosecha, los vientos, entre otros. La PNB es tal vez la forma más apropiada de analizar cambios en el secuestro de carbono a grandes escalas temporales como espaciales (Boisvenue y Running, 2006).

La investigación científica no se ha limitado solamente a cuantificar la productividad forestal, sino también a tratar de entender sus fluctuaciones temporales, su distribución y variación espacial y los factores que controlan y regulan los patrones de productividad. En las últimas décadas, el gran avance tecnológico manifestado en el poder de los ordenadores y el importante desarrollo conceptual relacionado con el entendimiento de los procesos y las variables involucrados en el ciclo del carbono, han permitido la evolución de modelos de simulación cada vez más sofisticados. En este sentido, el desarrollo de los modelos ecológicos de simulación como herramientas y técnicas de investigación, ha brindado la oportunidad de generar conocimiento científico robusto a través de la formulación y confrontación de hipótesis científicas.

1.4. Modelos de crecimiento urbano y técnicas de monitoreo de la dinámica de carbono en ecosistemas terrestres

Actualmente existe una amplia variedad de modelos dedicados al estudio del crecimiento urbano, abordando aspectos como las actividades socioeconómicas y el uso del suelo. Entre estos se destacan los modelos de autómatas celulares (CA), que se fundamentan en reglas y en probabilidades (Li and Gong, 2016). Ejemplos de modelos basados en reglas incluyen SLEUTH, Fuzzy CA, DUEM, ABM CA, entre otros (Li and Gong, 2016).

A continuación, se presentan algunos modelos representativos que emplean diversas técnicas para el modelado de crecimiento urbano.

SLEUTH

SLEUTH, es un modelo desarrollado por Clarke y colaboradores (1997), es un modelo de código abierto basado en CA que forma parte del Proyecto Gigalopolis y puede descargarse desde la página del National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA, 2023). El modelo utiliza varias capas para su calibración y modelado, las cuales son las mismas iniciales que lleva el nombre del modelo: Slope (pendiente), Land Use (uso de suelo), Exclusion (zonas de exclusión), Urban (urbanización histórica), Transportation (red de

calles) y Hillshade (sombra). SLEUHT se apoya en dos modelos: el modelado de crecimiento urbano (UGM) y modelado del uso del suelo mediante Deltatron (Candau *et al.*, 2000). Este modelo basado en reglas incorpora cuatro reglas fundamentales: crecimiento espontáneo, crecimiento de nuevos centros, crecimiento adyacente y la regla de crecimiento influenciado por la carretera (Dietzel y Clarke, 2007). Estas reglas están vinculadas a cinco coeficientes esenciales: coeficiente de dispersión, Coeficiente de reproducción, coeficiente de propagación, coeficiente de resistencia a la pendiente y coeficiente gravitatorio de caminos (Dietzel y Clarke, 2007).

Dinamica EGO

Dinamica EGO es una plataforma gratuita para el modelado medioambiental que se enfoca en modelos espacio-temporales y analíticos. Este modelo se fundamenta en transiciones múltiples, iteraciones anidadas, retroalimentación dinámica, procesos de bifurcación y unión de canales de ejecución (Soares-Filho *et al.*, 2013). Con una resolución variable y siendo espacialmente explícito, Dinámica EGO es un modelo estadístico que permite el análisis y la simulación de fenómenos a diversas escalas de tiempo (Dinamica EGO, 2022). La versatilidad de Dinámica EGO se manifiesta en su capacidad para modelar variables dinámicas y estáticas, abarcando aspectos climáticos, económicos, demográficos e infraestructurales que impactan el crecimiento urbano de un territorio (Ferreira *et al.*, 2019) Sus ventajas incluyen un alto rendimiento incluso en equipos menos potentes, así como la funcionalidad de álgebra de mapas, facilitando la modelación de sistemas socioeconómicos y ambientales complejos. Además, Dinámica EGO ofrece la capacidad de extraer información directamente de imágenes satelitales mediante el uso de álgebra de mapas, y permite la integración de los lenguajes de programación R y Python para análisis avanzados (Dinámica EGO, 2022).

GeoSOS

El sistema de optimización y simulación geográfica (GeoSOS) presenta una fundamentación en CA, modelos basados en agentes (ABM) y en modelos de inteligencia de enjambre (SIM),

este modelo realiza simulaciones de diversos procesos geográficos como el crecimiento urbano, cambio en el uso del suelo, y la zonificación de áreas naturales (GeoSOS, 2021). Entre los CA en los que se sustenta se encuentran el logistic-CA, el modelo de aprendizaje automático basado en redes neuronales artificiales (ANN-CA), la evaluación multicriterio (MCE-CA), y Decision-tree-CA. Cabe destacar que la integración de CA con sistemas multiagente (MAS) amplía la capacidad del modelo para considerar factores sociales para simulaciones más complejas proporcionando así una perspectiva más completa y detallada a las modelaciones geográficas (GeoSOS, 2021).

UrbanSim

UrbanSim es un modelo de microsimulación utilizado para la planificación del uso del suelo, el transporte, el desarrollo metropolitano y la simulación urbana (UrbanSim, 2023; Waddell, 2002). Este enfoque de modelado se basa en la integración de un almacén de datos que recopila una diversidad de información como archivos de parcelas de oficinas de tasadores fiscales, datos comerciales provenientes de fuentes como la base de datos del seguro de desempleo estatal, datos censales, superposiciones de SIG que representan límites ambientales, políticos y de planificación, y una cuadrícula de ubicaciones. La combinación de estos datos proporciona una representación completa del entorno urbano, permitiendo que investigadores y planificadores tomen decisiones informadas (Waddell, 2002). En contraste con los modelos tradicionales que se centran en grandes distritos geográficos y soluciones de equilibrio transversales, el diseño de UrbanSim adopta un enfoque desagregado, que anticipa cambios en pequeños intervalos de tiempo. Esta característica distintiva lo consolida como una herramienta valiosa en la planificación del uso del suelo, el transporte, el desarrollo metropolitano y la simulación urbana (Waddell, 2002).

El uso de modelos computacionales para simular la dinámica del carbono indirectamente permite entender la dinámica del carbono a diferentes escalas, además, han cobrado mayor importancia en las últimas décadas para entender como algunos fenómenos como el cambio climático y las actividades antropogénicas afectan el ciclo del carbono (Fischer *et al.*, 2016). Para este estudio se utilizó el modelo InVEST; sin embargo, existen otros modelos para modelar la dinámica del carbono orgánico en ecosistemas forestales como CENTURY, CBM-CFS3 y LANDIS (Stolpe y Fuentes, 2020; Miquelajauregui, 2013).

Modelo CENTURY

El modelo CENTURY es una herramienta enfocada en el estudio y el análisis de la materia orgánica en el suelo a nivel de ecosistema. Este modelo se basa en el uso de ecuaciones cinéticas de primer orden en donde se determina el carbono orgánico del suelo (COS) de acuerdo con el tipo de manejo (Paz *et al.*, 2016). El modelo también incluye el ciclo del fósforo, azufre y nitrógeno, los cuales pueden ser simulados de manera superficial, en suelos y plantas. Debido a la factibilidad con la que pueden ser obtenidos los datos de entrada se puede aplicar a diferentes ecosistemas terrestres como las sabanas, los sistemas agrícolas, las estepas, y los bosques (Parton *et al.*, 1992; Stolpe y Fuentes, 2020).

Como parte de los datos de entrada que deben de ingresarse en el modelo y de acuerdo con los objetivos, se utilizan parámetros del sitio de estudio como precipitación, temperatura, fijación biológica, contenido de azufre, nitrógeno, fósforo, lignina y pH; además se pueden incluir datos sobre el uso del suelo tales como tipo de manejo (riego), rotación de cultivos, tipo de labranza, fertilización, fenología y pastoreo. Asimismo, se puede especificar información del sitio como la densidad aparente, la capacidad de campo y la marchitez aparente, que puede ser obtenida por medio de medidas en el terreno o por datos provenientes de fuentes bibliográficas (Stolpe y Fuentes, 2020).

La calibración del modelo CENTURY permite conocer la cantidad de COS secuestrado, dependiendo del uso del suelo; por ello, es necesario conocer la trayectoria histórica sobre el tipo de coberturas (Stolpe y Fuentes, 2020). El modelo se calibra y valida con los valores de COS medidos en campo y los obtenidos en la literatura. Para el proceso de calibración se requiere obtener la producción bruta de los cultivos o de la biomasa forestal hasta que el reservorio del COS simulado por el modelo se aproxime a la cantidad de COS medido (Bortolon *et al.*, 2012). Después de haber realizado dicho proceso se pueden utilizar diferentes clases del suelo con escenarios de manejo los cuales reflejan el porcentaje de las pérdidas de COS en el suelo por un periodo largo de tiempo (Bortolon *et al.*, 2012).

Modelo de carbono CBM-CFS3

El modelo de balance de carbono del Sector Forestal Canadiense, versión 3 (CBM-CFS3 por sus siglas en inglés) es utilizado por el servicio forestal canadiense. El modelo originalmente fue diseñado para realizar mediciones de carbono en bosques canadienses pero debido a su versatilidad puede ser utilizado en otros países. Este modelo permite realizar mediciones sobre la emisión y la remoción de gases de efecto invernadero en ecosistemas forestales (**Figura 1.3**). Se basa en los requerimientos (e.g. hojarasca, raíces, datos de clima, entre otros) de la estimación de la dinámica de los flujos de carbono establecidos por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC; Kull *et al.*, 2019; Kurz *et al.*, 2016).

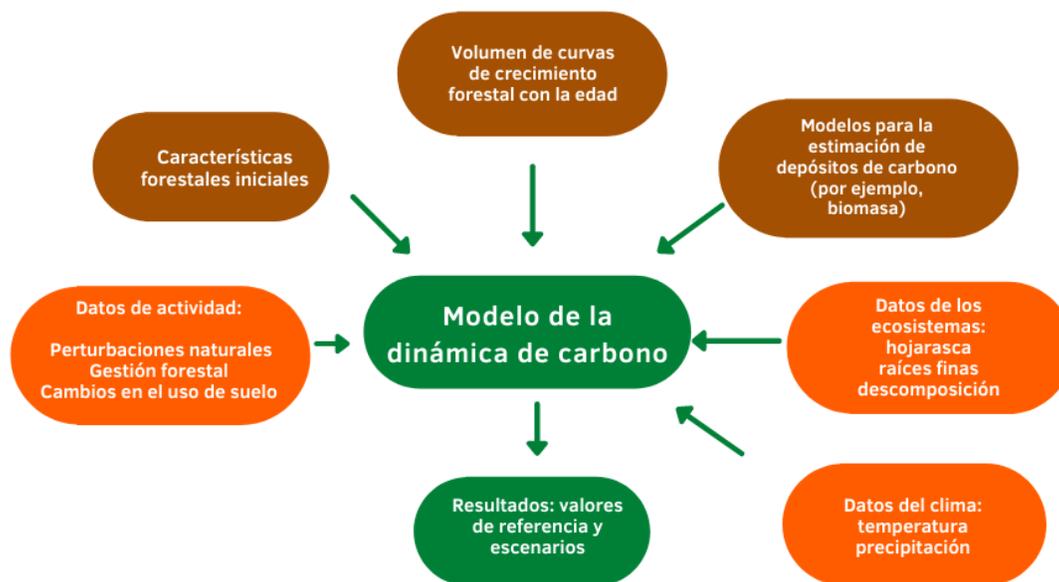


Figura 1.3. Datos de entrada del modelo de balance de carbono del sector forestal canadiense CBM-CFS3. Tomado y adaptado de Kurz *et al.*, 2016.

El modelo CBM-CFS3 es una herramienta para saber cómo los ecosistemas responden a fenómenos como el cambio climático y perturbaciones naturales o por el manejo lo cual permite evaluar los posibles efectos derivados de la aplicación de escenarios de manejo alternativos y con ello poder contribuir a mejorarlos (Kull *et al.*, 2019). El modelo permite ingresar información de diversas fuentes como mediciones empíricas de inventarios forestales, tales como crecimiento y producción de los bosques, materia orgánica inerte y

carbono en suelo. Además, los usuarios pueden utilizar su propia información sobre el flujo de carbono en el manejo forestal a escala de rodal en donde el modelo simula la dinámica del carbono (crecimiento, la descomposición de hojarasca, y manejo) (Kull *et al.*, 2019; Kurz *et al.*, 2016). El modelo permite calcular los cambios que ocurrieron en el pasado (monitoreo) así como proyectar escenarios los cuales permiten realizar análisis y evaluaciones de los impactos en la gestión forestal (Kurz *et al.*, 2016).

Modelo LANDIS

El modelo de paisaje forestal espacialmente dinámico (LANDIS) se desarrolló en la década de 1990 y su propósito inicial fue examinar cuestiones sobre la dinámica ecológica y las consecuencias de la gestión forestal (Mladenoff, 2004). El modelo se ha modificado agregando nuevas funciones y ahora lleva el nombre de LANDIS II el cual permite simular el cambio en los paisajes forestales, la sucesión forestal, el cambio climático, la dispersión de semillas y las perturbaciones como incendios, viento, plagas y aprovechamiento del ecosistema (Pardos, 2016).

De acuerdo con Pardos (2016) el modelo permite simular escenarios de clima con la finalidad de estimar la influencia del cambio climático en la distribución de especies arbóreas, así como en su productividad; las predicciones ante cambio climático se pueden realizar en especies arbóreas bajo diferentes condiciones climáticas. LANDIS permite realizar simulaciones sobre pinares para conocer los efectos del fuego y el cambio climático sobre la disponibilidad de nitrógeno mineral y la productividad forestal (Pardos, 2016).

Modelo InVEST

La herramienta computacional InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs) es un software diseñado por Natural Capital Project (NatCap) en el año 2006 (NatCap, 2020). Este paquete computacional está conformado por un conjunto de modelos de código abierto y se basa en la utilización de información cartográfica la cual se toma como

base para la modelación de escenarios y la valoración de bienes y servicios ecosistémicos (NatCap, 2020).

Natural Capital Project (NatCap) es una organización conformada por la Universidad de Stanford, la Universidad de Minnesota, la Academia de Ciencias de China y el Centro de Resiliencia de Estocolmo, las cuales cuentan con el apoyo de diversas organizaciones en particular The Nature Conservancy y World Wildlife Fund (NatCap, 2020).

Se entiende como capital natural a toda una serie de componentes vivos y no vivos los cuales conforman a los ecosistemas que contribuyen en la provisión de servicios ecosistémicos. Este conjunto de ecosistemas produce un flujo de servicios los cuales son de vital importancia para la humanidad generando servicios y beneficios, tales como producción de bienes (alimentos), condiciones de satisfacción vital (actividades recreativas), conservación de recursos (por ejemplo, diversidad genética para uso futuro y procesos de soporte vital) (Sharp *et al.*, 2019).

Los cambios que se dan a través del tiempo en los ecosistemas son cuantificados y valorados a través de las herramientas que provee el software InVEST. De acuerdo con lo anterior se puede cuantificar el impacto de los cambios en el agua o la tierra a través del cambio en los niveles de producción de los servicios ecosistémicos (Sharp *et al.*, 2019). Asimismo, el conjunto de modelos para cuantificar, mapear y valorar los beneficios proporcionados principalmente por los sistemas acuáticos, terrestres y marinos, se agrupan de la siguiente manera: servicios de apoyo, herramientas de apoyo, herramientas para facilitar los análisis de servicios de los ecosistemas y servicios finales, dentro de esta última categoría se encuentra clasificado el almacenamiento y secuestro de carbono (Sharp *et al.*, 2019).

1.5. Dinámica del carbono en el Suelo de Conservación de la Ciudad de México

El SC es un área peri-urbana que funge como sumidero de carbono orgánico. De acuerdo con los datos provenientes del Atlas Geográfico Del Suelo de Conservación del Distrito Federal (2012), la cubierta vegetal del SC tiene un volumen de almacenamiento de 2.5 millones de toneladas de carbono en toda la superficie relacionada con el reservorio aéreo, siendo los

bosques de *Abies religiosa* y *Pinus* spp los principales sumideros reportados al año 2012. El carbono en el suelo de los bosques de *Abies religiosa*, *Pinus* spp y *Cupressus* spp almacenan una mayor cantidad de carbono, aproximadamente de 100 a 150 MgC/ha (Vela-correa *et al.*, 2012). En comparación con lo reportado en piedemontes inferiores y laderas inferiores en las que se puede encontrar una vegetación muy diversa entre la que destacan los bosques de pinos, algunas de las especies son *Pinus montezumae*, *P. ayacahuite*, *P. patula* también se destaca el matorral compuesto por *Yucca* spp., *Senecio praecox*, y una gran variedad de especies de *Opuntia* spp., la capacidad de almacenamiento de carbono corresponde aproximadamente de 50 a 100 MgC/ha en los ecosistemas forestales de acuerdo a las especies antes mencionadas (Vela-correa *et al.*, 2012). La cantidad de carbono almacenado en los distintos tipos de cubiertas vegetales varían en función de factores como la temperatura y precipitación, la densidad arbórea, la edad de los individuos, la cantidad de nutrientes disponibles, y el régimen de disturbios naturales (incendios, plagas, viento), así como las actividades humanas incluida la urbanización (Galeana-Pizaña *et al.*, 2013).

El avance del área urbana en el SC tiene importantes impactos sobre el secuestro y la captura de carbono orgánico en los distintos reservorios (PAOT, 2010). Se estima que cerca de 1,540 ha dentro de las Reservas Ecológicas Comunitarias de Topilejo en Tlalpan y Bienes Comunales de Milpa Alta presentan muy alta vulnerabilidad a los cambios de cobertura asociados a la urbanización (PAOT, 2012). Aproximadamente el 20% de las emisiones de CO₂ a la atmósfera provienen de la degradación y pérdida de los ecosistemas forestales (Russo, 2009). Por lo cual, la reducción de dichas emisiones mediante el manejo sustentable de las áreas peri-urbanas en la CDMX es central en materia de mitigación del cambio climático (Russo, 2009; SEDEMA, 2014).

Las cubiertas vegetales relacionadas con la agricultura que aún prevalecen proveen productos como: maíz, haba, avena, frijol, nopal, cebolla, y flores de temporada (Leyva-Pablo *et al.*, 2015). En zonas como Milpa Alta existen sitios con un alto nivel de carbono por la baja perturbación del suelo, pero en otras zonas, el secuestro de carbono es afectado por la fertilización nitrogenada y por el tiempo de permanencia de los residuos en el suelo (Leyva-Pablo *et al.*, 2015).

1.6. Justificación

La urbanización es uno de los agentes de cambio más importantes para la sostenibilidad del planeta. Dada la magnitud de sus impactos, el desarrollo urbano sostenible ha sido incluido como uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 11) de la Organización de las Naciones Unidas. Este ODS reconoce la importancia de los centros urbanos como motores potenciales de transformación a través de procesos de inclusión y participación ciudadana. Una de las metas de este ODS es el proporcionar acceso universal a zonas verdes mediante el desarrollo e implementación de instrumentos de política pública.

El SC de la CDMX se encuentra protegido por la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (Toscana, 2021), la cual prohíbe el desarrollo de ciertas actividades como la urbanización. Sin embargo, el crecimiento urbano en el SC derivado de políticas públicas laxas pone en peligro la integridad de esta área peri-urbana de gran valor ecológico. En particular, el cambio de cobertura asociado a la urbanización en el SC tiene el potencial de alterar los ciclos biogeoquímicos, incluyendo el ciclo del carbono, con importantes repercusiones sobre la disponibilidad y flujo de este SE. El secuestro y el almacenamiento de carbono representan un servicio ecosistémico con múltiples beneficios (MEA, 2005; Sil *et al.*, 2017), incluyendo, la mitigación al cambio climático (Inostroza *et al.*, 2020; Sil *et al.*, 2017). La pérdida de cobertura vegetal asociado al crecimiento urbano puede provocar que parte de este carbono orgánico almacenado sea liberado a la atmósfera (FAO, 2002). Por lo tanto, es indispensable contar con estimaciones sobre el efecto del crecimiento urbano sobre el secuestro y el almacenamiento de carbono orgánico vinculado directamente con el diseño de políticas públicas. De manera particular, es necesario conocer la magnitud de los impactos asociados a distintas trayectorias de crecimiento urbano para identificar y priorizar áreas dentro del SC con alto valor ambiental.

Por lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar los impactos del cambio de uso del suelo resultado de la urbanización sobre el secuestro y el almacenamiento de carbono bajo distintos escenarios de crecimiento urbano en el SC de la CDMX. La construcción de escenarios para los años 2030, 2040, 2050 y 2060, se realizaron con base en el modelo de simulación de crecimiento urbano SLEUTH (Slope, Land Use, Exclusion, Urban,

Transportation and Hillshade). Los resultados obtenidos del modelo SLEUTH posteriormente se incorporaron como entradas del modelo InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs) el cual permite valorar los cambios en los servicios ecosistémicos de un territorio. Para dicho modelo también se utilizaron los diferentes tipos de vegetación como entrada, los valores de la cantidad de carbono que se almacena en cada tipo de vegetación presentes en el SC para estimar el contenido de carbono orgánico almacenado en cuatro reservorios: biomasa aérea, biomasa subterránea viva, suelo y materia orgánica muerta. Los resultados obtenidos de estos dos modelos se conjuntaron en uno solo para analizar los posibles impactos de la urbanización en el secuestro y el almacenamiento de carbono en la CDMX.

1.7. Objetivos

Objetivo general:

Evaluar el impacto del crecimiento urbano sobre el secuestro y el almacenamiento de carbono orgánico en el Suelo de Conservación de la Ciudad de México.

Objetivos Particulares:

1. Construir tres escenarios alternativos de crecimiento urbano futuros para el Suelo de Conservación de la Ciudad de México.
2. Evaluar el impacto de los tres escenarios de crecimiento urbano sobre el secuestro y el almacenamiento de carbono orgánico para los años 2030, 2040, 2050 y 2060.
3. Identificar los tipos de cobertura en el Suelo de Conservación con los mayores cambios en el secuestro y el almacenamiento de carbono bajo los tres escenarios de crecimiento urbano.

Capítulo 2

Métodos

Este proyecto se sustenta en dos enfoques metodológicos: los sistemas socio-ecológicos acoplados (Eakin *et al.*, 2017) y el análisis de la modelación exploratoria (EMA por sus siglas en inglés; Bankes, 1993). Las técnicas de EMA, permiten explorar el comportamiento de un sistema complejo e incierto mediante la construcción de escenarios que capturen el efecto de las distintas suposiciones acerca del funcionamiento del sistema, y las principales incertidumbres asociadas sobre los elementos y funciones de los sistemas socio-ecológicos (Groves y Lampert, 2007). Estas herramientas computacionales se usaron para analizar el efecto del crecimiento urbano sobre la dinámica del carbono forestal. La metodología aquí propuesta comprende dos etapas: 1) la construcción de escenarios alternativos de crecimiento urbano futuros y 2) la modelación de la dinámica del carbono forestal con InVEST bajo los escenarios de crecimiento urbano.

