



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DINÁMICA DEL PAISAJE DE LA SIERRA DE GUADALUPE, VALLE DE MÉXICO

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

Presenta:

Erick Eduardo Mendoza Ruiz

Bajo la supervisión de: Dante Arturo Rodríguez Trejo, Doctor en Ciencias
Forestales



APROBADA



Maestría en Ciencias en
Ciencias Forestales
y del Ambiente
Universidad Autónoma Chapingo
División de Ciencias Forestales

Chapingo, Estado de México, Septiembre de 2023

DINÁMICA DEL PAISAJE DE LA SIERRA DE GUADALUPE, VALLE DE MÉXICO.

Tesis realizada por Erick Eduardo Mendoza Ruiz bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR:



Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo

ASESOR:



Dr. Diódoro Granados Sánchez

ASESOR:



Dr. Alejandro Corona Ambríz

Contenido

LISTA DE CUADROS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
DEDICATORIA:.....	vii
AGRADECIMIENTOS	viii
DATOS BIOGRÁFICOS	ix
RESUMEN GENERAL	x
GENERAL ABSTRACT	xi
Capítulo 1. Introducción general	1
1.1. Tesis sobre la Sierra de Guadalupe	2
1.2. Investigaciones a escala local de la Sierra de Guadalupe	3
1.3. Publicaciones científicas sobre la Sierra de Guadalupe.	4
1.4. Hipótesis	4
1.5. Objetivos	5
Capítulo 2. Revisión bibliográfica	7
2.1. Naturaleza, rol y descripción del paisaje.	8
2.2. Teorías fundamentales de la ecología del paisaje,	9
2.3. La relevancia de la ecología del paisaje en el manejo de los recursos naturales y la restauración ecológica.	12
2.4. El régimen de fuego	14
2.5. Literatura citada	15

Capítulo 3. Trayectoria del paisaje de la Sierra de Guadalupe, Valle de México (1994-2019)	24
RESUMEN.	24
ABSTRACT.....	25
3.1. Introducción.....	26
3.2. Metodología.....	27
3.3. Resultados y discusión.....	32
3.4. Conclusiones.....	47
3.5. Referencias	50
Capítulo 4. Régimen de fuego de la Guadalupe, Valle de México (2013-2021)	54
RESUMEN	54
ABSTRACT	55
4.1. Introducción.....	56
4.2. Metodología.....	57
4.3. Resultados y discusión.....	61
4.4. Conclusiones.....	71
4.5. Referencias	73
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones	75

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. 1. Distribución de los usos de suelo y vegetación.	33
Cuadro 1. 2. Distribución de los usos de suelo y vegetación.	37
Cuadro 1. 3. Área, número de parches, tasa y razón de cambio.	41
Cuadro 1. 4. Área, número de parches, tasa y razón de cambio.	42
Cuadro 1. 5. Índice de fragmentación (Gurrutaga, 2003) y de cohesión (Bowen & Burgess, 1981).	43
Cuadro 1. 6. Cambios totales de la masa forestal de la Sierra de Guadalupe..	44
Cuadro 1. 7. Matriz de transición de Markov.....	46
Cuadro 2. 1. Extensión de la superficie quemada (ha) por año y por tipo de vegetación.	63
Cuadro 2. 2. Estadísticos por vegetación	64
Cuadro 2. 3. Área quemada por zona de estudio.	65
Cuadro 2. 4. Área quemada por vegetación.	67
Cuadro 2. 5. Área por categoría de frecuencia	69
Cuadro 2. 6. Adaptaciones al fuego, o sensibilidad al fuego, en las especies arbóreas o arbustivas dominantes en la vegetación nativa o en plantaciones forestales establecidas en Sierra de Guadalupe (Con base en información de Rodríguez-Trejo, 2014).	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1. Ubicación de la Sierra de Guadalupe.	27
Figura 1. 2. Masas forestales de la Sierra de Guadalupe.	36
Figura 1. 3. Distribución vertical del uso de suelo en la Sierra de Guadalupe. .	39
Figura 2. 1. Microcuencas de la Sierra de Guadalupe.	59
Figura 2. 2. Zonas de estudio de régimen de fuego.....	60
Figura 2. 3. Área quemada en la Sierra de Guadalupe (2013-2021)	62
Figura 2. 4. Serie de tiempo del área afectada.	66
Figura 2. 5. Frecuencia de los fuegos forestales en la Sierra de Guadalupe. (2013-2021).....	68

DEDICATORIA:

A MI PADRE MARINO MENDOZA, ACAECIDO DURANTE EL DESARROLLO DE ESTOS TRABAJOS. TE VEO AL FINAL DE ESTE LARGO CAMINO.