2.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde al Suelo de Conservación (SC) de la Ciudad de México (CDMX). De acuerdo con el nuevo Proyecto del Plan General de Desarrollo de la CDMX elaborado a cargo del Instituto de Planeación Democrática y Prospectiva (IPDP, 2023) el SC ocupa el 58% del territorio total de la CDMX, con una extensión de 86,774 ha, el 42% restante se encuentra ocupado por el Suelo Urbano (SU) con una extensión de 62, 655 ha (**Figura 2.1**). De acuerdo con la SEDEMA (2023), el SC se distribuye en nueve alcaldías de la CDMX: Álvaro Obregón (3.8%) Cuajimalpa de Morelos (5.9%), Gustavo A. Madero

(1.2%), Iztapalapa (1.2%), Milpa Alta (32.8%), Tláhuac (7.2%), Xochimilco (9.9%), Tlalpan (29.3%) y Magdalena Contreras (5.4%).

La CDMX se ubica en la Cuenca de México, una cuenca natural endorreica ubicada en una llanura lacustre, y se extiende entre las latitudes 19° 03´ y 19° 36´ al norte, y las longitudes 98° 57´ y 99° 22´ al oeste. La CDMX presenta una amplia variabilidad de altitudes, que va desde los 2,240 m. s. n. m. en sus áreas más planas hasta superar los 3,930 m. s. n. m. en zonas elevadas (PAOT, 1999). Además, la alcaldía Milpa Alta registra una altitud promedio de 2,420 m. s. n. m. (PDDU Milpa Alta, 2011). En Magdalena Contreras, la altitud promedio en zonas urbanas es de 2,500 m. s. n. m. mientras que, en áreas de SC, alcanza los 3,700 m. s. n. m. (PDDU Magdalena Contreras, 2005). Álvaro Obregón cuenta con notables elevaciones, como el Cerro del Triángulo, que alcanza los 3,820 m. s. n. m. el Cerro de San Miguel con 3,780 m. s. n. m., el Cerro Temamatla a 3,500 m. s. n. m., y El Ocotal a 3,450 m. s. n. m. (PDDU Álvaro Obregón, 2011). Más del 48% del territorio del SC se encuentra por encima de los 3,000 m. s. n. m. con una altitud promedio de 2,882 m. s. n. m. (PAOT, 2012). La CDMX limita al norte, este y oeste con el Estado de México, y al sur con el Estado de Morelos (INAFED, 2010). Su superficie abarca 148,179 hectáreas, y la población de la Ciudad asciende a casi 9.3 millones de habitantes, mientras que, junto con su zona conurbada, la población total supera los 22 millones (INEGI, 2021).

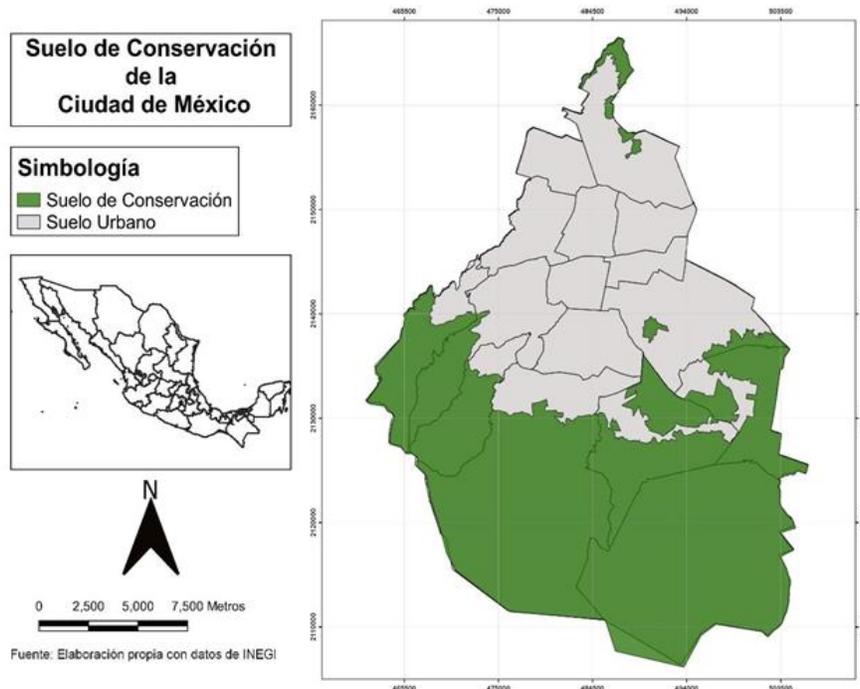


Figura 2.1. Localización y extensión del Suelo de Conservación de la Ciudad de México. Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2016).

En relación con su geomorfología, el paisaje de la CDMX está caracterizado por dos geoformas fundamentales. Por un lado, las montañas son de origen volcánico, mientras que la planicie en su porción baja, debe su formación, a procesos erosivos y acumulativos (IIUNAM, 2014). El subsuelo, en su gran mayoría, está conformado por rocas y materiales permeables. Asimismo, el subsuelo presenta una intercalación de cenizas tobas y lavas con materiales granulares provenientes de los ríos y arroyos lo que propició una cubierta de arcillas lacustres (PAOT, 2012). En cuanto a su geología, la CDMX se localiza en el Eje Neovolcánico o Faja Volcánica Transmexicana. Hacia el norte de la CDMX se ubica la Sierra de Guadalupe, hacia el sur se ubican las sierras del corredor Ajusco-Chichinautzin con una altitud de 3,900 m. s. n. m., hacia el oriente limita con la Sierra Nevada la cual está conformada por los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, y en el oeste con la Sierra de Las Cruces. En cuanto a la hidrología, los ríos y arroyos más importantes de la CDMX se encuentran en la zona poniente, destacando los ríos Magdalena, Remedios, Cuautitlán y la Piedad (SEDEMA, 2015).

2.2. El modelo de crecimiento urbano SLEUTH

El desarrollo de herramientas exploratorias dirigidas al entendimiento de los posibles impactos del crecimiento urbano ha demostrado ser fundamental para la toma de decisiones (Avalos Jiménez *et al.*, 2019). Uno de los modelos más utilizados para modelar el crecimiento urbano es el modelo SLEUTH (González y Rojas, 2013; Clarke *et al.*, 1997). El modelo SLEUTH fue creado en 1997 por Keith C. Clarke en la Universidad de Santa Bárbara, California (Clarke, 1997). SLEUTH es un modelo que simula el crecimiento urbano a partir de autómatas celulares; es decir, que el estado de una celda en el futuro, depende del estado de las celdas vecinas en el pasado. El modelo deriva su nombre de las capas de información geográficas de entrada para modelar el crecimiento urbano: Slope (pendiente), Land-Use/Land cover (uso del suelo), Excluded zones (zonas de exclusión), Urban areas (urbanización histórica), Transportation network (red de vías terrestres, caminos y carreteras) y Hillshade (sombra). Todos los insumos geoespaciales deben tener la misma resolución, proyección geográfica, extensión y deben estar en formato GIF (graphic interchange format).

En este proyecto se utilizó el modelo SLEUTH 3.0 Beta (Clarke, 1997) para simular el crecimiento urbano de la CDMX y la zona conurbada. Los datos de entrada incluyeron el porcentaje de la pendiente, las zonas de exclusión, la urbanización histórica, una capa de sombreado del relieve, y la red de vías terrestres, caminos y carreteras. Las capas de pendiente y de sombreado se generaron a partir del modelo digital de elevación (DEM) con resolución de 30 metros del INEGI (2012); las capas de urbanización históricas y de vías terrestres se obtuvieron de los mapas de uso de suelo y vegetación del INEGI para las décadas de 1980, 1990, 2000 y 2014 a escala 1: 250,000, de las series I, II, III, VI (continuo nacional) (**Tabla 2.1**).

Una de las capacidades de SLEUTH es que permite que el usuario modifique la capa de exclusión para incluir distintos niveles de restricción en el proceso de crecimiento urbano, es decir, la capa de exclusión establece las condiciones respecto a la libertad que tiene la zona urbana de expandirse, por ejemplo, en áreas naturales protegidas o cuerpos de agua. De esta

forma, el modelo SLEUTH permite generar escenarios alternativos de crecimiento urbano en función de distintos supuestos y premisas relacionadas al uso del territorio.

Tabla 2.1. Insumos requeridos para la inicialización del modelo SLEUTH.

Capas requeridas por el modelo SLEUTH	Capas utilizadas	Insumos	Descripción
Urbanización	4	Capas históricas obtenidas de los mapas de uso de suelo y vegetación del INEGI para los años de 1980, 1990, 2000 y 2014.	Capa de urbanización clasificada como: 1 urbanizado y 0 no urbanizado.
Vías de transporte	4	Capas de vías terrestres obtenidas de los mapas de uso de suelo y vegetación del INEGI para los años de 1980, 1990, 2000 y 2014.	Capa de vías de comunicación en formato <i>Raster</i> .
Pendiente	1	Capa obtenida del modelo digital de elevación (MDE) a 30 m del INEGI.	Valores de la pendiente media dados en porcentaje.
Exclusión	1	Capa generada por el usuario a partir de: 1) Áreas naturales protegidas municipales y estatales (CONABIO), y federales (CONANP); 2) Cuerpos de agua, humedales y red de canales (CONABIO e INEGI); 3) Zonas federales (digitalizado y generado por el usuario).	Restricciones de crecimiento urbano.
Sombreado	1	Capa obtenida del modelo digital de elevación (MDE) a 30 m del INEGI.	Capa de sombras para visualización.

El crecimiento urbano para la CDMX y zona conurbada se simuló a partir de la obtención de los valores de cinco parámetros que mejor se ajustan al área de estudio los cuales se obtienen por medio de la calibración del modelo. Estos parámetros son, de acuerdo con Clarke *et al.* (1997), el de dispersión, reproducción, propagación, pendiente e influencia o gravitatorio de caminos. El parámetro de dispersión determina la dispersión general de la cuadrícula, e indica el movimiento hacia el exterior de los nuevos asentamientos en función de las vías terrestres. El parámetro de reproducción determina la probabilidad de separación de un asentamiento recién generado y el comienzo de un nuevo ciclo de crecimiento. El parámetro de

propagación determina la probabilidad de que se genere crecimiento urbano hacia el exterior a partir de los asentamientos existentes. El parámetro de pendiente representa la probabilidad de que se den asentamientos urbanos en función del porcentaje de la pendiente. Si el porcentaje de la pendiente es alto existe una menor probabilidad de ser urbanizado y, de manera contraria, si este valor es bajo existe una mayor probabilidad de ser urbanizado. Finalmente, el parámetro influencia o gravitatorio de caminos determina el crecimiento influenciado por carreteras. Estos parámetros se utilizaron posteriormente para asignar las reglas de crecimiento (e.g. espontáneo, nuevo centro de dispersión, de borde y por influencia de caminos) que determinan el desarrollo del sistema (Corona, 2016).

Corona (2016), menciona que “el modelo SLEUTH urbaniza una celda de la siguiente manera: si una vía de transporte se encuentra dentro de un radio máximo (determinado por el parámetro de influencia) de una celda seleccionada (la probabilidad está dada por el coeficiente de reproducción), se identifica aquella más cercana al camino y se urbaniza temporalmente. Después, se lleva a cabo un desplazamiento al azar a lo largo del camino (el número de pasos es determinado por coeficiente de dispersión) en donde en cada paso se aplican las primeras tres reglas de crecimiento (crecimiento espontáneo, nuevo centro de dispersión y crecimiento de borde). Si se encuentra una celda que cumple con los parámetros para ser urbanizada, se “prende” y es considerada como un nuevo núcleo de propagación urbana. Si una o varias celdas vecinas de ésta (sobre el camino) son propensas a urbanización, se urbanizan (Clarke *et al.*, 1997)”.

Inicialmente, el modelo SLEUTH se compuso de dos modelos: el Modelo de Crecimiento Urbano de Clarke (UGM), que es un autómata celular, y el Modelo de Uso del Suelo (DLM) de Deltatron. El DLM se fundamenta en reglas de autómatas celulares que generan "deltatrones", también conocidos como "portadores de cambio" (Candau *et al.*, 2000). SLEUTH trabaja en un entorno organizado en forma de celdas, para lo cual requiere dos capas de uso del suelo, a partir de las cuales se establece una matriz de transición que regula el proceso de cambio de una clase a otra (Clarke, 2008). Es fundamental destacar que ambos autómatas celulares se ejecutan en secuencia, y la generación de celdas recién urbanizadas determina la frecuencia con la que se activa el código delatratron, en consecuencia, cuando el

crecimiento urbano se encuentra en un período de estancamiento, se reduce la presión para cambiar el uso del suelo; por otro lado, cuando se experimenta un rápido crecimiento urbano, se observa una mayor cantidad de transiciones entre diferentes clases de uso del suelo (Clarke, 2008).

De acuerdo con la descripción de Clarke (2008), se pueden identificar tres etapas fundamentales en la transición del modelo SLEUTH:

Inicio y agrupamiento

En esta fase se eligen ciertos píxeles como candidatos para un posible cambio en el uso del suelo. Se consideran dos nuevas clases como opciones y se utilizan las probabilidades de transición para generar un número aleatorio que determina si ocurre el cambio, basado en cuál de las nuevas clases se ajusta mejor a la pendiente promedio del píxel en cuestión. Además, este cambio potencial también se aplica a los píxeles cercanos a la celda modificada (**Figura 2.2**).

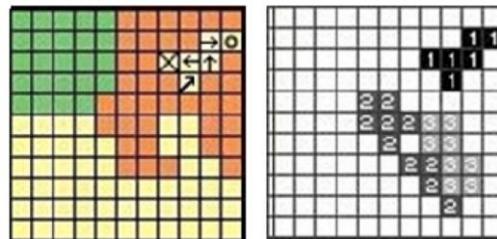


Figura 2.2. Proceso de Cambio Inicial y Agrupamiento. Tomada de Clarke, 2008.

Envejecimiento de los deltatrones

En cada ciclo, los deltatrones experimentan un proceso de envejecimiento en el que se agregan nuevos cambios a la cuadrícula y se eliminan aquellos que han envejecido demasiado (**Figura 2.3**).

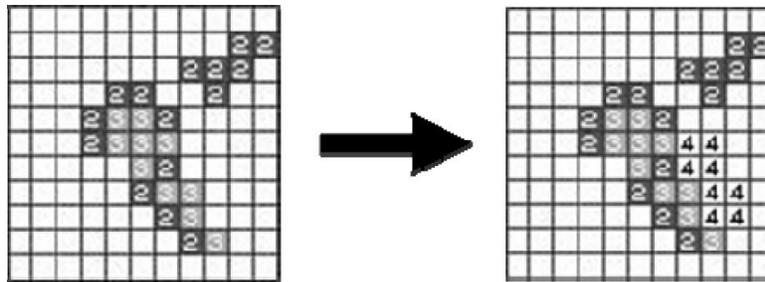


Figura 2.3. Proceso de envejecimiento y eliminación de deltatrones. Tomada de Clarke, 2008.

Propagación del cambio

Esta etapa implica la difusión de los deltatrones y su reintegración en la cuadrícula del mapa de uso del suelo. Estas etapas se realizan secuencialmente en el modelo en cada intervalo de tiempo. Además, se asume que la dinámica de cambio en la cobertura terrestre ha estado activa durante al menos tres ciclos de actualización, lo que da lugar a la existencia de un espacio deltatron envejecido (**Figura 2.4**).

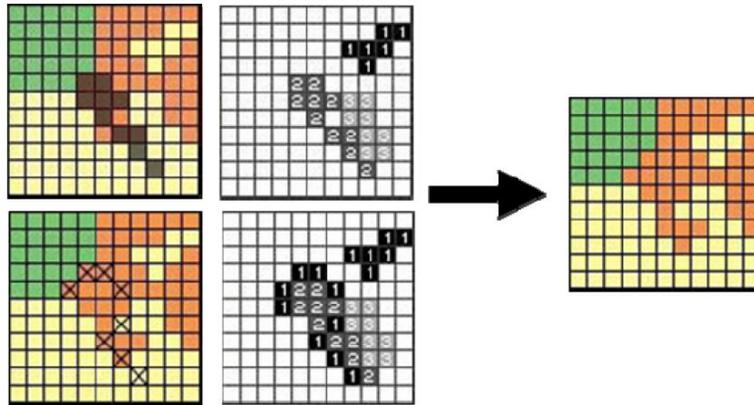


Figura 2.4. Propagación y reincorporación de deltatrones en el mapa de uso del suelo. Tomada de Clarke, 2008.

2.2.1. Calibración y validación del modelo SLEUTH

La calibración del modelo SLEUTH tiene como objetivo optimizar su rendimiento a través de iteraciones Monte Carlo para obtener un conjunto de valores para los parámetros de crecimiento (**Tabla 2.2**). Estos parámetros determinan las reglas de crecimiento y son fundamentales para generar proyecciones confiables y robustas mediante la optimización del modelo (González y Rojas, 2013; Linares y Clarke, 2018). El propósito de la calibración es encontrar los valores de los cinco parámetros que mejor expliquen el crecimiento urbano observado para el periodo de simulación seleccionado (Márquez, 2008).

De acuerdo a Jantz *et al.* (2004), el método de Monte Carlo de fuerza bruta se lleva a cabo en el entorno de modelado SLEUTH, donde el usuario especifica un rango de valores y el modelo itera utilizando cada combinación posible de parámetros. Para cada conjunto de parámetros se realiza una comparación entre el crecimiento simulado y el crecimiento real, utilizando diversas medidas de regresión por mínimos cuadrados como el número de píxeles urbanos, píxeles en el borde de los conglomerados urbanos, el número y tamaño de los conglomerados urbanos, y otras estadísticas de ajuste (Jantz *et al.*, 2004). SLEUTH realiza estos cálculos internamente y registra los resultados en un archivo que el usuario puede

examinar para evaluar el desempeño de diferentes conjuntos de parámetros (Jantz *et al.*, 2004).

El proceso de calibración comprende cuatro etapas: bruta, fina, final y de predicción (Corona, 2016). En cada etapa se prueban distintas combinaciones de los parámetros aplicando las reglas de crecimiento resultando en una capa de crecimiento que después se compara con la capa real a través de distintas métricas de desempeño. Los valores de los parámetros se seleccionan de la corrida que arroja el mayor ajuste (en función de la métrica de desempeño seleccionada) (Linares y Clarke, 2018).

Para capturar la heterogeneidad biofísica y socio-económica y sus efectos sobre la dinámica de crecimiento urbano en la CDMX y la zona conurbada, se definieron trece subregiones (J. Flores, pers.comm). Se utilizaron las capas geográficas de entrada de la Tabla 2.1 para llevar a cabo la calibración de manera independiente para cada subregión. La validación del modelo consistió en comparar el mapa de crecimiento simulado por el modelo SLEUTH con la capa de crecimiento urbano observado para el área de estudio (el último año de los datos, es decir el año 2014) a través de la métrica desarrollada por Dietzel y Clarke (2007) conocida como Métrica Óptima de SLEUTH (OSM, por sus siglas en inglés). Los parámetros que derivaron en un mejor ajuste fueron seleccionados para generar las proyecciones de crecimiento urbano descritos en la próxima sección. Es importante destacar que las subregiones 2,3,4,5,6,7,8 y 9 obtuvieron los mejores ajustes (**Tabla 2.2**) en función de la métrica OSM en comparación con las subregiones 1,10,12 con los ajustes más débiles. Las subregiones 11 y 13 se excluyeron de los análisis al no presentar urbanización en los años analizados.

Tabla 2.2: Parámetros del mejor ajuste y métrica de ajuste correspondientes al modelo SLEUTH.

Región	Parámetros					Optimun
	Reproducción	Dispersión	Pendiente	Propagación	Influencia	SLEUTH Metric
1	62	1	18	74	1	0.15
2	75	1	18	87	25	0.77
3	25	59	62	25	25	0.44
4	25	75	48	1	25	0.68
5	75	1	24	75	95	0.65
Subregión 6	61	1	6	62	100	0.66
7	43	6	50	71	100	0.58
8	18	1	18	72	75	0.56
9	25	64	40	58	16	0.62
10	100	81	30	25	1	0.24
12	81	2	18	75	99	0.34
Cuenca de México	4	1	54	99	36	0.20

2.2.2. Construcción de tres escenarios alternativos de crecimiento urbano

Con la finalidad de llevar a cabo una planificación territorial adecuada en respuesta al crecimiento urbano en la mayoría de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, (Tláhuac, Milpa Alta, Xochimilco y Tlalpan) es esencial utilizar herramientas que permitan simular de manera efectiva el comportamiento futuro de los procesos de urbanización. En este trabajo construimos tres escenarios alternativos de crecimiento urbano para la CDMX y la zona conurbada proyectados al 2030, 2040, 2050 y 2060. Operativamente, los escenarios alternativos de crecimiento urbano fueron contruidos modificando la capa de exclusión a través del establecimiento de distintos niveles de restricción. Dichas restricciones a la urbanización fueron asignadas manualmente a las distintas zonas de interés ecológico presentes en el área de estudio. Los niveles de restricción a la expansión urbana tomaron valores de entre 0 y 100, siendo el valor de 100 representativo de zonas con altas restricciones a la urbanización (ej. zonas de alto valor ecológico y áreas naturales protegidas) y el valor de 0 representativo de zonas sin restricciones a la urbanización (González y Rojas, 2013). De esta manera, cada escenario de crecimiento urbano es un experimento de simulación, el cual

responde, a su vez, a un conjunto de suposiciones y premisas asociadas a narrativas divergentes que subyacen la formulación de políticas públicas sobre el uso de territorio. Asimismo, la construcción de escenarios de crecimiento urbano permitió integrar la incertidumbre asociada a los elementos e interacciones del sistema socio-ecológico urbano como la toma de decisiones del uso del territorio, el incremento poblacional y el incremento en la demanda de servicios. Estos escenarios permitieron evaluar el impacto de las diferentes trayectorias futuras sobre el secuestro y el almacenamiento de carbono orgánico (Linares y Clarke, 2018; Jiménez *et al.*, 2021).

Los datos de entrada requieren una capa de exclusión, la cual permite realizar restricciones de crecimiento urbano y puede ser modificada por el usuario. Los valores de restricciones utilizados en el modelo SLEUTH fueron de 100 para zonas protegidas, 50 para las zonas como áreas naturales protegidas municipales, estatales y federales, y 0 para zonas factibles de crecimiento urbano (Corona *et al.*, 2015) (**Tabla 2.3**). La construcción de los tres escenarios consistió entonces en modificar, en la capa de exclusión, los valores de restricción asignados a distintas áreas presentes en el territorio.

El escenario tendencial (EST en adelante) plantea un futuro en que el desarrollo urbano en la CDMX prevalecerá durante las siguientes décadas. Este escenario parte de la premisa que las tendencias de crecimiento urbano permanecen sin cambios relativos a las tendencias actuales. Asimismo, vislumbra la implementación de políticas públicas que favorecen el desarrollo inmobiliario sobre la conservación de áreas de alto valor socioecológico. En este escenario, las áreas verdes, y las zonas federales recibieron las restricciones máximas a la urbanización con valores de exclusión de 100, mientras que las ANP's federales y estatales (ej. suelo de conservación), áreas naturales protegidas de la CDMX, recibieron valores de 50. A las ANP's en el EST se les asignó un valor de 50 debido a que muchas de ellas después de su decreto no se les asignó un plan de manejo hasta muchos años después, inclusive la gran mayoría de las ANP's en SC siguen sin tener un programa de manejo (Cortés, 2017), lo cual ha favorecido que se lleguen a perder este tipo de áreas, en algunos casos se ha llegado a perder hasta el 90% de toda una área decretada (Jujnovsky *et al.*, 2013).

El escenario con restricciones (ECR en adelante) parte del supuesto que el desarrollo urbano se fundamenta en políticas territoriales sostenibles. Este enfoque visualiza un futuro en el cual se restringen ciertas prácticas, como la expansión urbana en zonas de alto valor socioecológico. En este escenario, las áreas donde el desarrollo urbano no debería darse como el suelo de conservación, o ANP's recibieron valores de 100.

En los escenarios EST y ECR, se consideraron como áreas verdes a aquellas definidas como “área pública con vegetación, dedicada al esparcimiento, decoración y conservación” (INEGI, 2001). Esto sugiere que el desarrollo urbano es poco probable en estas áreas, y debido a sus características, se les asignó un porcentaje de restricción del 100%. Se consideró como zona federal al Bosque de Aragón, Alameda central etc. (se proporciona una descripción detallada en el Apéndice C). Dadas las características de esta infraestructura y las restricciones que impone, se les asignó también un porcentaje del 100%.

Finalmente, el escenario sin restricciones (ESR en adelante) plantea un futuro en el que las instituciones gubernamentales, normatividades y políticas públicas priorizan y dan cabida al desarrollo de asentamientos irregulares, actividades económicas, proyectos inmobiliarios y de infraestructura en zonas destinadas a la conservación y de alto valor socioecológico. En este escenario se esperaría un aumento significativo en el crecimiento urbano en toda la ciudad, especialmente en las periferias. Asimismo, se esperaría que el desarrollo urbano continuará expandiéndose de manera acelerada, generando una creciente demanda de bienes y servicios en el SC. Bajo esta perspectiva, todas las unidades territoriales actuales recibieron valores de cero.

Tabla 2.3: Valores de exclusión dados en porcentaje (%) asignados a las distintas unidades territoriales para cada escenario alternativo de crecimiento urbano.

	Tendencial	Escenario Sin restricciones	Con restricciones
Áreas verdes	100	0	100
Zona federal	100	0	100
Cuerpos de agua	100	0	100
ANPs municipales	50	0	100
ANPs estatales	50	0	100
ANPs federales	50	0	100
Suelo de conservación	50	0	100
Sitios RAMSAR	50	0	100
Resto del área	25	0	0
Semillas/localidades	0	0	0

Con base en el crecimiento urbano observado para el periodo seleccionado (1980-2014), los coeficientes de crecimiento estimados durante el proceso de calibración y las capas de exclusión modificadas se realizaron las corridas de simulación del crecimiento urbano para el área de estudio proyectadas al 2030, 2040, 2050 y 2060. Cabe mencionar que para la realización de las proyecciones futuras se utilizaron las mismas capas geográficas que en el proceso de calibración las cuales se enlistan en la **Tabla 2.1**. El resultado de esta operación fue la generación de un conjunto de mapas de probabilidad de urbanización para cada celda dentro del área de estudio. Posteriormente, cada celda fue clasificada en urbano (1) y no urbano (0) en función de si su probabilidad de urbanización es superior al umbral recomendado de 80% y los mapas resultantes se convirtieron a formato *ráster* y *vectorial*. Este procedimiento se realizó para cada mapa generado durante el periodo proyectado y bajo cada escenario evaluado.

2.3. El modelo InVEST

Como parte del desarrollo de esta investigación se utilizó el modelo espacialmente explícito InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs) versión 3.9.0 para evaluar cambios en el secuestro y el almacenamiento de carbono asociados al crecimiento urbano futuro. La herramienta computacional InVEST es un software diseñado por el Natural Capital Project (NatCap) en el año 2006. InVEST está conformado por varios módulos implementados mediante código abierto y aplicados para cuantificar, mapear y valorar los servicios ecosistémicos principalmente de los sistemas acuáticos, terrestres y marinos (NatCap, 2020).

En este proyecto se utilizaron los conceptos básicos e información del funcionamiento del módulo de almacenamiento y secuestro de carbono con base en Sharp *et al.* (2019). Este módulo cuantifica y mapea los cambios espaciales y temporales de carbono orgánico almacenado en cuatro reservorios. Los cuatro reservorios monitoreados por InVEST son: (1) biomasa aérea, (2) biomasa subterránea, (3) suelo y (4) materia orgánica muerta. El reservorio de biomasa aérea comprende a todo material vegetal vivo por arriba del suelo e integra a la corteza, el tronco, las hojas y las ramas. El reservorio de biomasa subterránea comprende al sistema radicular que incluye a las raíces vivas tanto finas como gruesas. El reservorio del suelo comprende al carbono contenido en el suelo y representa el reservorio más grande en magnitud. Finalmente, el reservorio de materia muerta, incluye a la hojarasca, tocones, y al arbolado muerto en pie y derribado (Requena *et al.*, 2012).

El modelo InVEST cuenta con datos de prueba los cuales se utilizaron para realizar ensayos preliminares con el modelo. Posteriormente, se procesaron los datos de entrada requeridos por el modelo, los cuales se enlistan en la **Tabla 2.4**. En este proyecto, se utilizó el mapa de uso de suelo y vegetación de la serie VI proporcionado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2017) y el mapa del SC. Se llevó a cabo una superposición de estas dos capas, es decir, se compararon y fusionaron el mapa del SC con el mapa de uso de suelo y

vegetación, lo que permitió identificar un total de 21 categorías de coberturas en la zona de SC.

Con base en la información derivada del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) que realiza la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2018), los 21 tipos presentes en el mapa original se agruparon en ocho nuevas categorías con la finalidad de facilitar el manejo de la información e interpretación de los resultados (**Tabla 2.5**). Adicionalmente, se seleccionó únicamente la porción del mapa correspondiente al SC de la CDMX con el cual se realizaron los análisis descritos en las próximas secciones.

Tabla 2.4. Datos de entrada requeridos por el modelo de almacenamiento y secuestro de carbono.

Nombre	Formato	Archivo	Descripción
Mapa de cobertura de uso del suelo histórico	.tif	Mapa de uso del suelo y vegetación del INEGI para el año 2017.	Uso del suelo con código LULC para cada celda.
Mapa de uso futuro de la tierra	.tif	Mapas generados por el modelo SLEUTH para los años 2030, 2040, 2050 y 2060 en sus diferentes escenarios.	Uso del suelo con código LULC para cada celda del año de la cobertura futura.
Reservorios de carbono	.csv	Carbono almacenado por tipo de vegetación en MgC.	Tabla con la cantidad de carbono almacenado en los cuatro reservorios requeridos.

Posteriormente, se le asignó un “código” a cada una de las nuevas categorías de la **Tabla 2.5**. Este código es un número entero único que representa una clase de uso/cobertura del suelo diferente. Como resultado se obtuvieron las siguientes categorías: (1) 'agricultura', (2) 'coníferas', (3) 'latifoliadas', (4) 'coníferas y latifoliadas', (5) 'pastizal', (6) 'matorral', (7) 'cuerpos de agua y humedales', y (8) 'zona urbanizada'. Cada nueva clase debe tener asignado este código y contenido en un archivo en formato *ráster* como dato de entrada.

Tabla 2.5. Categorías asignadas al uso de suelo y tipo de vegetación con base en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (CONAFOR, 2018).

Código	Categoría	Uso del suelo y tipo de vegetación
1	Agricultura	Agricultura de temporal anual Agricultura de temporal anual y permanente Agricultura de riego anual Bosque cultivado Pastizal cultivado
2	Coníferas	Bosque de oyamel Bosque de pino Vegetación secundaria arbustiva de bosque de oyamel Vegetación secundaria arbórea de bosque de oyamel Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino
3	Latifoliadas	Bosque de encino Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino
4	Coníferas y Latifoliadas	Bosque de pino-encino Bosque de encino-pino Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino
5	Pastizal	Pastizal inducido Pastizal halófilo
6	Matorral	Matorral crasicaule
7	Zona urbanizada	Urbano construido

Se utilizaron datos empíricos tabulares asociados al almacenamiento de carbono para los cuatro reservorios (Mg/ha) y las ocho distintas clases de cobertura de la **Tabla 2.5** como parte de los datos de entrada de InVEST. Se realizó una búsqueda de artículos, libros, tesis de licenciatura, tesis de posgrado e informes técnicos sobre los almacenes de carbono de distintos reservorios (carbono aéreo, carbono subterráneo, carbono en suelo y carbono en materia muerta), de acuerdo con el tipo de cobertura. El material bibliográfico seleccionado se clasificó de la siguiente manera: (1) estudios directos que se refieren a información bibliográfica sobre la captura de carbono en el SC de la CDMX, y (2) estudios indirectos que se refieren a información sobre la captura de carbono en áreas con características ambientales similares al SC. Los datos recopilados se muestran en la **Tabla 2.6** y la fuente de donde se

recopilaron los datos para el almacenamiento de carbono se encuentra en el Apéndice A. En el caso de cuerpos de agua, humedales y zonas urbanizadas, se estableció el valor de cero para el almacenamiento de carbono en todos los reservorios únicamente para un mejor manejo de los datos; sin embargo, es importante destacar que esto no implica que no haya almacenamiento de carbono en estos entornos. Este enfoque se debió a la limitación de este estudio, que se centró exclusivamente en los datos de carbono de los ecosistemas terrestres y no abordó el almacenamiento de carbono en cuerpos de agua y humedales.

Con estos datos de entrada, lo cuales representan las condiciones iniciales del sistema, se generó una primera corrida del modelo InVEST a la que se denominó escenario “Histórico”. El resultado de este proceso fue un conjunto de mapas en formato *ráster* con la cantidad neta de carbono almacenado en cada reservorio expresado en megagramos (Mg) por pixel.

Tabla 2.6: Matriz del almacenamiento de carbono (MgC/ha) para los cuatro reservorios y para cada categoría utilizados como datos de entrada en el modelo InVEST. La fuente de donde se recopilaron los datos para el almacenamiento de carbono se encuentra en el Apéndice A.

Reservorios de carbon (MgC/ha)					
Código	Categoría	C- superficial	C-subterráneo	C- suelo	C- muerta
1	Agricultura	20.82	7.37	75.20	1.11
2	Coníferas	88.00	19.94	136.19	8.69
3	Latifoliadas	23.90	9.82	117.90	7.62
4	Coníferas y Latifoliadas	53.16	13.57	121.10	0.31
5	Pastizal	6.96	2.50	96.70	1.60
6	Matorral	6.99	0.00	84.91	0.00
7	Cuerpos de agua y humedales	0.00	0.00	0.00	0.00
8	Zona urbanizada	0.00	0.00	0.00	0.00

2.3.1. Secuestro y almacenamiento de carbono orgánico bajo los escenarios alternativos de crecimiento urbano

El modelo de almacenamiento y secuestro de carbono InVEST genera una cantidad de datos relacionados con la cantidad de carbono almacenado con base a la cartografía ingresada. Lo anterior permite obtener la cantidad de carbono total de acuerdo con la cantidad almacenada por cada reservorio según la siguiente expresión (Tang *et al.*, 2020):

$$C_{tot} = \sum_1^i (C_{i_sup} + C_{i_sub} + C_{i_ma} + C_{i_su}) \times A_i, \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Donde C_{tot} representa el carbono total el cual está conformado por las densidades de carbono en cada reservorio; carbono aéreo (C_{i_sup}), carbono subterráneo (C_{i_sub}), carbono en materia orgánica muerta (C_{i_ma}) y carbono en suelo (C_{i_su}), para cada uso de suelo y vegetación i , respectivamente, por el área del uso del suelo y vegetación A_i .

El módulo de almacenamiento y secuestro de carbono de InVEST posee la capacidad de estimar cambios en el carbono almacenado bajo distintos escenarios de manejo modificando los datos de entrada. En este proyecto, utilizamos los mapas generados por SLEUTH para modificar el mapa inicial de uso de suelo y vegetación, y capturar así, los cambios derivados del crecimiento urbano bajo los tres escenarios alternativos. Para cada uno de los escenarios (EST, ESR y ECR) generamos cuatro mapas en formato *ráster* correspondientes a los años 2030, 2040, 2050 y 2060. Estos mapas representan la evolución del desarrollo urbano que podría presentarse en el SC de la CDMX en un lapso de cuarenta años. Estos mapas de crecimiento urbano futuros fueron utilizados como insumos, junto con la matriz de carbono antes descrita, para generar 12 corridas o experimentos de simulación (3 escenarios 4 periodos).

Se utilizó la herramienta estadística “Zonal statistics GIS tool” de QGIS para los reservorios de carbono (salidas de InVEST). Este algoritmo permite calcular las estadísticas o valores de los píxeles contenidos en una capa en formato *ráster* a través de una capa en formato vectorial poligonal. Esta herramienta arroja como resultado columnas de salida en la capa *vectorial* generando estadísticas por cada pixel que se encuentra dentro del polígono. El análisis estadístico (zonal statistics) de cada *ráster* se realizó para cada capa de carbono con tamaño de pixel de 100x100. Los resultados para visualizarlos se exportaron a formato .csv y permitieron conocer la cantidad de carbono que se almacena por categoría, posteriormente estos datos promediados fueron reflejados en diferentes mapas para visualizar la variación espacial de carbono.

Para evaluar el impacto del crecimiento urbano futuro sobre el secuestro y el almacenamiento de carbono orgánico se calculó, para cada escenario alternativo, la tasa de secuestro de carbono (MgC/ha*año), el cambio total (MgC/ha), y el porcentaje de cambio promedio (%) de carbono.

La tasa de secuestro de carbono (MgC/ha*año) fue estimada utilizando la ecuación 1.

$$Eq\ 1. (F_{ji} - I_{ji} / t)$$

donde I y F son los valores de carbono total inicial y final de cada década, obtenidos bajo cada escenario de crecimiento urbano i y tipo de cobertura j , y t representa el número de años evaluado; en nuestro caso $t=10$.

Una tasa de captura de carbono positiva indica que el ecosistema captura más carbono orgánico del que emite, mientras que valores negativos son indicativos que el ecosistema está perdiendo su capacidad de secuestrar carbono.

Para evaluar cambios en la cantidad de carbono almacenados en los distintos reservorios, calculamos el cambio total y porcentaje de cambio promedio para cada tipo de reservorio y tipo de cobertura por medio de las ecuaciones 2 y 3:

$$Eq\ 2. F_{ji} - I_{ji}$$

$$Eq\ 3. 100\% * (F_{ji} - I_{ji} / I_{ji})$$

donde I y F son los valores de carbono total inicial y final de cada década obtenidos bajo cada escenario de crecimiento urbano i y tipo de cobertura j .

Dicho porcentaje permite identificar áreas del SC dónde se esperan los mayores cambios, tanto de pérdidas como de ganancias de carbono almacenado en los distintos reservorios. Tanto para la generación y procesamiento de insumos como para el análisis de salidas y generación de mapas se utilizó el software QGIS 3.12.3.

Capítulo 3

Resultados

3.1. Cambio de cobertura urbana en el Suelo de Conservación mediante el modelo SLEUTH

En el año 2014, la cobertura urbana abarcaba cerca del 9% del SC, lo que corresponde a 7,244 ha de un total de 87,367 ha (**Figura 3.1**). Las proyecciones del modelo SLEUTH sugieren que la cobertura urbana en el SC incrementaría cerca de 13,484 ha, 19,974 ha, 26,322 ha y 33,230 ha para los años 2030, 2040, 2050 y 2060, respectivamente, bajo el escenario sin restricciones (ESR) (**Figura 3.1**), lo que equivale a 15%, 23%, 30% y 38 %, del SC, respectivamente. Bajo el escenario tendencial (EST), la cobertura urbana en el SC incrementaría cerca de 12,067 ha, 16,837 ha, 21,069 ha y 25,462 ha para los años 2030, 2040, 2050 y 2060, respectivamente (**Figura 3.1**) lo que equivale a 14%, 19%, 24%, y 29%, del SC. Bajo el escenario con restricciones (ECR) y para los mismos años, la cobertura urbana en el SC incrementaría 7,724 ha, 7,759 ha, 7,766 ha y 7,767 ha respectivamente, lo que equivale a 8.90%, 8.89%, 8.89% y 8.90% del SC, respectivamente. Es decir, el aumento de la cobertura urbana se mantendría casi constante. Por el contrario, bajo los ESR y EST, el área urbana podría abarcar casi la tercera parte de la superficie total del SC para el año 2060, siendo el crecimiento urbano más pronunciado en el sur del SC (**Figura 3.2**).

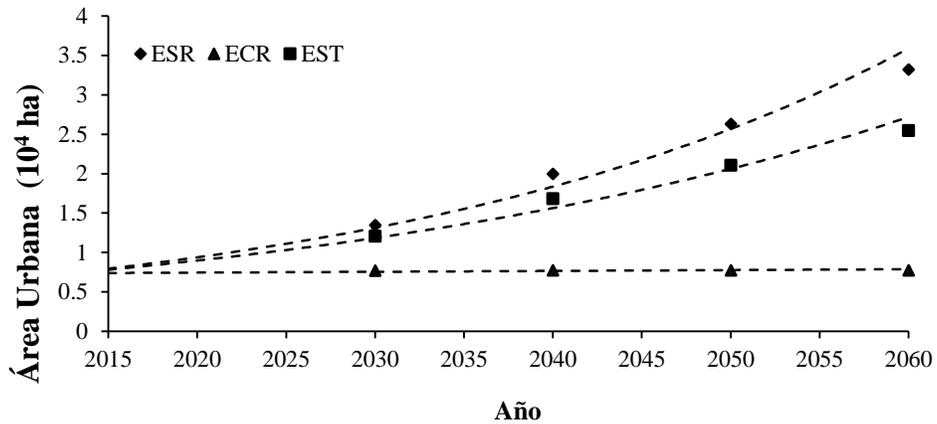


Figura 3.1. Cambio de cobertura urbana (ha) en el SC para el 2060 relativo al periodo histórico bajo los tres escenarios alternativos de crecimiento urbano: escenario sin restricciones (ESR), escenario con restricciones (ECR) y escenario tendencial (EST).

En el periodo histórico 2014 las categorías de agricultura y bosques de coníferas ocuparon cerca del 80% del total del SC, seguido por los pastizales con 6% y coníferas y latifoliadas con 3% del total del área del SC. Para evaluar el cambio de área por tipo de cobertura bajo cada escenario evaluado es indispensable conocer el área actual que ocupa cada categoría y el porcentaje del SC que representa (**Figura 3.2; Tabla 3.1**).

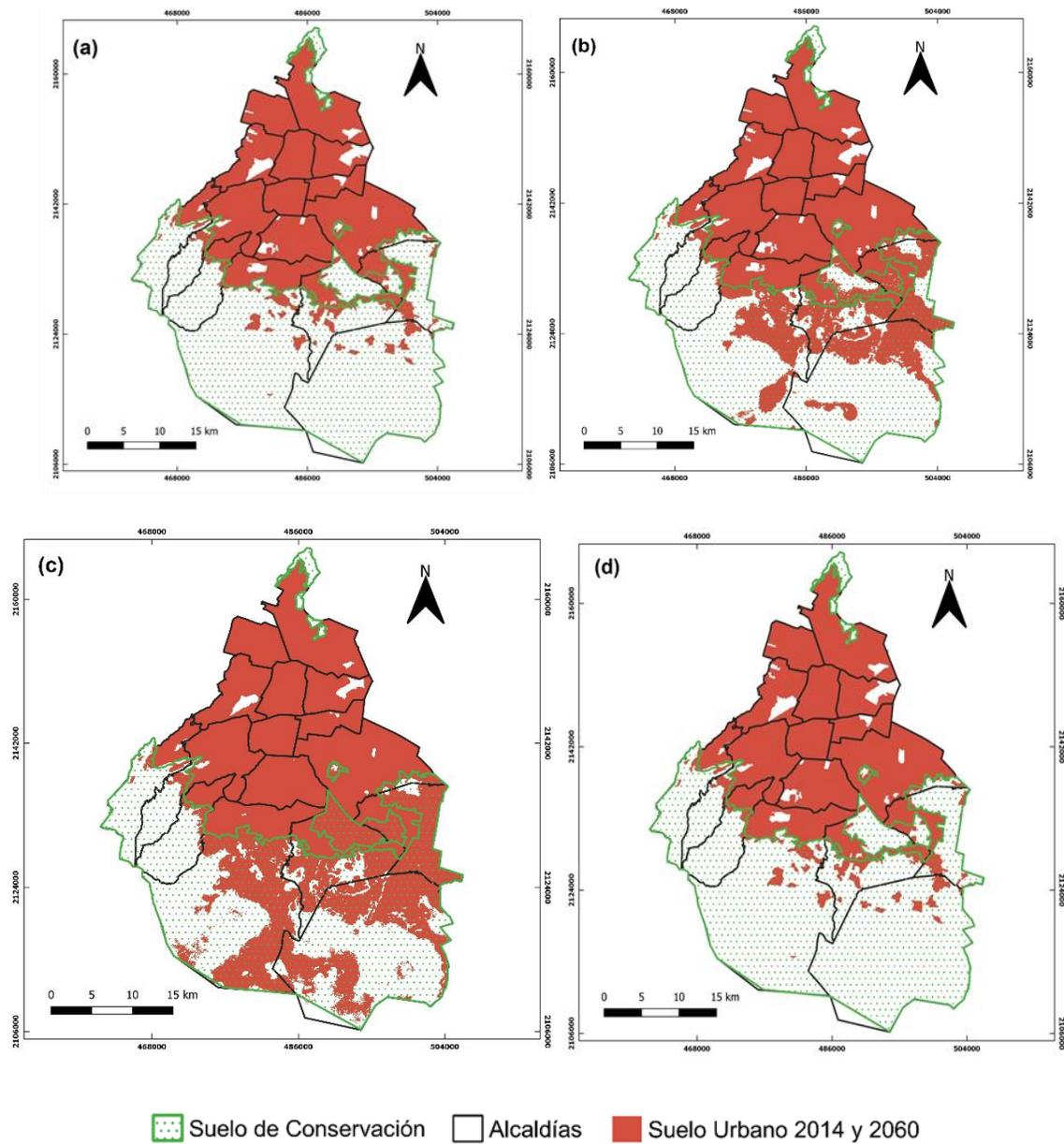


Figura 3.2. Se muestra el área urbana en color rojo para el período histórico en 2014 y en los diversos escenarios proyectados hasta 2060: (a) período histórico 2014, (b) escenario tendencial EST 2060, (c) escenario sin restricciones ESR 2060 y (d) escenario con restricciones ECR 2060.

El área total proyectada para el 2060 para cada tipo categoría de tipo de suelo y vegetación difirió entre los escenarios alternativos de crecimiento urbano siendo el ESR el escenario bajo el cual se observaron los mayores porcentajes de pérdida. Bajo el ESR, las categorías de tipo del suelo y vegetación más afectadas fueron los cuerpos de agua y humedales con una pérdida de cerca del 99% respecto al periodo histórico, la agrícola con 58%, seguido de las latifoliadas con 47% y las coníferas y latifoliadas con 29%. Bajo el EST, las mayores pérdidas de área se observaron para las categorías de tipo de suelo y vegetación agrícola y latifoliadas con 45% y 40% respectivamente. Bajo el ECR, casi el 100% de las coberturas se mantuvieron sin alteraciones con excepción de la agrícola con una pérdida del 2% con respecto al periodo histórico.

Tabla 3.1. Área total (ha) proyectada al 2060 y el porcentaje de pérdida relativo al periodo histórico 2014 asociados a cada categoría de tipo de suelo y vegetación bajo los tres escenarios alternativos de crecimiento urbano: escenario sin restricciones (ESR), escenario con restricciones (ECR) y escenario tendencial (EST).

Categoría	Área inicial año histórico 2014 (ha)	Cambio de área para 2060 en porcentaje (%)			Cantidad de cambio del año 2014 al año 2060 (ha)			Área final año 2060 (ha)		
		ESR	ECR	EST	ESR	ECR	EST	ESR	ECR	EST
Agricultura	34,023	58	1	44	19,715	387	15,109	14,308	33,636	18,914
Coníferas	34,694	7	0.02	2	2,533	10	590	32,161	34,684	34,104
Latifoliadas	1,852	47	1	40	877	18	738	975	1,834	1,114
Coníferas y Latifoliadas	2,923	29	1	19	840	18	567	2,083	2,905	2,356
Pastizal	5,435	27	1	20	1,489	46	1,073	3,946	5,389	4,362
Matorral	765	14	1	12	104	8	92	661	757	673
Zona urbanizada	7,244	359	7	251	25,986	523	18,218	33,230	7,767	25,462

3.2. Evaluación del secuestro y el almacenamiento de carbono orgánico en el SC bajo los escenarios alternativos de crecimiento urbano

La evaluación del almacenamiento y secuestro del carbono orgánico llevada a cabo mediante el modelo InVEST indicaron trayectorias y patrones distintos generados bajo cada uno de los tres escenarios de crecimiento urbano. En relación con la tasa de secuestro de carbono proyectada al 2060 y relativa al periodo histórico, los resultados sugieren tasas negativas de entre -0.5 a -1.0 MgC/ha*año para el ESR y el EST, respectivamente (**Tabla 3.3**). Las simulaciones indican también diferencias en las tasas de secuestro entre los distintos periodos de tiempo y las distintas categorías de uso del suelo y tipo de vegetación analizadas (**Tabla 3.3**).

Para el ESR, se obtuvieron tasas de secuestro de carbono negativas para todos los periodos de tiempo y en todas las categorías de uso del suelo y tipo de vegetación presentes en el SC. Para este escenario sin restricciones, las tasas de secuestro obtenidas fueron de entre -1.3 a -0.8 MgC/ha*año, siendo más pronunciada para los periodos 2050 y 2060 (**Tabla 3.3**). Cabe destacar también que las categorías que presentaron tasas negativas más pronunciadas en 2060 fueron la de coníferas con -2.98 MgC/ha*año y coníferas y latifoliadas con -2.00 MgC/ha*año (**Tabla 3.3**).

Para el EST, también se obtuvieron también tasas de secuestro de carbono negativas, con valores de -0.8 a -0.5 a MgC/ha*año, siendo más pronunciadas para los periodos 2050 y 2060 (**Tabla 3.3**). Las categorías que se destacan por presentar las tasas de secuestro negativas con mayores magnitudes son las latifoliadas con -1.45 y coníferas y latifoliadas con -1.99 MgC/ha*año.

Finalmente, para el ECR, la tasa de secuestro de carbono obtuvo valores de entre -0.1 y 0 MgC/ha*año siendo más pronunciada para el periodo 2030 (**Tabla 3.2**). La categoría de uso del suelo y tipo de vegetación que obtuvo la tasa de secuestro negativa más pronunciada en este escenario fue la agrícola con una tasa de -0.3 MgC/ha*año (**Tabla 3.3**).

Tabla 3.3. Tasa de secuestro de carbono en MgC/ha*año calculado para diferentes periodos de tiempo y para las distintas categorías de uso del suelo y vegetación.

Tasa de cambio de carbono total con relación al periodo histórico 2014						
Escenario	Categoría	2030	2040	2050	2060	Periodo 40 años
ESR	Agricultura	-2.42	-0.97	-0.94	-0.91	-1.31
	Coníferas	-0.15	-0.13	-0.68	-2.98	-0.99
	Latifoliadas	-1.09	-2.32	-1.75	-1.22	-1.59
	Coníferas y latifoliadas	-0.66	-1.08	-2.32	-2.00	-1.51
	Pastizal	-0.73	-0.44	-0.73	-0.63	-0.63
	Matorral	-0.29	-0.31	-0.19	-0.18	-0.24
	Promedio	-0.89	-0.87	-1.10	-1.32	-1.05
ECR	Agricultura	-0.32	0.00	0.00	0.00	-0.08
	Coníferas	-0.04	0.00	0.00	0.00	-0.01
	Latifoliadas	-0.20	0.00	0.00	0.00	-0.05
	Coníferas y latifoliadas	-0.08	0.00	0.00	0.00	-0.02
	Pastizal	-0.14	0.00	-0.01	0.00	-0.04
	Matorral	-0.06	0.00	0.00	0.00	-0.02
	Promedio	-0.14	0.00	0.00	0.00	-0.04
EST	Agricultura	-1.31	-0.71	-0.61	-0.51	-0.78
	Coníferas	-0.12	-0.11	-0.06	-0.52	-0.20
	Latifoliadas	-0.59	-1.37	-1.68	-1.45	-1.28
	Coníferas y latifoliadas	-0.26	-0.68	-1.64	-2.00	-1.14
	Pastizal	-0.50	-0.40	-0.34	-0.32	-0.39
	Matorral	-0.25	-0.19	-0.29	-0.11	-0.21
	Promedio	-0.51	-0.57	-0.77	-0.82	-0.67

En el caso del almacenamiento del carbono orgánico total, los resultados de simulación sugieren una tendencia decreciente para los próximos 40 años bajo los tres escenarios de crecimiento urbano, siendo más pronunciado en el ESR. La **Tabla 3.4** presenta las cantidades de carbono orgánico total almacenado bajo cada escenario alternativo de crecimiento urbano, así como los cambios netos por periodo, el promedio de todas las categorías para cada periodo y el porcentaje de cambio que éste representa.

Para el ESR, los cambios netos de carbono fueron negativos para todos los periodos evaluados (**Tabla 3.4**). Lo anterior representa disminuciones en la cantidad total de carbono

almacenado en el SC. Los cambios netos más pronunciados se obtuvieron en el último periodo evaluado (2050-2060), con una pérdida promedio de cerca de 13 MgC/ha lo que equivale a un porcentaje de cambio del 10%. Los cambios netos y porcentajes de cambio asociados difirieron según la categoría de tipo de suelo y vegetación (**Tabla 3.4**). En este sentido las categorías coníferas y latifoliadas, latifoliadas y agrícola sufrieron pérdidas de carbono total almacenado a lo largo de todos los periodos evaluados, acumulando para el 2060, un total de 63, 60 y 52 MgC/ha, respectivamente. Sin embargo, la categoría de latifoliadas fue la que obtuvo el porcentaje de pérdida más alto con cerca del 16% para el periodo 2030-2040 (**Tabla 3.4**).

Para el EST, los cambios netos de carbono también fueron negativos para todos los periodos evaluados (**Tabla 3.4**) con disminuciones promedio de hasta 8 MgC/ha para el último periodo evaluado (2050-2060), lo que equivale a un porcentaje de cambio del 6%. Los cambios netos y porcentajes de cambio asociados difirieron según la categoría de tipo de uso del suelo y vegetación. En este sentido, las categorías latifoliadas, coníferas y latifoliadas, y agrícola sufrieron pérdidas de carbono total almacenado a lo largo de todos los periodos evaluados, acumulando para el 2060, un total de 51, 45 y 31 MgC/ha, respectivamente. Sin embargo, la categoría de coníferas y latifoliadas fue la que obtuvo el porcentaje de pérdida más alto con cerca del 12% para el periodo 2050-2060 (**Tabla 3.4**).

Para el ECR, los cambios netos de carbono también presentaron valores negativos, con disminuciones promedio de hasta 3.1 MgC/ha para el primer periodo evaluado (histórico-2030), lo que equivale a un porcentaje de cambio del 2.9%. La categoría de uso del suelo agrícola sufrió las pérdidas acumuladas de carbono más importantes con un total de 3.19 MgC/ha para el 2060 habiendo perdido más del 90% de esta cantidad durante los primeros diez años. Sin embargo, las categorías de latifoliadas y pastizal obtuvieron también los cambios netos más pronunciados con cerca de 2.0 y 1.5 MgC/ha (**Tabla 3.4**).

En relación con la cantidad de carbono orgánico en los cuatro reservorios (aéreo, subterráneo, materia orgánica muerta y suelo), los resultados sugieren una disminución igualmente para las próximas cuatro décadas, siendo más pronunciada para los ESR y EST (Apéndice B). En cuanto a los cuatro reservorios de carbono evaluados, el carbono en suelo es el reservorio que seguirá manteniendo valores altos de carbono, después le sigue el reservorio de carbono

superficial, mientras que los reservorios de carbono subterráneo y materia orgánica muerta ocupan los valores más bajos. En el reservorio de suelo, la categoría que almacena una mayor cantidad de carbono son las coníferas con 132.97 MgC/ha en 2014 y se espera que almacenen 128.60 MgC/ha (EST), 132.78 MgC/ha (ECR), y 111.73 MgC/ha (ESR) en 2060.

Tabla 3.4 Carbono total almacenado (MgC/ha), cambio neto (MgC/ha) y porcentaje de cambio promedio (%) para cada tipo del suelo y vegetación evaluados bajo los tres escenarios alternativos de crecimiento urbano: escenario sin restricciones (ESR), escenario con restricciones (ECR) y escenario tendencial (EST).

Escenario	Categoría	Carbono total almacenado					Cambio neto					Porcentaje de cambio			
		Histórico	2030	2040	2050	2060	Histórico - 2030	2030-2040	2040-2050	2050-2060	Histórico-2060	Histórico-2030	2030-2040	2040-2050	2050-2060
ESR	Agricultura	105.68	81.52	71.85	62.49	53.38	-24.16	-9.67	-9.36	-9.11	-52.30	-22.86	-11.87	-13.03	-14.57
	Coníferas	246.58	245.09	243.82	236.98	207.15	-1.49	-1.27	-6.85	-29.83	-39.44	-0.61	-0.52	-2.81	-12.59
	Latifoliadas	159.24	148.38	125.21	107.69	95.46	-10.86	-23.17	-17.53	-12.22	-63.78	-6.82	-15.61	-14.00	-11.35
	Coníferas y latifoliadas	188.14	181.58	170.81	147.61	127.57	-6.56	-10.77	-23.20	-20.04	-60.57	-3.49	-5.93	-13.58	-13.58
	Pastizal	107.25	99.90	95.54	88.19	81.93	-7.35	-4.36	-7.35	-6.26	-25.32	-6.85	-4.37	-7.69	-7.10
	Matorral	79.54	76.68	73.63	71.78	70.02	-2.86	-3.05	-1.85	-1.76	-9.52	-3.59	-3.98	-2.51	-2.45
	Promedio	147.74	138.86	130.14	119.12	105.92	-8.88	-8.72	-11.02	-13.20	-1.05	-7.37	-7.05	-8.94	-10.27
ECR	Agricultura	105.68	102.53	102.50	102.48	102.48	-3.15	-0.02	-0.02	0.00	-3.20	-2.99	-0.02	-0.02	0.00
	Coníferas	246.58	246.23	246.23	246.23	246.23	-0.35	0.00	0.00	0.00	-0.35	-0.14	0.00	0.00	0.00
	Latifoliadas	159.24	157.26	157.26	157.26	157.26	-1.98	0.00	0.00	0.00	-1.98	-1.24	0.00	0.00	0.00
	Coníferas y latifoliadas	188.14	187.36	187.36	187.36	187.36	-0.78	0.00	0.00	0.00	-0.78	-0.41	0.00	0.00	0.00
	Pastizal	107.25	105.80	105.80	105.74	105.74	-1.45	0.00	-0.06	0.00	-1.51	-1.35	0.00	-0.05	0.00
	Matorral	79.54	78.90	78.90	78.90	78.90	-0.64	0.00	0.00	0.00	-0.64	-0.80	0.00	0.00	0.00
	Promedio	147.74	146.35	146.34	146.33	146.33	-1.39	0.00	-0.01	0.00	-1.41	-1.16	0.00	-0.01	0.00
EST	Agricultura	105.68	92.62	85.56	79.41	74.34	-13.06	-7.06	-6.14	-5.07	-31.34	-12.36	-7.63	-7.18	-6.38
	Coníferas	246.58	245.35	244.27	243.70	238.46	-1.23	-1.08	-0.57	-5.23	-8.12	-0.50	-0.44	-0.23	-2.15
	Latifoliadas	159.24	153.31	139.58	122.75	108.23	-5.93	-13.73	-16.83	-14.52	-51.01	-3.73	-8.95	-12.06	-11.83
	Coníferas y latifoliadas	188.14	185.54	178.75	162.35	142.35	-2.60	-6.79	-16.40	-20.00	-45.79	-1.38	-3.66	-9.17	-12.32
	Pastizal	107.25	102.23	98.24	94.86	91.69	-5.02	-3.98	-3.38	-3.18	-15.56	-4.68	-3.89	-3.44	-3.35
	Matorral	79.54	77.05	75.20	72.33	71.22	-2.49	-1.85	-2.87	-1.11	-8.32	-3.13	-2.40	-3.82	-1.54
	Promedio	147.74	142.68	136.93	129.23	121.05	-5.06	-5.75	-7.70	-8.18	-26.69	-4.30	-4.50	-5.98	-6.26

3.3. Distribución espacial del almacenamiento de carbono orgánico en el SC proyectada al 2060

En la **Figura 3.3** se muestran los porcentajes de cambio en el almacenamiento de carbono total proyectados para el año 2060 relativos al periodo histórico (2014). Principalmente, el escenario alternativo de crecimiento urbano sin restricción presentó reducciones de hasta el 50%, pero en los escenarios ESR y EST la pérdida es mayor en comparación con el ECR. En relación con la cubierta vegetal presente en el SC, se puede apreciar notablemente como ésta va disminuyendo, siendo reemplazada por la cobertura urbana.

Bajo el ESR, los resultados indican una reducción en el almacenamiento de carbono en el 2060 relativo al periodo histórico (2014) de entre 11% al 50% principalmente en las alcaldías de Tlalpan, Xochimilco, Milpa Alta y Tláhuac (**Figura 3.3b**). Bajo el EST estas reducciones van del 0% al -32% (**Figura 3.3a**). En el escenario ECR se observa una menor disminución en el área de cobertura vegetal. Las zonas grises representadas en la **Figura 3.3c** corresponden al suelo de conservación, resaltando las áreas que han perdido su cobertura vegetal. Por otro lado, las áreas en verde aún conservan su cobertura, abarcando todas las categorías de coníferas y latifoliadas. Es importante señalar que se esperaría una disminución en el almacenamiento de carbono para el año 2060, con una reducción estimada de hasta un 11%.

Los porcentajes más pronunciados de pérdida de carbono orgánico almacenado en el SC ocurrieron principalmente en las alcaldías de Tlalpan, Xochimilco, Milpa Alta y Tláhuac. Cabe destacar que para el 2060, los resultados indican una pérdida del 30% al 50% del carbono total almacenado para la zona agrícola y los bosques de coníferas y latifoliadas siendo el suelo, el reservorio de carbono más afectado.

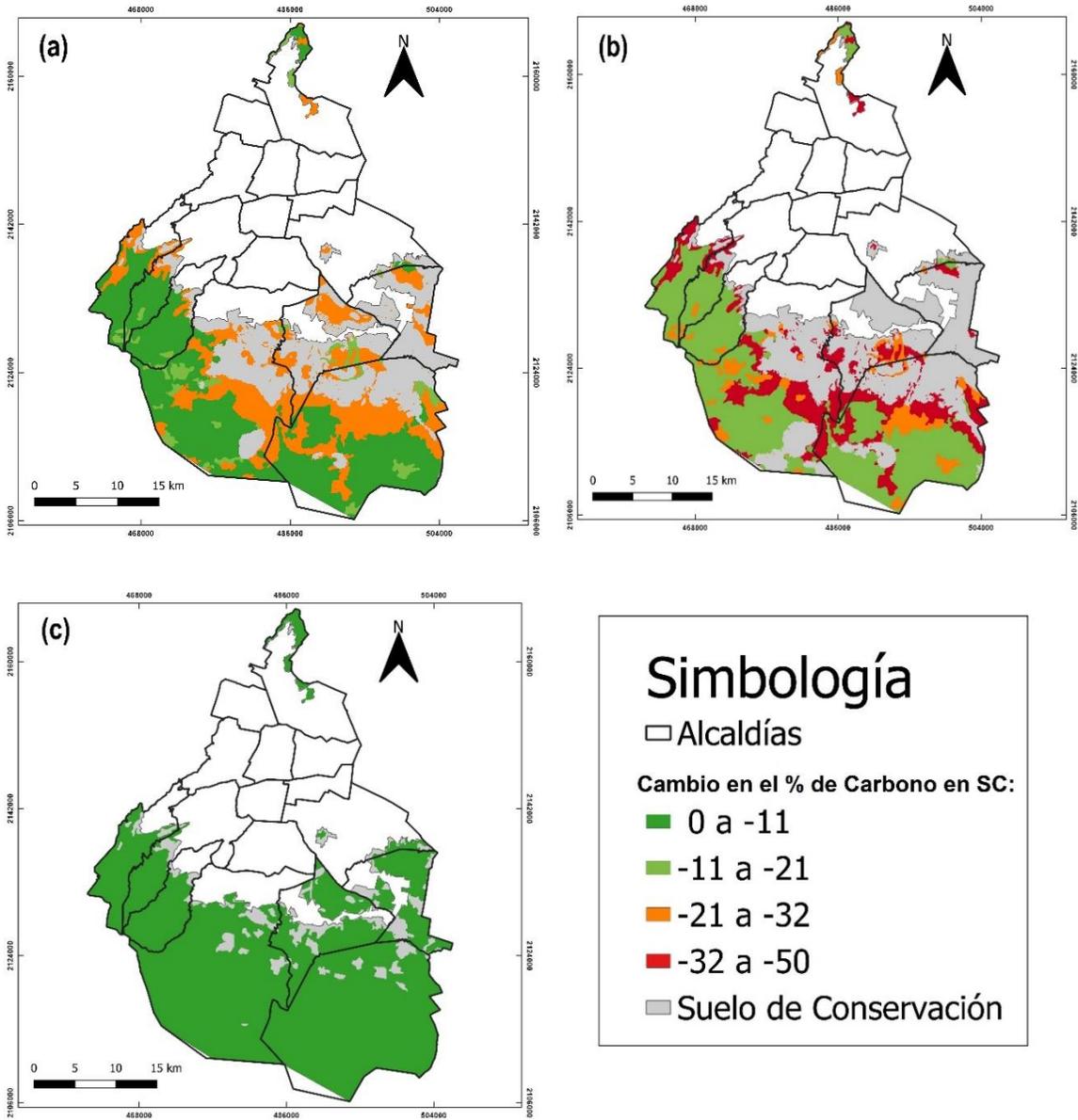


Figura 3.3: Porcentaje de cambio promedio proyectado a 2060 respecto al año histórico aplicando diferentes restricciones: (a) escenario tendencial EST; (b) escenario sin restricciones ESR; (c) escenario con restricciones ECR.

Capítulo 4

Discusión

En esta investigación se utilizaron herramientas de modelación exploratoria para evaluar el impacto del crecimiento urbano sobre el secuestro y el almacenamiento de carbono orgánico en el Suelo de Conservación (SC) de la Ciudad de México (CDMX) bajo tres escenarios alternativos de crecimiento urbano para las décadas de los años 2030, 2040, 2050 y 2060. El modelo SLEUTH, fue utilizado para construir tres escenarios de crecimiento urbano que respondieron a un conjunto de suposiciones y premisas asociadas a narrativas divergentes que subyacen la formulación de políticas públicas sobre el uso de territorio. Los resultados derivados de SLEUTH se acoplaron con el modelo InVEST para evaluar los patrones espaciales y trayectorias en el secuestro y el almacenamiento de carbono orgánico en el SC de la CDMX. Los resultados de este ejercicio de modelación sugieren que el crecimiento urbano tendrá impactos negativos sobre este servicio ecosistémico con pérdidas significativas durante todo el periodo evaluado 2014-2060.

4.1. Simulación de la cobertura urbana en SC a través del modelo SLEUTH

En este proyecto se ha identificado como el crecimiento urbano puede impactar a futuro sobre uno de los servicios ecosistémicos que provee el SC, el secuestro y el almacenamiento de carbono orgánico, por lo cual la expectativa para las próximas décadas hasta el 2060 es que la expansión de la urbanización se presente de manera no uniforme y continúe hacia todas las direcciones de la CDMX a lo igual que hacia el sur ocupando diversas áreas correspondientes al SC. Se destaca el incremento en las alcaldías de Tlalpan, Xochimilco,

Milpa Alta y Tláhuac. Los escenarios usados sugieren que el crecimiento de la mancha urbana en los próximos años dependerá en gran medida de la aplicación de políticas de conservación del suelo. El escenario tendencial (EST) muestra cómo el crecimiento urbano en la ciudad, la cual al inicio mostraba un modelo monocéntrico, que ha ido cambiando a un modelo de ciudad policéntrico (Montejano *et al.*, 2017). Se esperaría que para las siguientes décadas sigan aumentando los subcentros urbanos hacia el año 2060, principalmente en los escenarios EST y escenario sin restricciones (ESR), en EST se esperaría que el valor de crecimiento urbano sea de 25,462 ha y el valor más alto en ESR con 33,230 ha. Los dos escenarios presentan el mismo patrón de crecimiento, ya que presentan los valores más altos en comparación con el escenario con restricciones (ECR) con apenas 7,767 ha de crecimiento. De acuerdo con este patrón para el año 2060 las alcaldías en donde se podría presentar un mayor aumento en el crecimiento urbano sobre el SC principalmente son al sureste de la CDMX en alcaldías como Tláhuac, Milpa Alta, Xochimilco y al suroeste en la alcaldía de Tlalpan principalmente en ESR y en EST y en una menor proporción en ECR. Por lo cual se han identificado las causas que han originado el crecimiento urbano en la CDMX.

El proceso de urbanización en la CDMX se ha acelerado debido a múltiples factores. En este estudio se han identificado las principales causas que han impulsado el crecimiento urbano en la CDMX a lo largo de los años. Entre las causas más representativas se encuentran la inmigración, el aumento de la población y el desarrollo de infraestructura y vías de comunicación (CORENA, 2017; Güiza *et al.*, 2018). Así mismo, en la CDMX y en otras ciudades de México, la planificación y ordenamiento territorial han estado impulsados por intereses económicos y políticos que priorizan el desarrollo urbano sobre la conservación de áreas peri-urbanas de alto valor ecológico (Soto-Cortés, 2015).

La CDMX está atravesando por un proceso de periurbanización el cual es una consecuencia de la transformación del uso de suelo, principalmente en las periferias urbanas en donde se localizan las zonas de alto valor ecológico (Aguilar *et al.*, 2022). A lo largo de la realización de este trabajo se muestra que las periferias de la zona sur están atravesando un proceso de periurbanización, el cual no solo se está presentando en CDMX si no también en la gran mayoría de las metrópolis del mundo.

Las características más significativas de los procesos de periurbanización identificadas en el SC son la heterogeneidad social, y la fragmentación del uso del suelo, que está en transición de suelo rural a urbano, además, se están estableciendo subcentros urbanos que cuentan con infraestructuras modernas como hospitales, universidades y centros comerciales (Aguilar *et al.*, 2022).

Aunque no se abordó específicamente esta cuestión en el presente trabajo, resulta evidente que el crecimiento urbano, entre varias causas identificadas, ha sido influido por la inmigración, como señaló Mendoza (2003). Además, las personas recién llegadas a la ciudad, especialmente aquellas que carecen de un lugar para residir, encuentran en las periferias urbanas una opción (Güiza *et al.*, 2018). Estas áreas ofrecen a estos grupos marginados un espacio para iniciar la construcción de viviendas (Güiza *et al.*, 2018). De igual manera, se está presentado una migración interurbana, en la cual inmigrantes de las diversas alcaldías de CDMX encuentran un lugar en donde vivir en el SC para acceder a una vivienda (Güiza *et al.*, 2018).

De acuerdo al censo de población 2020 realizado por INEGI (2021), la tasa de crecimiento promedio anual paso de ser 0.3 en 2010 a 0.4 para 2020. En 2010, la población que habitaba en CDMX era de 8.9 millones de habitantes, para 2020 esta cifra aumentó con aproximadamente a 9.2 millones de habitantes. Asimismo, las alcaldías que se encuentran dentro del SC aumentaron su población como es el caso de la alcaldía Milpa Alta, la cual se encuentra en el primer lugar, seguida de las alcaldías Tláhuac y Tlalpan, precisamente este aumento se presenta en las alcaldías que ocupan una mayor proporción de área en el SC, Milpa Alta con 32% y Tlalpan con 29%.

Se ha podido observar que el crecimiento urbano se da principalmente por las zonas que son más propensas al crecimiento urbano como lo son la cercanía al transporte y a la infraestructura que funcionan como atractores para su crecimiento (Thorne *et al.*, 2017). Sobre todo, en SC en donde se ha demostrado que la creación de un nuevo camino es una atracción para convertirse en una zona propicia para el aumento acelerado de asentamientos irregulares (López, 2009). Así mismo, la creación de infraestructura vehicular ha traído

diversas consecuencias en su ejecución tal es el caso del puente vehicular Periférico sur-oriental en la zona de los humedales de Xochimilco, el cual aparte de contribuir al desarrollo de la mancha urbana y favorecer a los capitales privados, está construido dentro de un Área Natural Protegida, la cual también es considerada sitio Ramsar y Patrimonio Cultural de la Humanidad (Olivares, 2021). Además, otro de los factores que influye de manera muy importante en el SC es la infraestructura, principalmente, de las construcciones individuales y la consolidación de las construcciones que se encuentran dentro de los asentamientos existentes, este tipo de ocupación generalmente es identificado como crecimiento hormiga (CORENA, 2017).

4.1.1. Problemáticas particulares del Suelo de Conservación de la Ciudad de México relacionadas con el crecimiento urbano

En el SC han influido algunas otras causas que han propiciado el crecimiento urbano sobre todo por la mala regulación del suelo y la laxa aplicación de la normatividad. Las causas de la urbanización en las periferias son en gran parte por la postura relajada que mantiene el Estado de Derecho en México respecto a estos fenómenos de ilegalidad e irregularidad que predominan sobre la tierra periurbana (Iracheta, 2015). Aquí destacamos algunas de las situaciones que han dado paso al crecimiento urbano en el SC las cuales suelen ser factores como ocupación irregular de la tierra, regularización de predios a futuro y demanda de suelo para vivienda (Aquino, 2013; Corona, 2016 ; CORENA, 2017).

La mala regulación del suelo en muchos casos puede deberse a la nula concordancia entre los programas de manejo. Se ha demostrado que las estrategias de conservación como los programas que son implementados desde diferentes niveles de gobierno no se ponen de acuerdo en la implementación de acciones específicas (Perevochtchikova y Torruco, 2014). De acuerdo a un estudio realizado por Cortés (2017), existe una incompatibilidad entre los Programas de Desarrollo Urbano Delegacionales (PDDU) y el Programa General de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal (PGOEDF). De hecho, un 30% del área de SC es incompatible de entre lo que establecen los PDDU y el PGOEDF. Sin embargo, aunque exista una compatibilidad entre los programas se da el caso de la presencia de asentamientos

irregulares establecidos en zonas con un uso de suelo diferente. Las delegaciones que presentan esta situación de incompatibilidad entre sus programas son Álvaro Obregón, Cuajimalpa, La Magdalena Contreras, Tlalpan, Xochimilco y Tláhuac debido a que en el PGOEDF presentan la clasificación de zonas de conservación y áreas naturales protegidas y en los PDDU tienen un uso de suelo establecido como usos habitacionales, de producción agroindustrial o programas parciales de desarrollo (Cortés, 2017).

Se destaca otra problemática relacionada con los programas en las ANP's. Desde su decreto como ANP, no se estableció hasta mucho después de su creación un programa de manejo, el cual es un instrumento crucial que establece los lineamientos para la administración y manejo del sitio. Incluso, aún persiste la situación en la que hay ANP's que no cuentan con un plan de manejo. En algunos casos se transfirió la administración al gobierno local de siete parques nacionales, los cuales no fueron incluidos en Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP; CORENA, 2017; Cortés, 2017).

La ocupación irregular de la tierra se puede presentar de diversas maneras, se han documentado diversos casos en torno a esta problemática, por ejemplo, en la zona chinampera de Xochimilco, en el estudio de González (2016) resalta que las áreas de chinampas están enfrentando riesgos significativos, principalmente debido a pérdidas en aumento, siendo las causas vinculadas al crecimiento urbano contiguo las más destacadas. Esta ocupación irregular de la tierra en donde se han dado diversas situaciones en las cuales intervienen diversos actores, funcionarios, partidos políticos, gobierno local, familiares directos de los dueños de los predios y vecinos, que despojan a la gente de sus terrenos a través de procesos legales civiles para luego revenderlos, por lo cual este tipo de prácticas promueve que se realice un cambio de uso del suelo (Saldívar, 2021).

Dado los 867 asentamientos humanos irregulares que se tenían contabilizados (PAOT, 2012), en el SC algunas de las acciones que se llevan a cabo en el gobierno local y estatal favorecen que estos asentamientos cobren más relevancia y que difícilmente sean reubicados. Consecuentemente, se regularizan, tal es el caso de la alcaldía de Tlalpan que regularizó 21 asentamientos (La Jornada, 2021). Además, existe la iniciativa de la alcaldía Xochimilco en donde se pretenden regularizar 300 asentamientos (La Jornada, 2021). Aunado a este tipo de

acciones y dado que la expansión urbana solo favorece al mercado inmobiliario del sector privado (Delgadillo, 2012).

La demanda del suelo para vivienda contribuye al proceso de urbanización debido a que los núcleos agrarios proveen de suelo para que se comience a habitar generalmente por familias de bajos recursos y también sea adquirido por empresas inmobiliarias, terrenos ejidales a bajo precio muchas veces con la finalidad de la privatización del suelo periurbano (Gil, 2023). La tierra ejidal en las áreas periurbanas son las más propensas a que se lotifique para construir una vivienda además es tierra adquirida por los más pobres ya que puede ser adquirida de manera ilegal y a un costo muy económico (Iracheta, 2015).

El establecimiento de asentamientos humanos en una zona implica no sólo la construcción de viviendas, sino también una mayor demanda de servicios públicos como agua, drenaje, luz, transporte y una infraestructura más amplia para sostener la población. Esto incluye la creación de hospitales, centros de salud, caminos y carreteras, y el sellamiento del suelo. Estos factores son particularmente relevantes en los escenarios de crecimiento urbano ESR y en EST, donde se esperaría un mayor crecimiento de la mancha urbana.

A pesar de los programas y las políticas de ordenamiento en las periferias de la CDMX, el índice de marginación urbana sigue siendo muy alto en áreas con viviendas precarias, esto indica que la gestión de estas zonas no se ha llevado a cabo de manera efectiva (INFONAVIT y ONU-HABITAT, 2018). Si se mantiene este manejo inadecuado, el crecimiento urbano probablemente seguirá aumentando, especialmente en ESR y en EST. Por otro lado, a pesar de que el crecimiento urbano se debe a diversas problemáticas que deben ser abordadas. Si se atienden adecuadamente, se podría detener el crecimiento urbano en áreas de suelo de conservación. Esto se refleja principalmente en el ESC.

4.2 Cambios proyectados sobre el secuestro y el almacenamiento de carbono orgánico en el Suelo de Conservación a través de los escenarios de crecimiento urbano futuro

La pérdida de cobertura vegetal en SC se asocia con los tres escenarios de crecimiento urbano y tiene un impacto negativo en el secuestro y almacenamiento de carbono orgánico en los años 2030, 2040, 2050 y 2060. Por lo cual, se observa una disminución significativa en el secuestro y el almacenamiento de carbono orgánico en los tres escenarios. La mayor pérdida de cobertura se presenta en las categorías de agricultura, coníferas, coníferas y latifoliadas, se prevé que la pérdida de cobertura vegetal dedicada a la captura y al almacenamiento de carbono puede tener consecuencias tales como tasas de secuestro negativas y una disminución en el almacenamiento de carbono orgánico.

Desde 1970, ha habido una pérdida de cubierta forestal equivalente al 10% de la superficie del SC en las alcaldías de Milpa Alta, Xochimilco y Tlalpan, las cuales se espera que experimenten una mayor urbanización y pérdida de cobertura vegetal en las próximas décadas. De acuerdo a la PAOT (2012), Xochimilco, Gustavo A. Madero y Tláhuac han sido las alcaldías más afectadas por la pérdida de cobertura forestal, mientras que Tlalpan y Milpa Alta presentan una baja densidad de cobertura forestal, pero también sufrirán una mayor urbanización sobre la cobertura vegetal. Asimismo, por ejemplo, en investigaciones más recientes, como indicó Mata (2019), se ha observado una disminución en la cobertura arbórea del suelo de conservación entre 2006 y 2014 a pesar de contar con una designación legal de conservación.

A pesar de que los bosques se encuentran más alejados de la zona urbana a diferencia de las zonas agrícolas, también experimentan una pérdida significativa debido al crecimiento urbano, que conlleva la deforestación por sobreexplotación, plagas forestales, incendios y apertura de espacios para la producción agropecuaria (Saavedra *et al.*, 2011). El modelo SLEUTH, en este caso, ha detectado que las zonas más cercanas a la urbanización son las dedicadas a la agricultura, mientras que los bosques más alejados también experimentan una pérdida importante que no debe subestimarse.

Los escenarios futuros muestran una disminución en la agricultura, debido a que las parcelas agrícolas se encuentran más cercanas a los centros urbanos lo cual provoca que sean más propensas a perderse, según las predicciones del modelo SLEUTH. Además, se ha registrado una reducción en las actividades agropecuarias debido a la pérdida de rentabilidad, a pesar de ser un sector importante para la población del SC, que depende de él como medio de subsistencia y para obtener recursos económicos (SEDEMA, 2016).

El estudio realizado por la PAOT (2010b) indica que la expansión de las zonas urbanas se ha dado principalmente sobre áreas agrícolas y forestales, lo que se refleja en una disminución de la agricultura y un aumento de la expansión urbana en el período comprendido entre 2000 y 2006. Se observa un crecimiento urbano dentro del SC en las mismas alcaldías que se dedican a la agricultura, como Tlalpan, Xochimilco, Milpa Alta y Tláhuac (CONABIO, 2016), siendo Tlalpan y Milpa Alta dos de las alcaldías más importantes en cuanto a superficie cosechada (SAGARPA, 2012). La falta de opciones de vivienda asequibles en las áreas urbanas oficiales para personas de bajos ingresos conduce a la ocupación de terrenos del SC para satisfacer sus necesidades habitacionales, lo que provoca la expansión de las zonas urbanas sobre terrenos destinados a la agricultura. Estas zonas agrícolas son a menudo ocupadas debido a que presentan una pendiente no tan pronunciada y son propicias para la construcción (Cortés, 2017). Es importante destacar que, ante la constante presión urbana, la agricultura ha logrado adaptarse, como es el caso del cultivo de nopal en Milpa Alta y el cultivo de flores en antiguas chinampas (SEDEMA, 2016).

De acuerdo con la SEDEMA, (2016) se ha observado un aumento en la actividad agrícola, lo cual parece contradictorio. Sin embargo, de acuerdo con este estudio, las proyecciones indican que la agricultura podría disminuir en el futuro. A pesar de que el crecimiento actual de la agricultura sugiere un aumento continuo en las próximas décadas, los datos obtenidos sugieren que las áreas dedicadas a la agricultura se mantendrán constantes o disminuirán. Es importante destacar que estas son proyecciones a futuro y que no podemos predecir con certeza lo que sucederá en el futuro, ya que es incierto. Además, este trabajo presenta una aproximación sobre lo que podría suceder en términos de almacenamiento y secuestro de

carbono en el SC. Por lo tanto, este estudio puede servir como base o ejemplo para futuras investigaciones sobre carbono orgánico en el SC.

En relación con el almacenamiento de carbono orgánico total, las coberturas que más almacenan carbono son la categoría de coníferas, latifoliadas y, coníferas y latifoliadas. De acuerdo con la PAOT (2010) el bosque de oyamel es el tipo de cobertura forestal que más carbono almacena en el SC con aproximadamente 83.22 MgC/ha y 83.97 MgC/ha. Además, según las estimaciones proyectadas en los ESR, EST y ECR la categoría de coníferas en donde se encuentra clasificado el bosque de oyamel, tiene los valores más altos de carbono total almacenado para los próximos años proyectados hasta 2060.

Para ESR y EST existe una disminución de carbono, pero en ECR la cantidad de carbono almacenado se mantiene similar al periodo histórico para todos los años. Las categorías de agricultura y, coníferas y latifoliadas son las categorías que más cambian para 2060 en ESR y EST. En los tres escenarios el carbono total almacenado disminuye continuamente para las siguientes décadas hasta 2060, presentándose las mayores pérdidas en el ESR en la agricultura con -14.57%, a diferencia del ECR el cual se mantiene sin cambios para el mismo año, en el EST en la categoría de coníferas y latifoliadas presentará un cambio de -12.32% siendo este el mayor porcentaje de cambio. La falta de almacenamiento de carbono tiene consecuencias cruciales, ya que el carbono orgánico del suelo es esencial para la fertilidad, la salud y los servicios del ecosistema, como la producción primaria y la regulación del clima (Tiefenbacher *et al.*, 2021). Por lo tanto, es fundamental fortalecer las restricciones aplicadas al territorio para mantener la cobertura vegetal y aumentar el almacenamiento y el secuestro de carbono, ya que esto contribuye a regular las concentraciones de CO₂ y es beneficioso para la mitigación del cambio climático (IPCC, 2007).

La interpretación visual de los mapas de crecimiento urbano y cobertura vegetal, indica que la expansión urbana se correlaciona con una disminución en la cobertura vegetal. Es evidente que la pérdida de cobertura vegetal en el área de estudio está directamente relacionada con el crecimiento urbano, el cual implica una reestructuración de las áreas en donde se lleva a cabo, este crecimiento implica que se lleven a cabo la construcción de infraestructuras urbanas, que a su vez conlleva a una disminución en la capacidad de los ecosistemas para

regular la erosión del suelo, debido a la pérdida de cobertura vegetal y al aumento de áreas de suelo sellado y altamente compactado (Pereira *et al.*, 2022). El sellamiento del suelo implica una reducción en la capacidad de almacenamiento y secuestro de carbono debido a la pérdida de la capa superior del suelo (Lu *et al.*, 2020). Los materiales de construcción utilizados, como el asfalto, limitan la capacidad del suelo para capturar y almacenar carbono, mientras que la remoción del suelo conduce a la pérdida del carbono ya almacenado (Lu *et al.*, 2020). Se ha demostrado que las zonas urbanas son amplias zonas cubiertas con materiales impermeables como lo es el asfalto lo cual además de producir una pérdida de carbono orgánico actúa como fuente de carbono (Yan *et al.*, 2023).

La tasa de secuestro de carbono de cada categoría y período de tiempo resultó negativa, especialmente en ESR y EST. Para el período proyectado, que abarca desde el año histórico hasta el año 2060, se calcula una tasa negativa de hasta $-2.98 \text{ MgC/ha}\cdot\text{año}$ en ESR. Cabe mencionar que, aunque se implementen restricciones, se prevén tasas negativas, con una mayor diferencia en el caso de EST, de hasta $-2,0 \text{ MgC/ha}\cdot\text{año}$. Es importante destacar que una tasa de secuestro de carbono orgánico positiva indica un aumento de carbono, mientras que en este estudio se obtuvieron tasas negativas que apuntan a una pérdida de carbono orgánico en las próximas décadas (Tiefenbacher *et al.*, 2021). La pérdida de cobertura vegetal es una de las causas principales de la tasa de secuestro de carbono negativa en EST y ESR, debido a que estos dos escenarios se rigen bajo la suposición de que predomina una gestión inadecuada del uso del suelo. La gestión del territorio es clave para modificar la cobertura vegetal, pero también es importante tener en cuenta otros factores que pueden alterar la capacidad para secuestrar carbono, como la emisión de combustibles fósiles y la recolección de biomasa (Nowak y Crane, 2002). Cabe mencionar que la dinámica de almacenamiento y secuestro de carbono en los bosques también cambia con el tiempo, debido a factores naturales como crecimiento, muerte y descomposición (Nowak y Crane, 2002).

4.2.1 Sobre la planeación sostenible en términos del Suelo de Conservación

En un contexto de desarrollo urbano sostenible se tienen que analizar los espacios verdes desde la perspectiva socio-ecológica teniendo en cuenta que la CDMX no vive aislada de los servicios ecosistémicos que se proveen en una ciudad densamente poblada. Esta investigación muestra una mirada hacia el futuro a través de las herramientas como la modelación, las cuales permiten llegar a tomar decisiones no sólo en el ámbito gubernamental, sino también en el sector académico y de la sociedad civil. Desde la perspectiva de los tres escenarios que aquí se proponen, pero, sobre todo, en un contexto de un escenario tendencial y sin restricciones se debe de tomar en cuenta cómo se lograría garantizar el acceso a los recursos urbanos tales como la provisión de agua, transporte, energía, vivienda etc. De acuerdo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (2023), en particular, la meta del Objetivo 11, las ciudades deben garantizar el acceso a viviendas y servicios básicos para todos sus ciudadanos, lo cual implica que las ciudades deben adoptar e implementar políticas y planes integrados para fomentar el uso eficiente de los recursos, la mitigación y adaptación al cambio climático, y proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros y sostenibles. Por lo tanto, es esencial analizar el comportamiento en diversos escenarios para determinar cómo se pueden satisfacer las necesidades de la ciudadanía.

No sólo se trata de hacer y realizar prohibiciones, sino de entender cómo la ciudad va creciendo en los periodos de cada administración en los tres niveles de gobierno y como las estrategias aplicadas ayudan a la protección del medioambiente. Asimismo, es necesario entender que el poco control que se tiene sobre la aplicación de las leyes, y en ocasiones la impunidad y la permisividad hacen que una planificación urbana sostenible no pueda llevarse a cabo (Sánchez, 2012).

Actualmente el Congreso de la Ciudad de México se encuentra discutiendo uno de los documentos que delinearán el futuro de la CDMX para los siguientes años, el Proyecto del Plan General de Desarrollo de la Ciudad de México (PGD CDMX) y el Proyecto del Programa General de Ordenamiento Territorial de la Ciudad de México (PGOT CDMX) los

cuales fueron elaborados a cargo del Instituto de Planeación Democrática y Prospectiva de la CDMX (IPDP). El PGD CDMX, representa el primer instrumento de planeación de largo plazo que delinearé la dirección y el desarrollo de la Ciudad en los próximos veinte años, el cual desempeñará un papel crucial como instrumento principal en el proceso de planificación de la CDMX y de acuerdo a la Constitución Política de la Ciudad de México y la Ley del Sistema de Planeación del Desarrollo establecen que el PGD CDMX es de carácter obligatorio para el sector público y regulatorio e indicativo para otros sectores (IPDP, 2023).

Es importante destacar que en el PGOT CDMX se pretendía la implementación de un nuevo uso del suelo, específicamente el suelo rural, lo que implica un cambio desde el uso del suelo de conservación a uno de carácter rural. La clasificación de suelo rural permite intervenciones que incluyen la tala de árboles, la agricultura, la habilitación de actividades turísticas y, especialmente, el desarrollo de nuevas viviendas, por lo tanto, proyectos como el PGOT CDMX tienden a reflejar un enfoque más orientado hacia lo económico, impulsando la construcción de casas, edificios y otras infraestructuras (Congreso CDMX, 2023). Además, buscan consolidar asentamientos que previamente habían invadido el SC. En lugar de restringir el crecimiento de estas ocupaciones irregulares, esto promueve un mayor crecimiento, lo que tiene un impacto negativo en el SC (Congreso CDMX, 2023). Es relevante señalar que, debido a este tipo de implicaciones, la categoría de suelo rural fue eliminada del artículo 16 de la Constitución Política de la Ciudad de México, lo cual significa que ya no es necesario utilizar este término en el PGOT CDMX.

Una de las estrategias que se podrían tomar en cuenta, es fortalecer iniciativas, como la que se plantea para el Bosque de Agua, ya que esto promoverá la implementación de un enfoque regional en apoyo a las decisiones tomadas por representantes gubernamentales, propietarios de tierras, productores, grupos ambientalistas y académicos. Este enfoque busca discutir, acordar y colaborar en actividades destinadas a preservar la integridad ecológica, así como el bienestar social y económico del Bosque de Agua (ECOBA, 2012).

Esta estrategia regional también destaca la importancia de realizar consultas multisectoriales a nivel de cuenca para garantizar la sustentabilidad hídrica, la viabilidad y sostenibilidad del

desarrollo urbano y rural de las tres entidades que comparten el Bosque de Agua: CDMX, Estado de México y Morelos, ya que hasta la fecha, no se ha establecido una estrategia de conservación ni un mecanismo de coordinación y colaboración regional para garantizar la integridad a largo plazo del Bosque de Agua (ECOBA, 2012).

4.3 Ventajas y limitaciones de los modelos InVEST y SLEUTH

Tanto el modelo InVEST como el modelo SLEUTH presentan limitaciones que deben ser consideradas al realizar análisis de crecimiento urbano y evaluaciones de ecosistemas. A pesar de estas limitaciones, se pueden tomar medidas para garantizar resultados precisos y confiables. Es importante tener en cuenta que todos los modelos tienen limitaciones, y estas limitaciones no invalidan necesariamente el estudio. Al abordar estas limitaciones (que serán detalladas más adelante) y ser conscientes de ellas al interpretar los resultados, se pueden obtener conclusiones valiosas que pueden ayudar a informar políticas y decisiones sobre el manejo de recursos naturales y el crecimiento urbano sostenible.

El modelo SLEUTH es de naturaleza exploratoria y no predictiva. La aplicación exploratoria de SLEUTH en el desarrollo de esta investigación implica el reconocimiento de la complejidad e incertidumbre asociadas con la modelación del crecimiento urbano en una megalópolis como la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), siendo esto plausible incluso al considerar el uso de otro modelo urbano. El modelo SLEUTH se ejecutó inicialmente para la ZMCM. Sin embargo, al notar las diferencias en el crecimiento de cada municipio, se decidió dividir el área en secciones. Esto permitió un ajuste más preciso del modelo, considerando la complejidad y dinámica específica de cada zona. Los modelos de crecimiento urbano presentan desafíos significativos al tratar de simular la compleja dinámica de los sistemas urbanos. Algunas otras limitaciones están relacionadas con la heterogeneidad y complejidad inherentes a la dinámica urbana. En este estudio, se observó que el nivel de ajuste a los datos históricos fue relativamente bajo. Por lo tanto, al abordar la complejidad de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), se decidió dividir la región en trece subregiones. Esta subdivisión permitió una calibración más precisa y detallada del modelo. Por lo cual se deben de tener en cuenta este tipo de aspectos al ejecutar el modelo.

El modelo SLEUTH ofrece la ventaja de ser una plataforma de código abierto que permite mejoras progresivas. Estas mejoras pueden centrarse en aspectos como la calibración, que depende de la forma en que el usuario configura los parámetros y la calidad de los datos de

entrada, entre otros factores. Una limitación adicional del modelo SLEUTH se relaciona con los requisitos de capacidad de cómputo necesarios para llevar a cabo las proyecciones de crecimiento urbano.

Otra limitación de SLEUTH es que no modela sucesiones ni agricultura, y presenta restricciones en cuanto a la aproximación en la creación de escenarios. Otro aspecto crucial a considerar es el procesamiento de grandes cantidades de datos y la limitada resolución espacial de SLEUTH, lo que solo permite visualizar la infraestructura construida sin proporcionar detalles sobre el sistema intraurbano. Este nivel de análisis es esencial para comprender mejor una ciudad y sus componentes particulares, como las zonas industriales, residenciales, comerciales, entre otras. Por lo tanto, se recomienda conocer los diferentes modelos que también puedan proporcionar diversas herramientas para modelar el crecimiento urbano. Por ejemplo, Dinámica EGO que es un entorno de modelación con el que se pueden hacer simulaciones probabilísticas en las que se combinan la probabilidad de cambio entre distintos tipos de uso de suelo con probabilidades locales de transición.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que algunas limitaciones de las herramientas de modelación aquí presentadas también se relacionan con los datos de entrada de carbono utilizados para inicializar el modelo InVEST. En este caso, al llevar a cabo este estudio, se utilizó la serie VI del mapa de uso de suelo y vegetación del INEGI, ya que en ese momento la serie VII aún no había sido publicada. Esto no invalida el proyecto, ya que uno de los objetivos fundamentales es identificar áreas prioritarias. Esto no implica que los cambios carezcan de importancia o sean insignificantes. Al realizar la superposición entre las series VI y VII, se observa que en la gran mayoría de las áreas destinadas al suelo de conservación se han producido modificaciones en las categorías de uso del suelo y vegetación. Sin embargo, estos cambios representan generalmente una reducción del área que varía del 1% al 4%. Se debe destacar que el uso del suelo, como la agricultura de riego anual y la agricultura de temporal anual, presentaron una reducción significativa del área, oscilando entre el 9% y el 12%. También se observó un aumento en el área de asentamientos humanos. Cabe mencionar que los cuerpos de agua utilizados en este estudio provienen del mapa de uso de suelo y vegetación serie VI, dentro del polígono de la Ciudad de México, se identificó la presencia de siete cuerpos de agua, la extensión mínima abarca 11.21 hectáreas, mientras que la máxima alcanza las 278.14 hectáreas, por lo cual nos ayuda a

realizar una aproximación de los cuerpos de agua que probablemente puedan llegar a perderse para los próximos años. Es importante tener en cuenta que, en cualquier investigación científica, la utilización de información actualizada es siempre preferible, dependiendo de los objetivos establecidos.

Así mismo, en esta investigación se recopiló información proveniente de la literatura sin llevar a cabo un estudio de campo que permitiera obtener las características físicas del sitio. Por lo cual, se generalizó la información obtenida para las zonas sin datos de carbono. Se considera que existen zonas donde hace falta información de campo referente a la cantidad de carbono almacenado, como la Sierra de Guadalupe ubicada al norte de la CDMX en la alcaldía Gustavo A. Madero, en donde se cuenta con pocos datos de campo PAOT (2010). Por lo tanto, para estudios futuros es necesario considerar muestreos y datos exclusivamente de la zona para lograr una mayor precisión y reducir el sesgo.

Cabe mencionar que la información disponible acerca del almacenamiento de carbono por cada reservorio es muy limitada, pero no por ello es menos importante, ya que las fuentes de donde se obtuvo la información pudieron dar soporte a la elaboración de este proyecto, lo cual permite establecer y poner en práctica acciones encaminadas hacia la restauración y protección de los servicios ecosistémicos presentes en el SC.

En esta investigación, el acoplamiento del modelo de simulación de crecimiento urbano con el modelo de almacenamiento y captura de carbono resultó una herramienta útil para evaluar los cambios espaciales y temporales en los servicios ecosistémicos bajo múltiples escenarios (Chaudhuri y Clarke, 2013). El crecimiento urbano puede tener repercusiones sobre los servicios ecosistémicos, así como sobre el secuestro y almacenamiento de carbono (Sun *et al.*, 2018). Por lo tanto, el acoplamiento de los modelos puede utilizarse para evaluar la calidad del hábitat, la disponibilidad de recursos hídricos, acciones específicas destinadas a conservar o mejorar el equilibrio ecológico, así como para generar proyecciones de futuros alternativos con un mínimo requisito de recursos para su ejecución.

Capítulo 5

Conclusiones

En este estudio se utilizaron los modelos InVEST y SLEUTH para analizar y simular los cambios temporales y espaciales en el almacenamiento y secuestro de carbono del Suelo de Conservación (SC) de la Ciudad de México (CDMX) debido al crecimiento urbano proyectado para los años 2030, 2040, 2050 y 2060 en tres escenarios. Los resultados del estudio constataron la eficacia de acoplar el modelo InVEST y SLEUTH para evaluar los posibles efectos del crecimiento urbano sobre la captura y el almacenamiento de carbono en el ecosistema bajo diferentes escenarios. Entre todos los escenarios 2014-2060, el escenario ECR se destaca por su mayor enfoque en la protección de los SE. Este enfoque se traduce en una estrategia destinada a mejorar el almacenamiento y la captura de carbono orgánico, lo que, a su vez, contribuye a reducir significativamente la pérdida de SC. Si bien es evidente que el nombre del escenario ECR sugiere una menor urbanización, es esencial destacar que la variación en el impacto entre los distintos escenarios es crucial. En comparación con los escenarios EST y ESR, donde se plantean estrategias que abordan la conservación y el crecimiento urbano, respectivamente, el escenario ECR muestra un enfoque equilibrado que prioriza la protección de las áreas de conservación y, al mismo tiempo, permite un desarrollo más controlado. Por lo tanto, es importante considerar la variabilidad en los impactos al evaluar y planificar el crecimiento urbano en el futuro. El crecimiento urbano mostró una tendencia a expandirse hacia las áreas periféricas de la ciudad, concentrándose especialmente en el sur de la misma, abarcando principalmente las alcaldías de Tlalpan, Xochimilco,

Tláhuac y Milpa Alta en los escenarios EST y ESR durante el período 2014-2060. Cabe destacar que para el último periodo proyectado 2050 y 2060, se observó un crecimiento urbano con una marcada ocupación de áreas previamente destinadas a la agricultura, áreas de coníferas y pastizales. La mayor parte de la urbanización se concentró en tierras de cultivo. De 2014 a 2060, se proyectó la pérdida de carbono orgánico total causada por el crecimiento urbano la cual fue aumentando gradualmente. Se espera que el almacenamiento de carbono en el SC disminuya aún más para 2060 sobre todo en ESR por ello se esperaría que las políticas e instrumentos de ordenamiento territorial sean aplicados de manera efectiva. Una de las estrategias que se podrían poner en marcha para evitar que esto pase, es garantizar el cumplimiento de las regulaciones existentes para prevenir la expansión urbana no planificada. Además, fomentar la colaboración interinstitucional entre las dependencias gubernamentales, instituciones académicas y la sociedad civil es fundamental. Un ejemplo de esta colaboración es la iniciativa Bosque de Agua, que promueve una visión regional que involucra a las tres entidades que están experimentando un crecimiento urbano significativo: la CDMX, el Estado de México y Morelos.

Apéndice A

Datos de almacenamiento de carbono

Tabla A1. Principales estudios de estimación de contenido de carbono (MgC/ha) en cuatro reservorios.

Tipo de vegetación	C-superficial	C-subterráneo	C-suelo	C-muerta	Error Estándar	Desv. Est.	Fuente
Agricultura	0.00	0.00	46.10	0.00		35.60	Vela Correa <i>et al.</i> , 2012.
	0.00	0.00	107.30	0.00			González <i>et al.</i> , 2015.
	0.00	0.00	103.30	0.00			González <i>et al.</i> , 2015.
	0.00	0.00	110.00	0.00			González <i>et al.</i> , 2015.
	0.00	0.00	72.70	0.00			González <i>et al.</i> , 2015.
	6.76	0.00	0.00	0.00			PAOT, 2010.
	1.35	0.00	0.00	0.00			PAOT, 2010.
	0.00	0.00	90.00	0.00		0.10	Vela Correa <i>et al.</i> , 2012.
	5.49	0.00	0.00	0.00			Almazán, 2013.
	27.38	1.13	0.00	0.61			Requena <i>et al.</i> , 2012.
	41.80	13.60	108.90	1.13			Requena <i>et al.</i> , 2012.
	0.00	0.00	32.90	0.00			Mata, E., 2019.
	0.00	0.00	42.60	0.00			Mata, E., 2019.
	24.70	0.00	0.00	0.00			Marcos, 2016.
	26.40	0.00	0.00	0.00			Marcos, 2016.
	34.30	0.00	0.00	0.00			Marcos, 2016.
	19.20	0.00	113.10	1.60			Requena <i>et al.</i> , 2012.
0.00	0.00	32.90	0.00			Ospina-Noreña <i>et al.</i> , 2010.	
0.00	0.00	42.60	0.00			Ospina-Noreña <i>et al.</i> , 2010.	
Coníferas	93.41	0.00	0.00	0.00			PAOT, 2010.
	0.00	0.00	145.60	0.00		28.50	Vela Correa <i>et al.</i> , 2012.
	51.26	0.00	0.00	0.00			Almazán, 2013.
	46.95	0.00	0.00	0.00			PAOT, 2010.
	0.00	0.00	119.40	0.00		37.30	Vela Correa <i>et al.</i> , 2012.
	39.21	0.00	0.00	0.00			Almazán, 2013.
	95.49	0.00	0.00	0.00	24.51		Galeana-Pizaña <i>et al.</i> , 2013.
	162.91	0.00	0.00	0.00	16.69		Galeana-Pizaña <i>et al.</i> , 2013.
	162.91	0.00	0.00	0.00			Galeana-Pizaña <i>et al.</i> , 2013.
	95.49	0.00	0.00	0.00			Galeana-Pizaña <i>et al.</i> , 2013.
	144.07	0.00	0.00	0.00			CORENA, 2001
	207.98	0.00	0.00	0.00			Valenzuela, 2001
	58.00	0.00	0.00	0.00			Nava, 2006
	21.21	0.00	0.00	0.00	5.62		Galeana-Pizaña <i>et al.</i> , 2013.
	47.37	0.00	0.00	0.00	5.64		Galeana-Pizaña <i>et al.</i> , 2013.
	47.37	0.00	0.00	0.00			Galeana-Pizaña <i>et al.</i> , 2013.
	21.21	0.00	0.00	0.00			Galeana-Pizaña <i>et al.</i> , 2013.
	57.61	0.00	0.00	0.00			CORENA 2001.
	44.00	0.00	0.00	0.00			Espinoza 2005.
	0.00	0.00	155.01	0.00			Mata, E., 2019.
	0.00	0.00	127.75	0.00			Mata, E., 2019.
	237.00	43.00	0.00	16.00			Bolaños <i>et al.</i> , 2017.
	33.22	9.36	0.00	0.00			Santini <i>et al.</i> , 2019.
	118.00	19.00	120.00	5.03			Requena <i>et al.</i> , 2012.
	118.00	19.00	120.00	5.03			Requena <i>et al.</i> , 2012.
	33.22	9.36	0.00	0.00			Santini <i>et al.</i> , 2019.
0.00	0.00	155.01	0.00			Ospina-Noreña <i>et al.</i> , 2010.	
0.00	0.00	127.75	0.00			Ospina-Noreña <i>et al.</i> , 2010.	
0.00	0.00	155.20	0.00			Ospina-Noreña <i>et al.</i> , 2010.	

Continuación cuadro 1...

Tipo de vegetación					Error	Desv.	Fuente
	C-superficial	C-subterráneo	C-suelo	C-muerta	Estándar	Est.	
Latifoliadas	0.00	0.00	121.30	0.00		51.10	Vela Correa <i>et al.</i> , 2012.
	0.00	0.00	124.84	0.00			Mata, E., 2019.
	0.00	0.00	169.00	0.00			Paz-Pellat, 2018.
	29.80	14.20	0.00	7.62			Requena <i>et al.</i> , 2012.
	0.00	0.00	56.45	0.00			Santini <i>et al.</i> , 2019.
	17.99	5.44	0.00	0.00			Santini <i>et al.</i> , 2019.
	0.00	0.00	124.84	0.00			Ospina-Noreña <i>et al.</i> , 2010.
Coníferas y Latifoliadas	83.31	16.50	0.00	0.31			Requena <i>et al.</i> , 2012.
	0.00	0.00	65.83	0.00		62.35	Paz <i>et al.</i> , 2016.
	0.00	0.00	60.16	0.00		51.46	Paz <i>et al.</i> , 2016.
	0.00	0.00	69.00	0.00			Paz-Pellat, 2018.
	0.00	0.00	376.00	0.00			Paz-Pellat, 2018.
	0.00	0.00	61.00	0.00			Paz-Pellat, 2018.
	83.31	16.50	0.00	0.31			Requena <i>et al.</i> , 2012.
	26.72	7.71	0.00	0.00			Santini <i>et al.</i> , 2019.
	0.00	0.00	63.77	0.00			Santini <i>et al.</i> , 2019.
	25.12	0.00	0.00	0.00	2.63	0.34	CONAFOR, 2018.
	0.00	0.00	122.00	0.00			Paz-Pellat, 2018.
	25.12	0.00	0.00	0.00	2.63	0.34	CONAFOR, 2018.
	23.34	0.00	0.00	0.00	4.68		CONAFOR, 2018.
	23.34	0.00	0.00	0.00	4.68		CONAFOR, 2018.
135.00	0.00	151.00	0.00			Ordoñez <i>et al.</i> , 2001.	
Pastizal	6.76	0.00	0.00	0.00			PAOT, 2010.
	5.49	0.00	0.00	0.00			Almazán, 2013.
	5.49	0.00	0.00	0.00			Almazán, 2013.
	0.00	0.00	87.00	0.00			Paz-Pellat, 2018.
	10.10	2.50	113.10	1.60			Requena <i>et al.</i> , 2012.
	0.00	0.00	90.00	0.00			Ospina-Noreña <i>et al.</i> , 2010.
Matorral	8.48	0.00	0.00	0.00			PAOT, 2010.
	0.00	0.00	111.70	0.00		49.10	Vela Correa <i>et al.</i> , 2012.
	0.00	0.00	104.33	0.00			Mata, E., 2019.
	5.49	0.00	0.00	0.00			Almazán, 2013.
	0.00	0.00	32.11	0.00		27.92	Paz et al, 2016.
	0.00	0.00	38.76	0.00		26.92	Paz et al, 2016.
	0.00	0.00	149.00	0.00			Paz-Pellat, 2018.
	0.00	0.00	42.00	0.00			Paz-Pellat, 2018.
	0.00	0.00	142.00	0.00			Paz-Pellat, 2018.
	0.00	0.00	40.00	0.00			Paz-Pellat, 2018.
	0.00	0.00	104.33	0.00			Ospina-Noreña <i>et al.</i> , 2010.

Apéndice B

Mapas

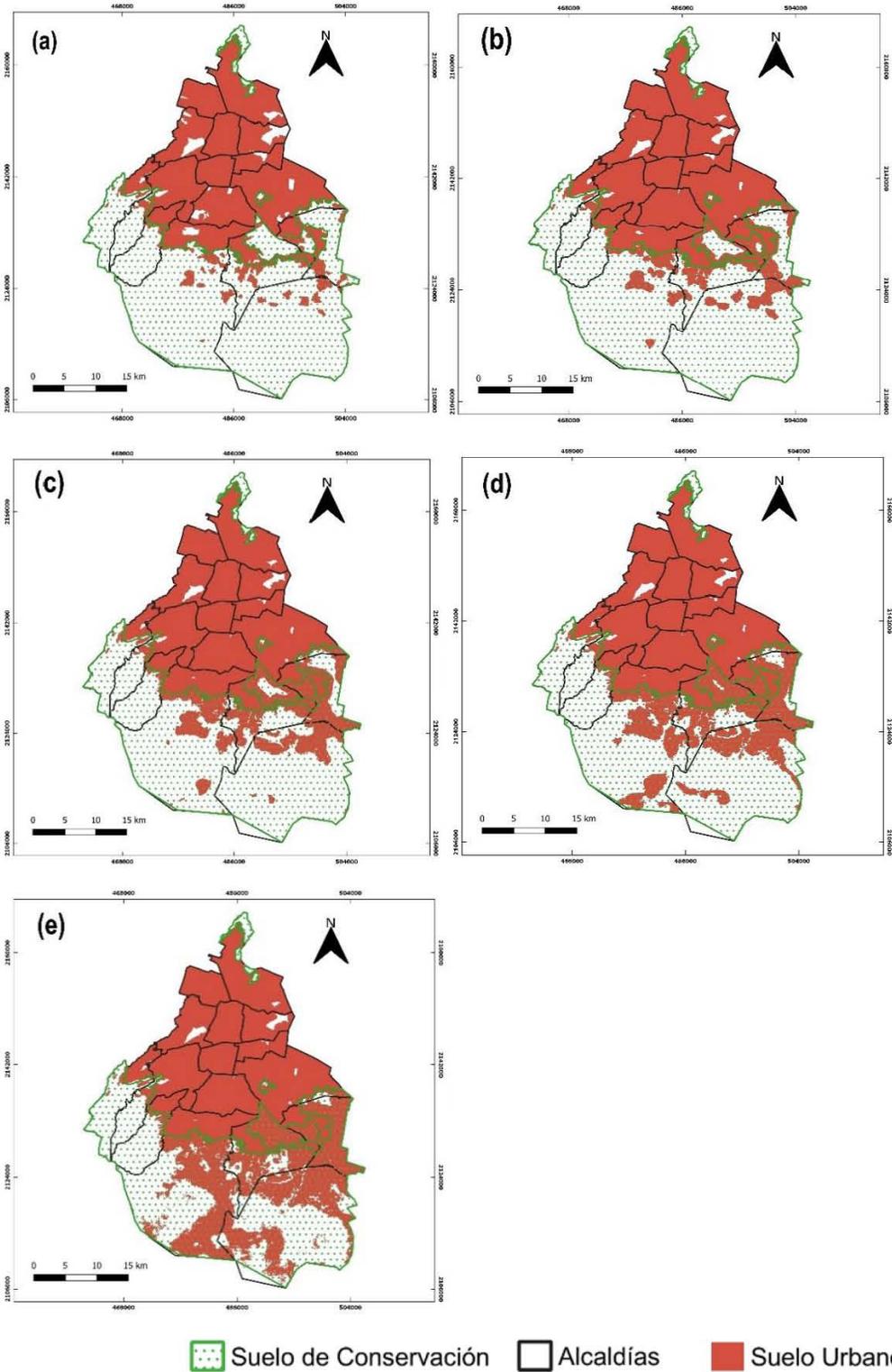


Figura B.1. En la figura (a), se representa el área urbana correspondiente al período histórico en 2014. Las figuras (b) a (e) muestran los escenarios sin restricciones (ESR) proyectados hasta 2060: (b) ESR 2030, (c) ESR 2040, (d) ESR 2050 y (e) ESR 2060.

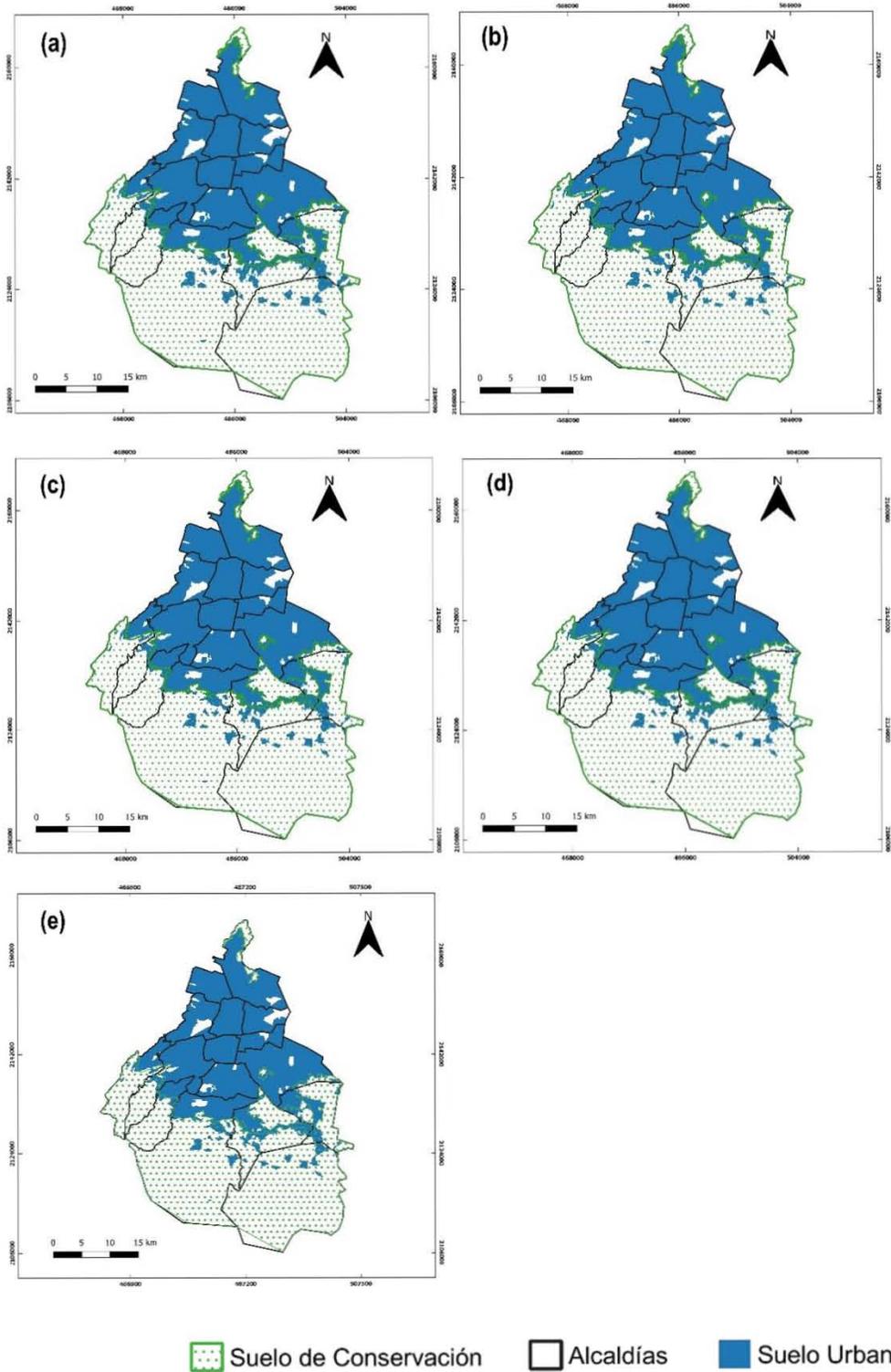


Figura B.2. En la figura (a), se representa el área urbana correspondiente al período histórico en 2014. Las figuras (b) a (e) muestran los escenarios con restricciones (ECR) proyectados hasta 2060: (b) ECR 2030, (c) ECR 2040, (d) ECR 2050 y (e) ECR 2060.

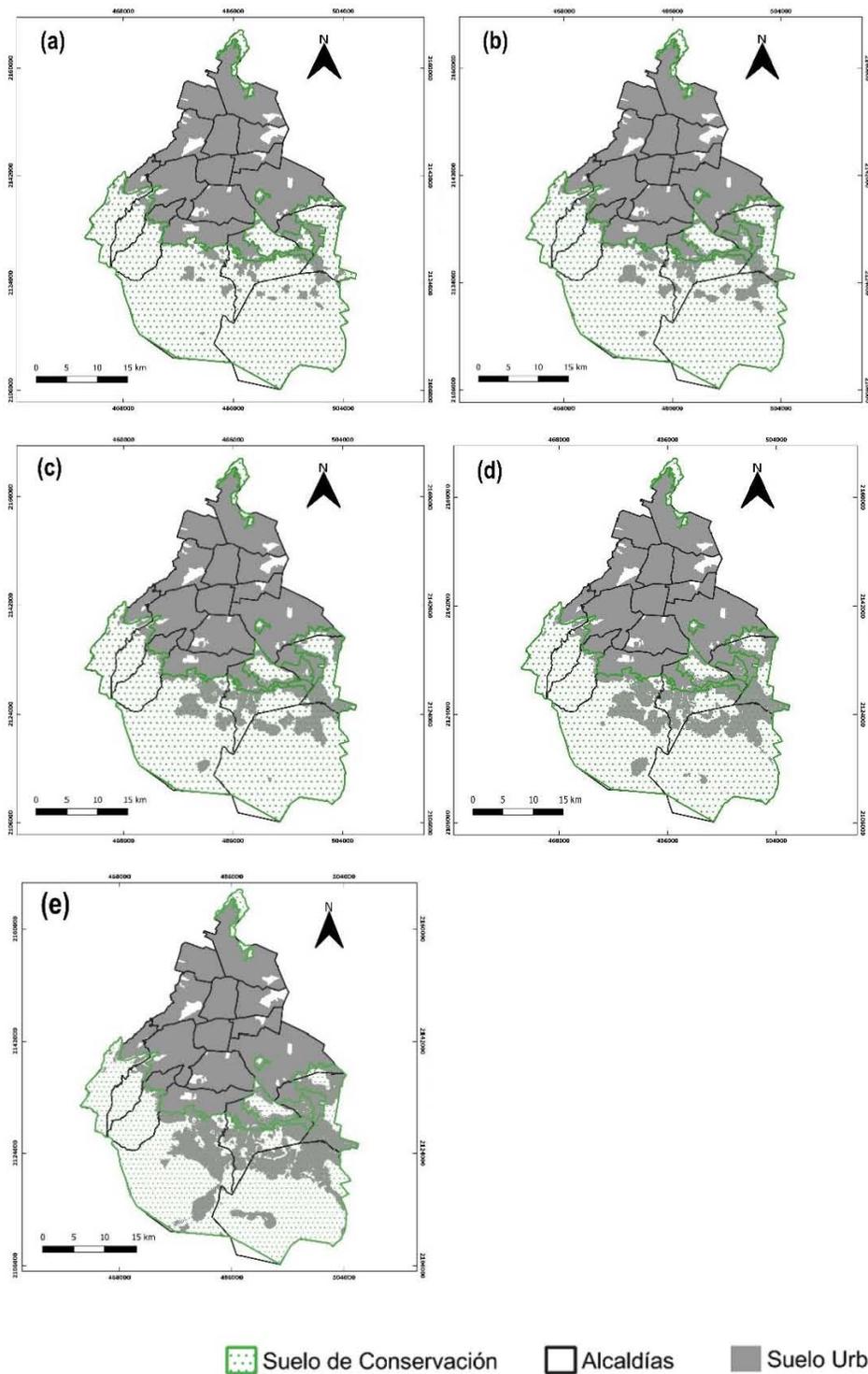


Figura B.3. En la figura (a), se representa el área urbana correspondiente al período histórico en 2014. Las figuras (b) a (e) muestran los escenarios tendenciales (EST) proyectados hasta 2060: (b) EST 2030, (c) EST 2040, (d) EST 2050 y (e) EST 2060.

Apéndice C

Tablas

Tabla C1. Zonas federales utilizadas para la construcción de la capa de exclusión de SLEUT.

Zonas federales
Bosque de Aragón
Alameda Central
Zócalo
Depósito de Evaporación Solar el Caracol
Aeropuerto Internacional Benito Juárez
Chapultepec
Ciudad Deportiva Magdalena Mixhuca
Ciudad Universitaria UNAM
Zona Arqueológica de Cuicuilco
Parque Ecológico de Cuicuilco
Terreno atrás de la Universidad Pedagógica Nacional
Bosque de Tláhuac
Humedales de Tláhuac
Centro de alto rendimiento
Heróico Colegio Militar
Reclusorio Preventivo Varonil Sur

Tabla C2. Fuente de donde fue obtenida la información para la construcción de la capa de exclusión de SLEUT.

Capas para la construcción de la capa de exclusión de SLEUTH	
Áreas Verdes	INEGI
Zonas federales	Generado por el usuario
Cuerpos de agua y humedales	CONABIO, INEGI
ANPs municipales	CONABIO
ANPs estatales	CONABIO
ANPs federales	CONANP
Sitios RAMSAR	CONABIO

Bibliografía

- Aguayo, M., Pauchard, A., Azócar, G., & Parra, O. (2009). Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX. Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *Revista Chilena de Historia Natural*, 82(3), 361–374. <https://doi.org/10.4067/s0716-078x2009000300004>
- Aguilar, A. G., Flores, M. A., y Lara, L. F. (2022). Peri-Urbanization and Land Use Fragmentation in Mexico City. Informality, Environmental Deterioration, and Ineffective Urban Policy. *Frontiers in Sustainable Cities*, 4(March), 1–19. <https://doi.org/10.3389/frsc.2022.790474>
- Almazán, J. (2013). *Estimación de almacenamiento de carbono en el suelo de conservación del distrito federal mediante el uso de datos lidar aerotransportado*. 1–88.
- Alberti, M. and Marzluff, J.M. 2004. Ecological resilience in urban ecosystems: linking urban patterns to human and ecological functions. *Urban Ecosystems*, 7: 241-265.
- Alonzo, A., Andrés, L., Vera, G., & Angélica, M. (2010). Perdida De Cobertura Vegetal Como Efecto De La Urbanización En Chetumal, Quintana Roo. *Quivera*, 12(2), 1–19.
- Aquino, V. (2013). *Análisis Espacio-Temporal del Cambio de Uso de Suelo por Expansión Urbana-Migración-Deforestación en el Suelo de Conservación del Distrito Federal* [Centro de Investigación en Geografía y Geomática Ing. Jorge L. Tamayo, A.C. Centro Geo]. <https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1012/18/1/52-2013-Tesis-Aquino Illescas%2C Victor Hugo-Maestro en Geomática.pdf>
- Archer, D. (2011). *The Global Carbon Cycle* (Princeton University Press (ed.)). Princeton University Press. <https://doi.org/10.1515/9781400837076>
- Avalos Jiménez, A., Gómez Delgado, M., Aguilera Benavente, F., & Flores Vilchez, F. (2019). Simulación del crecimiento urbano de la zona metropolitana Tepic-Xalisco, México. *Estudios Geográficos*, 80(287), 021. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201938.018>
- Balvanera, P., Astier, M., Gurri, F. D., & Zermeño-Hernández, I. (2017). Resiliencia, vulnerabilidad y sustentabilidad de sistemas socioecológicos en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 141–149. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.10.005>
- Balvanera, P., y Cotler, H. (2007). Acercamientos al estudio de los servicios ecosistémicos. *Gaceta Ecológica Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales México*, 84–85, 8–15. http://produccionbovina.com/regiones_ganaderas/27-Ecosist_del_Delta-2010.pdf
- Bankes, S. (1993). Exploratory Modeling for Policy Analysis. *Operations Research*, 41(3), 435–449. <https://doi.org/10.1287/opre.41.3.435>
- Boisvenue, C., y Running, S. W. (2006). Impacts of climate change on natural forest productivity - Evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biology*,

- 12(5), 862–882. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01134.x>
- Bortolon, E. S. O., Mielniczuk, J., Tornquist, C. G., Lopes, F., Giasson, É., y Bergamaschi, H. (2012). Potencial de Uso do Modelo Century e SIG para Avaliar o Impacto da Agricultura sobre Estoques Regionais de Carbono Orgânico do Solo. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 36(3), 831–849. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000300014>
- Bottino, R. (2009). La ciudad y la urbanización. *ESTUDIOS HISTORICOS – CDHRP-*, 1–14. <https://doi.org/1688 – 5317>
- Candau, J., Rasmussen, S., y Clarke, K. (2000). A coupled cellular automaton model for land use/land cover dynamics. A coupled cellular automaton model for land use/land cover dynamics. Paper 94, 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modelling (GIS/EM4): problems, prospects and research needs, 94, 2–7. <https://people.geog.ucsb.edu/~kclarke/ucime/banff2000/533-jc-paper.htm>
- Casiano, M., Paz, F., Rojo, M., Covalada, S., & Raj, D. (2017). National Data Base of Carbon in Chronosequences. *Elementos Para Políticas Públicas*, 1, 25–38.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) (2012), Población, territorio y desarrollo sostenible (LC/ L.3475 (CEP.2/4)), Santiago. Disponible a través de: <http://repositorio.cepal.org/handle/11362/22450>
- Civeira, G. (2016). *Servicios ecosistémicos en ambientes urbanos su relación con la estructura, la planificación y el diseño del paisaje*. 208.
- Chaudhuri, G., y Clarke, K. C. (2013). The SLEUTH Land Use Change Model : A Review. *The International Journal of Environmental Resources Research*, 1(1), 88–104.
- Clarke, K. C. (2008). Mapping and Modelling Land Use Change: an Application of the SLEUTH Model. In: Pettit, C., Cartwright, W., Bishop, I., Lowell, K., Pullar, D., Duncan, D. (eds) *Landscape Analysis and Visualisation. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography* (pp. 353–366). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69168-6_17
- Clarke, K. C., Hoppen, S., & Gaydos, L. (1997). *A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area*. En: *Environment and Planning B: Planning and Design* 24.42, págs. 247-261. ISSN: 0265-8135. DOI: 10.1068/b240247. URL: <http://epb.sagepub.com/lookup/doi/10.1068/b240247>.
- Chapin, F. S., Matson, P. A., y Vitousek, P. M. (2011). Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. En *Nucl. Phys.* (2a ed., Vol. 13, Número 1). Springer New York, NY. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9504-9>
- Civeira, G. (2016). *Servicios ecosistémicos en ambientes urbanos: su relación con la estructura, la planificación y el diseño del paisaje*. Tesis de doctorado. Lectura: En la Universidad de Coruña (España) <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=50187>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, (CONABIO) Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal, (SEDEMA). (2016). *La biodiversidad en la Ciudad de México*.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2018). *Inventario Nacional Forestal y de*

- Suelos 2009 - 2014*. [https://snigf.cnf.gob.mx/wp-content/uploads/Resultados Históricos INFyS/2009 - 2014/Informe de resultados/Informe inventario 2009 - 2014.pdf](https://snigf.cnf.gob.mx/wp-content/uploads/Resultados_Históricos_INFyS/2009-2014/Informe_de_resultados/Informe_inventario_2009-2014.pdf)
- Congreso CDMX. (25 de septiembre de 2023). Con proyecto de decreto, por el que se reforma el artículo 16 de la Constitución Política de la Ciudad de México, en materia de clasificación del suelo. Obtenido de Lista de Iniciativas: <https://consulta.congresocdmx.gob.mx/consulta/iniciativa/vista/4798>
- CORENA (Comisión de Recursos Naturales del Distrito Federal). 2001. Estimación del contenido de carbono en la biomasa en el área del suelo de conservación del Distrito Federal. Octubre. Informe Técnico CORENA. 32 p.
- CORENA. (2017). *Programas*. <https://paot.org.mx/centro/programas/suelo-corena.pdf>
- Corona, N. (2016). Modelo espacial y pronóstico de la expansión de la mancha urbana, 1995-2030. En *Tendencias territoriales determinantes del futuro de la Ciudad de México* (Primera ed., pp. 39–83). <http://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1012/222>
- Corona, N., Nuñez, J., Mohar, A. y Ocampo, P. (2015). Hacia una estrategia de políticas públicas para el territorio costero del estado de Yucatán que atienda las presiones de urbanización e infraestructura sobre zonas críticas, desde una perspectiva ambiental y de vulnerabilidad. Centro de Investigación en Geografía y Geomática "Ing. Jorge L. Tamayo" Centro Geo, A.C.
- Cortés, T. (2017). *Análisis y Modelación del Cambio de Cobertura y Uso del Suelo en el Sur de la Ciudad de México de 1990 al 2030*. Centro de Investigación en Geografía y Geomática "Ing. Jorge L. Tamayo" A. C.
- Cram, S., Cotler, H., Morales, L. M., Sommer, I., & Carmona, E. (2008). Identification of the potential soil environmental services in the urban landscape of Mexico City. *Investigaciones Geográficas*, 66(5000), 81–104. <https://doi.org/10.14350/rig.17983>
- Cruz, M. (2000). Crecimiento urbano y poblamiento en la ZMCM. El perfil del nuevo milenio. *El Cotidiano*, 17(103),43-53.[fecha de Consulta 15 de Septiembre de 2021]. ISSN: 0186-1840. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=32510304>
- Das, M., & Das, A. 2019. Dynamics of Urbanization and its impact on Urban Ecosystem Services (UESs): A study of a medium size town of West Bengal, Eastern India. *Journal of Urban Management*, 8(3), 420–434.
- Delgadillo Polanco, M. (2012). El derecho a la ciudad en la Ciudad de México. ¿Una retórica progresista para una gestión urbana neoliberal? *Andamios , Revista de Investigación Social*, 9(18), 117–139. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=6282332600>
- Dietzel, Charles y Keith C Clarke (2007). Toward Optimal Calibration of the SLEUTH Land Use Change Model. En: *Transactions in GIS* 11.1, págs. 29-45. ISSN: 1365-8816. DOI: <https://escholarship.org/uc/item/0r75311t>. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1467-9671.2007.01031.x/full%5Cnhttp://www.escholarship.org/uc/item/0r75311t> %

5Cngeomatricsksa . com / GTC2011 / S4 / PDF / 2 . pdf ? %5Cnhttp :
//dx.doi.org/10.1080/13658810210157769%5Cnhttp://www.int-archphotogramm-
remote-sens.

- Dinamica EGO. (2022). *What is Dinamica EGO?* <https://www.csr.ufmg.br/dinamica>
- Dirección de Ordenamiento Ecológico del Territorio y Manejo Ambiental del Agua. (2016). *Suelo de Conservación*.
- Dixon, R. K., Brown, S., Houghton, R. A., Solomon, A. M., Trexler, M. C., y Wisniewski, J. (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263(5144), 185–190. <https://doi.org/10.1126/science.263.5144.185>
- Eakin, H., Bojórquez-Tapia, L. A., Janssen, M. A., Georgescu, M., Manuel-Navarrete, D., Vivoni, E. R., Escalante, A. E., Baeza-Castro, A., Mazari-Hiriart, M., y Lerner, A. M. (2017). Urban resilience efforts must consider social and political forces. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(2), 186–189. <https://doi.org/10.1073/pnas.1620081114>
- ECOBA, 2012. Estrategia Regional para la Conservación del Bosque de Agua. J. Hoth (Editor). Fundación Gonzalo Río Arronte, I.A.P., Fundación Biósfera del Anáhuac, A.C. y Pronatura México, A.C. México. 85 pp.
- Espinel Ponce, D. I. (2017). *Valoración económica del secuestro y almacenamiento del carbono en la cuenca del Río Coca mediante el uso de software Invest para los escenarios propuestos por el proyecto TEEB-Ecuador*. 1–137.
- Espinoza, M. 2005. Estimación del contenido y captura de carbono en el bosque de *Pinus hartwegii* de la cuenca alta del río Magdalena, Magdalena Contreras, D.F. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. México. 72p.
- FAO. (2002). Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informe sobre recursos mundiales de suelos No. 96. En *Fao*.
http://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=OKZt9agfRksC&oi=fnd&pg=PR3&dq=CAPTURA+DE+CARBONO+EN+LOS+SUELOS+PARA+UN+MEJOR+MANEJO+DE+LA+TIERRA&ots=5xOjDqvtWf&sig=c9-6h5Q4W_qU0xBHudD4IqchYyc
- Ferreira, B. M., Soares-Filho, B. S., y Pereira, F. M. Q. (2019). The Dinamica EGO virtual machine. *Science of Computer Programming*, 173, 3–20. <https://doi.org/10.1016/j.scico.2018.02.002>
- Fischer, R., Bohn, F., Dantas de Paula, M., Dislich, C., Groeneveld, J., Gutiérrez, A. G., Kazmierczak, M., Knapp, N., Lehmann, S., Paulick, S., Pütz, S., Rödig, E., Taubert, F., Köhler, P., y Huth, A. (2016). Lessons learned from applying a forest gap model to understand ecosystem and carbon dynamics of complex tropical forests. *Ecological Modelling*, 326, 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.11.018>
- Foley, Jonathan A. et al. (2005). «Global consequences of land use». En: *Science* 309.5734, págs. 570-574. issn: 00368075. doi: 10.1126/science.1111772.
- Galeana-Pizaña, J.M., N. Corona-Romero y J.A.B. Ordóñez-Díaz. 2013. Estimación de contenido de carbono en la cuenca del río Magdalena, México. *Madera y Bosques* 19(1):53-69.

- Galeana, J. (2008). *Estimación del contenido y captura potencial de carbono, su valoración económica, en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Galicia, L., Gamboa Cáceres, A. M., Cram, S., Vergara, B. C., Ramírez, V. P., Saynes, V., & Siebe, C. (2016). Stocks and dynamics of soil organic carbon in temperate forests of Mexico. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 1–29.
- Gallardo, J. F., y Merino, A. (2007). El Ciclo del Carbono y la Dinámica de los Sistemas Forestales. *El papel de los bosques españoles en la mitigación del cambio climático*, 1, 43–64.
- García-Feria, Y., García-Loeza, S., Farías-González, V., Campos-Morales, R., Martínez-Molina, U., Martínez-Molina, G., García-Loeza, D., Teles, D., Ruíz Cortés, M., y Zugasti, A. (2022). Monitoreo biológico comunitario del conejo zacatuche (*Romerolagus diazi*) en el Bosque de Agua de Milpa Alta, Ciudad de México. En T. G. M. Víctor Ávila Akerberg (Ed.), *Científicos y Sociedad en Acción por la Biodiversidad y la Sustentabilidad del Bosque de Agua de la Megalópolis de México* (pp. 145–152).
- GeoSOS. (2021). *Geographical Simulation and Optimization Systems(GeoSOS)*. <http://www.geosimulation.cn/index.html>
- Gobierno del Distrito Federal (GDF). (2006). *Programa estratégico forestal del distrito federal (pef-df) 2006 - 2025*. 2006–2025.
- Gil, B. (2023). *La Función Social de la Propiedad en la Solución de los Conflictos Agrarios Derivados de los Procesos de Urbanización en la Alcaldía Cuajimalpa de la Ciudad de México, de 1985 a 2021*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- González, M., & Rojas, H. (2013). Predicción y modelación del crecimiento urbano de Ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua del 2010, usando autómatas celulares (SLEUTH). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*.
- González, A. (2016). *Las chinampas: patrimonio mundial de la Ciudad de México*.
- Gorte, R. W. (2010). (2010). Carbon Sequestration in Forests. En: Carnell R (ed.). *En The Role of Forests in Carbon Capture and Climate Change*.
- Grigio, A. M., Amaro, V. E., Diodato, M. A., y Castro, A. F. (2009). Landscape simulation of piranhas-assu river (Rio Grande do Norte State, Brazil), from 1988 to 2024, making use of cell automata in spatial dynamic models for simulation of future scenarios. *Journal of Coastal Research, SPEC. ISSUE 56*, 1508–1512.
- Groves, D. G., y Lempert, R. J. (2007). A new analytic method for finding policy-relevant scenarios. *Global Environmental Change*, 17(1), 73–85. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.11.006>
- Güiza, F., Simmons, P., Pola-Villaseñor, S., y McCall, M. (2018). Relaciones de Poder y Fallo Institucional. Vulnerabilidad a Desastres en Dos Ciudades Mexicanas Medias. *Procesos periurbanos: desequilibrios territoriales, desigualdades sociales, ambientales y pobreza*, 1, 89–114. www.ciga.unam.mx/publicaciones/

- Haase, D., Larondelle, N., Andersson, E., Artmann, M., Borgström, S., Breuste, J., & Kabisch, N. 2014. A quantitative review of urban ecosystem service assessments: concepts, models, and implementation. *Ambio*, 43: 413-433.
- Hoth, J. (2022). Prólogo. En V. Ávila Akerberg y T. González Martínez (Coords.), *Científicos y Sociedad en Acción por la Biodiversidad y la Sustentabilidad del Bosque de Agua de la Megalópolis de México* (pp. 3-4). Editorial.
- INEGI. (2001). *Diccionario de datos del ambito urbano (Vectorial) Sistema Nacional de Información Geográfica*. www.inegi.gob.mx
- INEGI (2012) Modelo de Elevacion digital. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI, (16/12/2016). 'Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI (Capa Union)', escala: 1:250 000. edición: 1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021). *Censo de Población y Vivienda 2020*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ccpv/2020/doc/Censo2020_Principales_resultados_ejecutiva_EUM.pdf
- INFONAVIT, ONU-HABITAT, (2018). *Informe CPI Extendido: Aglomeración Urbana de la Ciudad de México*. https://publicacionesonuhabitat.org/onuhabitatmexico/cpi/extendidos/CDMX_web.pdf
- IIUNAM (Instituto de Ingeniería, & UNAM). (2014). *Geología general de la zona*. 45–66. http://www.aeropuerto.gob.mx/doc/transicion/respuestas/Anexo4/3_Geologia_general_de_la_zona.pdf
- INAFED (Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal). (2010). *Medio Físico - Distrito Federal*. <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM09DF/mediofisico.html>
- Inostroza, L., Garay, H., & Pérez, G. (2020). *Servicios Ecosistémicos Urbanos en Latinoamérica, Oportunidades para el Desarrollo Urbano Sostenible, la Acción Climática y la Gestión de la Biodiversidad Urbana*. 57(1), 1–17.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. En *Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/446727a>
- IPDP. (25 de septiembre de 2023). Proyecto del Plan General de Desarrollo. Obtenido de Instituto de Planeación Democrática y Prospectiva CDMX: <https://ipdp.cdmx.gob.mx/PGD>
- Iracheta, A. (2015). Ciudad Informal y Precaria: la Otra Cara de la Urbanización Mexicana. En G. Olivera (Ed.), *La Urbanización social y Privada del Ejido. Ensayos Sobre la Dualidad del Desarrollo Urbano en México* (1a ed., pp. 19–73). <http://www.libros.unam.mx/digital/V9/44.pdf>
- Jantz, C. A., Goetz, S. J., y Shelley, M. K. (2004). Using the Sleuth Urban Growth Model to

- Simulate the Impacts of Future Policy Scenarios on Urban Land Use in the Baltimore-Washington Metropolitan Area. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(2), 251–271. <https://doi.org/10.1068/b2983>
- Jaramillo, V. (2004). El ciclo global del carbono. En *Cambio Climático: Una Visión Desde México* (1a ed., pp. 76–84).
- Jiménez López, E., Garrocho Rangel, C., & Chávez Soto, T. (2021). Autómatas Celulares en Cascada para modelar la expansión urbana con áreas restringidas. In *Estudios Demográficos y Urbanos* (Vol. 36, Issue 3). <https://doi.org/10.24201/edu.v36i3.1997>
- Joaqui Daza, S., y Figueroa Casas, A. (2014). Factores que determinan la resiliencia socio-ecológica para la alta montaña andina. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(25), 45–53. <https://doi.org/10.22395/rium.v13n25a3>
- Kull, S. J., Rampley, G. J., Morken, S., Metsaranta, J., Neilson, E. T., y Kurz, W. A. (2019). *Operational - Scale Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector (CBM-CFS3) USER'S GUIDE*.
- Kurz, W. A., Birdsey, R. A., Mascorro, V. S., Greenberg, D., Dai, Z., Olguin, M., y Colditz, R. (2016). Modelización y evaluación integradas de la dinámica del carbono forestal en América del Norte: herramientas para monitorear, registrar en informes y proyectar emisiones y remociones de gases de efecto invernadero en el sector forestal. En *Comisión para la Cooperación Ambiental*. <http://www.monitoreoforestal.gob.mx/repositorioidigital/files/original/1a22e8a13a16aa318159657c1d9cf5ff.pdf>
- La Jornada (2021). Formalizarán la regularización de 21 asentamientos en Tlalpan. 10-ene-2023, de La Jornada Sitio web: <https://www.jornada.com.mx/notas/2021/10/09/capital/formalizaran-la-regularizacion-de-21-asentamientos-en-tlalpan/>
- La Jornada (2021). Propone PT regularizar asentamientos irregulares en Xochimilco. 10-ene-2023, de La Jornada Sitio web: <https://www.jornada.com.mx/notas/2021/04/15/capital/propone-pt-regularizar-predios-de-paracaidistas-en-xochimilco/>
- Leyva-Pablo, T., Bautista-Cruz, A., Zornoza-Belmonte, R., De León-González, F., Martínez-Gallegos, V., Fuentes-Ponce, M., y Rodríguez-Sánchez, L. (2015). Dinámica del carbono y actividades enzimáticas en bosque, maíz y nopal en el Suelo de Conservación del Distrito Federal. *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2015. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad en el Sureste, A.C y el Centro Internacional de Vinculac*, 79–86.
- Llamas-Torres, I. (2018). *Sistemas socio-ecológicos ¿Sistemas qué? I*. 70, 66–70. http://www.cicy.mx/sitios/desde_herbario/
- Li, X., y Gong, P. (2016). Urban growth models: progress and perspective. *Science Bulletin*, 61(21), 1637–1650. <https://doi.org/10.1007/s11434-016-1111-1>
- Linares, S., & Clarke, K. (2018). *Simulación del crecimiento urbano de la ciudad de Tandil*

- (Argentina) aplicando el modelo SLEUTH. December.
- López, A. R. (2009). *El Suelo de Conservación de la Delegación Xochimilco Frente a los Asentamientos Irregulares como Expansión Urbana. Análisis con Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- López-García, J., y Navarro-Cerrillo, R. M. (2021). Changes in the constituents of the “Bosque de Agua” of the Sierra Cruces-Ajusco-Chichinautzín, Mexico, an area with payment for environmental services. *Environmental Earth Sciences*, 80(20). <https://doi.org/10.1007/s12665-021-10025-w>
- Lorenz, K., y Lal, R. (2010). Carbon sequestration in forest ecosystems. En *Carbon Sequestration in Forest Ecosystems* (pp. 1–277). <https://doi.org/10.1007-978-90-481-3266-9>
- Lu, C., Kotze, D. J., y Setälä, H. M. (2020). Soil Sealing Causes Substantial Losses in C and N Storage in Urban Soils Under Cool Climate. *Science of the Total Environment*, 725, 138369. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138369>
- Márquez, B. (2008). *Análisis y simulación del crecimiento urbano utilizando sistemas de información geográficos: Ciudad Juárez, Chihuahua*. May. *Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, 25, 168–189. <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.25.2019.3368>
- Martín-Chivelet, J. (2010). Ciclo del carbono y clima: la perspectiva geológica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 18.1, 33–46.
- Mata, E. (2019). Estimación del Costo Social y Ambiental de la Pérdida Forestal en el Suelo de Conservación de la Ciudad de México. *El Semestre de las Especializaciones*, 1(1), 186–206. https://www.depfe.unam.mx/especializaciones/revista/1-1-2019/08_EAE_Mata-Guel_2019.pdf
- McDonald, R. I., Marcotullio, P. J., y Güneralp, B. (2013). Urbanization and Global Trends in Biodiversity and Ecosystem Services. En D. Springer (Ed.), *Urbanization, biodiversity and ecosystem services: Challenges and opportunities : A Global Assessment*. (pp. 31–52). https://doi.org/DOI.10.1007/978-94-007-7088-1_3,
- Mendoza Cota, J. E. (2003). Especialización manufacturera y aglomeración urbana en las grandes ciudades de México. *Economía Sociedad y Territorio*, IV, 95–126. <https://doi.org/10.22136/est002003329>
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- Miquelajauregui, Y. (2013). Modelos de simulación de la dinámica del carbono. En J.A. Blanco (Ed.). *Aplicaciones de modelos ecológicos a la gestión de recursos naturales*. (pp. 15-38). Barcelona: OmniaScience.
- Mladenoff, D. J. (2004). LANDIS and forest landscape models. *Ecological Modelling*, 180(1), 7–19. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.03.016>
- Mollá, M. (2006). El crecimiento de los asentamientos irregulares en áreas protegidas. La delegación Tlalpan. *Investigaciones Geográficas*, 60, 83–109.
- Montejano, Jorge Monkkonen, Paavo Guerra, Erick Alberto, Caudillo Ortiz-Chao, Claudia Anzaldo, Carlos Guzmán, Ulises Navarro, Patricia Solís, Norma Giottonini Badilla, M.

- (2017). *Densidad, Diversidad y Policentrismo: ¿planeando ciudades más sustentables?*
<https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>
- Naciones Unidas (ONU) (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe* (LC/G.2681-P/Rev.3), Santiago.
- Naciones Unidas. (2023). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/#tab-8dd6cb9078e4c78159c>
- NatCap. (2020). *InVEST | Natural Capital Project*.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2019). *Carbon cycle*.
<https://www.noaa.gov/education/resource-collections/climate/carbon-cycle>
- Nava, M. 2005. Carbono almacenado como servicio ecosistémico y criterios de restauración en el bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del río Magdalena, D.F., México. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. 70 p.
- NCGIA. (2023). *Project Gigalopolis*. <http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig/>
- Nowak, D. J., y Crane, D. E. (2002). Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution*, 116(3), 381–389. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00214-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00214-7)
- Olivares, M. (2021). *Un puente vehicular devasta el humedal de Xochimilco*. Nexos.
<https://medioambiente.nexos.com.mx/un-puente-vehicular-devasta-el-humedal-de-xochimilco/>
- Pardos, A. (2016). *El carbono, los ecosistemas forestales y el cambio climático: Un triángulo de relaciones mutuas* (Sociedad Española de Ciencias Forestales (ed.)).
- Parton, W. J. R., McKeown, R., Kirchner, V., y Ojima, D. (1992). *CENTURY User's Manual*. Fort Collins (Colorado S).
- Pathirana, A., Denekew, H. B., Veerbeek, W., Zevenbergen, C., & Banda, A. T. 2014. Impact of urban growth-driven landuse change on microclimate and extreme precipitation. A sensitivity study. *Atmospheric Research*, 138, 59-72.
- Paz, F., Covalada, S., Hidalgo, C., y Etchevers, J. (2016). Modelación simple y operativa de la distribución del carbono orgánico por fracciones físicas en los suelos. *Terra Latinoamericana*, 34(33), 321–337.
- Pereira, P., Inacio, M., Kalinauskas, M., Bogdzevič, K., Bogunovic, I., y Zhao, W. (2022). Land-use Changes and Ecosystem Services. *Mapping and Forecasting Land Use: The Present and Future of Planning*, 1–27. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90947-1.00007-7>
- Perevochtchikova, M., y Torruco, V. M. (2014). Análisis comparativo de dos instrumentos de conservación ambiental aplicados en el Suelo de Conservación del Distrito Federal. *Sociedad y Ambiente*, 1(3), 3–25. <https://doi.org/10.31840/sya.v0i3.994>
- Piret Vacht, Tiiu Koff, Bianka Plüschke-Altöf and Anni Mürripeal, “Ecosystem services of Tallinn city: achievements and challenges”, *Dynamiques environnementales* [Online], 42 | 2018, Online since 01 June 2019, connection on 09 July 2021. URL: <http://journals.openedition.org/dynenviron/2383> ; DOI: <https://doi.org/10.4000/dynenviron.2383>

- PAOT. (2012). Atlas geográfico del suelo de conservación del Distrito Federal.
- PAOT. (1999). *Condiciones Geográficas, Población y Desarrollo Económico del Distrito Federal y Zona Metropolitana*.
<http://www.paot.org.mx/centro/inegi/ambdf/indgeo.html>
- Programa Delegacional de Desarrollo Urbano de la Delegación Milpa Alta del Distrito Federal GODF (2011).
<http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Estatal/Distrito%20Federal/wo63526.pdf>
- Programa Delegacional de Desarrollo Urbano para la Delegación La Magdalena Contreras del Distrito Federal. No. 12-BIS GODF (2005).
http://www.data.seduvi.cdmx.gob.mx/portal/docs/programas/PDDU_Gacetas/2015/PDDU_LA-MAGDALENA-CONTRERAS.pdf
- Programa Delegacional de Desarrollo Urbano de la Delegación Álvaro Obregón del Distrito Federal No. 1091 GODF (2011).
http://www.data.seduvi.cdmx.gob.mx/portal/docs/programas/PDDU_Gacetas/2015/PDDU_ALVARO-OBREG%C3%93N.pdf
- Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F. (PAOT). (2010). *Cuantificación del carbono almacenado en la vegetación del suelo de conservación del Distrito Federal*. www.paot.org.mx
- Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F. (PAOT)b. (2010). *Actualización Estadístico Espacial como Fuente de un Ordenamiento Territorial De México, en Las Delegaciones Cuajimalpa de Morelos , Alvaro Obregón, Milpa Alta, Tlapan y Xochimilco*.
- Rathe, L. (2017). La sustentabilidad en los sistemas socio-ecológicos. *Utopia y Praxis Latinoamericana Revista Internacional de Filosofía Iberoamericana y Teoría Social*, 25(78), 65–78
- Renner, I. (2017). Integración de los servicios ecosistémicos en la planificación y gestión urbana. *Ecosystem Services*, 28, 1–16. <https://iki-alliance.mx/wp-content/uploads/Manual-de-Integración-de-los-Servicios-Ecosistémicos-en-la-Planificación-y-Gestión-Urbana.pdf>
- Requena, G. N., Casas Gonzáles, S. L., Cámara Artigas, R., Brenner Guillermo, J., & Morales Pacheco, J. F. (2012). *Modelo de captura y almacén de carbono en la Cuenca Guayalejo – Tamesí (Tamaulipas , México). 2012*.
- Rojas-García, F., Santoyo-Gómez, G. H., González-Montiel, E., Velázquez-Rodríguez, A., y Pulido-Ponce, J. I. (2017). La Ciencia del Suelo en el Ciclo del Carbono de México. *Elementos para Políticas Públicas*, 1(2), 69–96.
https://www.researchgate.net/profile/Fabiola_Rojas-garcia/publication/321994277_La_Ciencia_del_Suelo_en_el_Ciclo_del_Carbono_de_Mexico/links/5a3c7481a6fdcc21d8780495/La-Ciencia-del-Suelo-en-el-Ciclo-del-Carbono-de-Mexico.pdf
- Rokityanskiy, D., Benítez, P. C., Kraxner, F., McCallum, I., Obersteiner, M., Rametsteiner,

- E., y Yamagata, Y. (2007). Geographically explicit global modeling of land-use change, carbon sequestration, and biomass supply. *Technological Forecasting and Social Change*, 74, 1057–1082. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.05.022>
- Ruíz-Gómez, M. M. (2006). El crecimiento de los asentamientos irregulares en áreas protegidas. La delegación Tlalpan. *Investigaciones Geograficas*, 60, 83–109.
- Russo, R. (2009). Guía práctica para la medición de la captura de carbono en la biomasa forestal. En *Unidad de carbono neutro*. https://www.researchgate.net/publication/236593400_GUIA_PRACTICA_PARA_LA_MEDICION_DE_LA_CAPTURA_DE_CARBONO_EN_LA_BIOMASA_FORESTAL
- Ryan, M. G., Harmon, M. E., Birdsey, R. A., Giardina, C. P., Heath, L. S., Houghton, R. A., Jackson, R. B., Mckinley, D. C., Morrison, J. F., Murray, B. C., Pataki, D. E., y Skog, K. E. (2010). Síntesis del Estado del Conocimiento del Ciclo de Carbono en Ecosistemas Boscosos de los Estados Unidos. *Tópicos en Ecología Sociedad Norteamericana de Ecología*, 13, 1–20.
- Saavedra, Z., Revah, L. O., y Barrera, F. L. (2011). Identification of threatened areas of environmental value in the Conservation Area of Mexico City, and setting priorities for their protection. *Investigaciones Geograficas*, 74(Mx), 19–34.
- SAGARPA. (2017). *Planeación agrícola nacional 2017 - 2030*. <https://doi.org/10.1021/jo00358a030>
- Sahagún, F., & Reyes, H. (2018). Impactos Por Cambio De Uso De Suelo En Las Areas Protegidas de la región central de la Sierra Madre Oriental, México. *CienciaUAT*, 12(2), 6–21. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-78582018000100006&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Saldívar, A. (2021). *Xochimilco, Lodazal Ecológico, Fraude en Suelo de Conservación... y Amenazas*. Proceso. <https://www.proceso.com.mx/reportajes/2021/7/30/xochimilco-lodazal-ecologico-fraude-en-suelo-de-conservacion-amenazas-268905.html>
- Sánchez, D. (2012). Aproximaciones a los conflictos sociales y propuestas sostenibles de urbanismo y ordenación del territorio en Mexico. *Revista de Estudios Sociales*, 42, 40–56.
- Secretaría de Desarrollo Agrario, T. y U. (SEDATU) (2019). *Programa Nacional de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano*.
- SEDEMA. (2014). *Programa de acción climática Ciudad de México 2014-2020*.
- SEDEMA. (2023). Suelo de Conservación de la Ciudad de México. <https://datos.cdmx.gob.mx/dataset/suelo-de-conservacion>
- SEDEMA. (2016). *Estrategia de Resiliencia de la Ciudad de México / Transformación adaptativa, incluyente y equitativa Resumen*:. 121.
- SEDEMA. (2015). *Biodiversidad CDMX*. consultado: 8 de agosto de 2021. <http://data.sedema.cdmx.gob.mx/biodiversidadcdmx/geografia.html>
- Seto, K. C., Güneralp, B., & Hutyra, L. R. 2012. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *PNAS*, 109: 16083-16088.
- Sharp, R., Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., Chaplin-Kramer, R., Nelson,

- E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., Pennington, D., Mendoza, G., Aukema, J., Foster, J., Forrest, J., Cameron, D., Arkema, K., Lonsdorf, E., Kennedy, C., Verutes, G., K., C.K., Guannel, G., Papenfus, M., Toft, J., Marsik, M., Bernhardt, J., Griffin, R., Glowinski, K., Chaumont, N., Perelman, A., Lacayo, M. Mandle, L., Hamel, P., Vogl, A.L., Rogers, L., & Bierbower, W., Denu, D., and Douglass, J. (2019). User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund. *Natural Capital Project*, 126(1), 1–7.
- Sil, Â., Fonseca, F., Gonçalves, J., Honrado, J., Marta-Pedroso, C., Alonso, J., Ramos, M., & Azevedo, J. C. (2017). Analysing carbon sequestration and storage dynamics in a changing mountain landscape in Portugal: Insights for management and planning. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management*, 13(2), 82–104. <https://doi.org/10.1080/21513732.2017.1297331>
- Soares-Filho, B., Rodrigues, H., y Follador, M. (2013). A hybrid analytical-heuristic method for calibrating land-use change models. *Environmental Modelling and Software*, 43, 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.01.010>
- Sobrino, J. (2011). La urbanización en el México contemporáneo. En *Reunión de Expertos Sobre: "Población Territorio y Desarrollo Sostenible" CEPAL*.
- Soto-Cortés, J. (2015). El crecimiento urbano de las ciudades: enfoques desarrollista, autoritario, neoliberal y sustentable. *Paradigma Económico. Revista de Economía Regional y Sectorial*, 7(1), 127–149.
- Stolpe, N., y Fuentes, M. (2020). El modelo CENTURY para la predicción de secuestro de carbono en los suelos bajo prácticas de manejo sustentables. *Una Nama Agrícola para Chile mediante el secuestro de carbono orgánico en el suelo*, 59–74.
- Suárez, M., & Delgado, J. (2006). La expansión urbana probable de la Ciudad de México. Un escenario pesimista y dos alternativos para el año 2020 / Mexico City's Probable Urban Expansion. A Pessimistic Scenario and Two Alternatives for the Year 2020. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 22(1), 101. <https://doi.org/10.24201/edu.v22i1.1295>
- Sun, X., Crittenden, J. C., Li, F., Lu, Z., y Dou, X. (2018). Urban expansion simulation and the spatio-temporal changes of ecosystem services, a case study in Atlanta Metropolitan area, USA. *Science of the Total Environment*, 622–623, 974–987. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.062>
- Tang, L., Ke, X., Zhou, T., Zheng, W., & Wang, L. (2020). Impacts of cropland expansion on carbon storage: A case study in Hubei, China. *Journal of Environmental Management*, 265(April), 110515. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110515>
- Thorne, J. H., Santos, M. J., Bjorkman, J., Soong, O., Ikegami, M., Seo, C., y Hannah, L. (2017). Does infill outperform climate-adaptive growth policies in meeting sustainable urbanization goals? A scenario-based study in California, USA. *Landscape and Urban Planning*, 157, 483–492. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.08.013>
- Tiefenbacher, A., Sandén, T., Haslmayr, H. P., Miloczki, J., Wenzel, W., y Spiegel, H. (2021). Optimizing Carbon Sequestration in Croplands: a Synthesis. *Agronomy*, 11(5),

- 1–28. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050882>
- Torres Lima, P. A., & Cruz-Castillo, J. G. (2019). Procesos urbanos y sistemas socioecológicos. Trayectorias sustentables de la agricultura de chinampa en Ciudad de México/ Urban Processes and Socioecological Agricultural Systems. Sustainable Trajectories of Chinampa Agriculture in Mexico City. *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, 25, 168–189. <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.25.2019.3368>
- Toscana Aparicio, A. (2021). Reconstrucción postsísmica en el suelo de conservación ecológica de la Ciudad de México: experiencias de un asentamiento irregular. *Sociedad y Ambiente*, 24, 1–28. <https://doi.org/10.31840/sya.vi24.2206>
- Trumbore, S. E. (1993). Comparison of carbon dynamics in tropical and temperate soils using radiocarbon measurements. *Global biogeochemical cycles*, 7(2), 275–290.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)*. New York: United Nations.
- UrbanSim. (2023). *UrbanSim Cloud Platform Documentation*. <https://cloud.urbansim.com/docs/index.html>
- Urquiza, A. y Cadenas, H. "Sistemas socio-ecológicos: elementos teóricos y conceptuales para la discusión en torno a vulnerabilidad hídrica", *El ordinario de las Américas* [En línea], 218 | 2015, publicado el 05 de julio de 2015, consultado el 15 de julio de 2015. URL: <http://orda.revues.org/1774>
- USGS. (4 de agosto de 2021). *Project Gigalopolis*. Obtenido de Project Gigalopolis: <http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig/About/bkStrTest.html>
- Valenzuela, H.T. 2001. Estimación de secuestro de carbono en bosques naturales de oyamel en el sur del Distrito Federal. Tesis Profesional. Chapingo, Edo. de México. p:9-60.
- Vela Correa, G., Blanco, J. L., & De Lourdes Rodríguez Gamiño, M. (2012). Niveles de carbono orgánico total en el suelo de conservación del distrito federal, centro de México. *Investigaciones Geograficas*, 77, 18–30. <https://doi.org/10.14350/rig.31007>
- Waddell, P. (2002). Urbansim: Modeling urban development for land use, transportation, and environmental planning. *Journal of the American Planning Association*, 68(3), 297–314. <https://doi.org/10.1080/01944360208976274>
- Waring, R. H., y Running, S. W. (2007). *Forest Ecosystems* (Elsevier (ed.); 3rd ed.).
- World Urbanization Prospects: *The 2018 Revision* (2018). Inf. téc. United Nations. url: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-KeyFacts.pdf>.
- Xiao, Y., Xie, G. 2020. La transferencia de beneficios de los servicios ecosistémicos interregionales de las medidas de control de la erosión eólica en Mongolia Interior. *Desarrollo Ambiental*.
- Yan, Yan Zhang, Weige Hu, Yunfeng Liu, Huaipeng Zhang Xiaoping Zhang, Y. (2023).

Spatially explicit subpixel-based study on the expansion of impervious surfaces and its impacts on soil organic carbon. *Urban Ecosystems*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11252-022-01322-8>

Zaccagnini, María E. (2014) Manual de buenas prácticas para la conservación del suelo, la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos / María E. Zaccagnini; Marcelo G. Wilson ; José D. Oszust. – 1ª ed. – Buenos Aires : Programa Naciones Unidas para el Desarrollo – PNUD; Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación ; INTA. Buenos Aires, pág. 95.