“(...) era mi padre. Cuando crecí y lo busqué me dijeron que estaba muerto. Es algo difícil crecer sabiendo que la cosa de donde podemos agarrarnos para enraizar está muerta.”

Juan Rulfo

¡Diles que no me maten!

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo solo pudo ser posible gracias al financiamiento que brinda la beca CONAHCYT, que con recursos de todos los mexicanos desarrolla la ciencia en nuestra Nación.

También así la Universidad Autónoma Chapingo y el Posgrado en Ciencias Forestales y del Ambiente que aportaron recursos necesarios para desarrollar trabajos en campo. Sin dejar atrás a todos mis profesores y compañeros.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: Erick Eduardo Mendoza Ruiz.

Fecha de nacimiento: 26 de junio de 1996.

Lugar de Nacimiento: Ciudad de México.

CURP: MERE960626HDFNZR04

Profesión: Ingeniero Forestal.

Cédula profesional: 12980819.

Desarrollo académico:

Secundaria: Plantel Fundación Azteca (2008-2011).

Preparatoria: Universidad Autónoma Chapingo. Preparatoria agrícola. (2013-2016).

Licenciatura: Universidad Autónoma Chapingo (2016-2020).

Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. (2021-2023)

RESUMEN GENERAL

Dinámica del paisaje de la Sierra de Guadalupe

Entender la trayectoria del paisaje de la Sierra de Guadalupe es imprescindible para su restauración ecológica. El paisaje de la Sierra de Guadalupe es un sistema cuyas entradas son en gran medida antropogénicas, pues está encerrado entre suburbios. La evolución de sus ecosistemas es indeterminada en tanto que los seres humanos los promueven, alteran o destruyen. El cambio en el paisaje es observable en imágenes aéreas, satelitales, y mediante métodos de teledetección. La matriz del paisaje de la Sierra de Guadalupe consta de matorrales, pastizales, y masas forestales, que forman sus mosaicos. En el primer artículo se describió la permeabilidad del paisaje a partir de los índices de Puyravaud, Mikels, Bowen & Burgess y Jaeger, así como un índice de autocorrelación de Moran. Con la matriz de Markov se encontraron las transiciones más frecuentes, en el periodo de 1994 a 2021. Se concluye que las pequeñas reforestaciones han promovido un paisaje de grano fino. También se determinaron las sucesiones ecológicas a partir de una matriz de Markov. En el segundo artículo se describe el régimen de fuego antropogénico en la Sierra de Guadalupe en los años 2013 a 2021. El fuego tuvo lugar en al menos 2388 ha, muchas de las cuales fueron sometidas a incendios forestales en varias ocasiones, estos últimos son principalmente superficiales. La mayoría de las formas de las áreas quemadas son irregulares y anchas, pero también las hay delgadas y con bordes lineales, casi siempre delimitadas por elementos humanos (brechas cortafuego, bardas, caminos, etc). El 27% del área quemada en la Sierra de Guadalupe estuvo sometida al fuego anual, mientras que el 61% se quemó una sola vez en el periodo estudiado. Por lo anterior, se advierte acumulación de combustible forestales en dos tercios de la Sierra.

Palabras Clave: Paisaje, permeabilidad del paisaje. régimen de fuego, restauración ecológica.

Tesis de Maestría en Ciencias, en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Erick Eduardo Mendoza Ruiz.

Director de la tesis: Dante Arturo Rodríguez Trejo.

GENERAL ABSTRACT

Dynamics of the landscape of the Sierra de Guadalupe

To know landscape trajectory of Sierra de Guadalupe is essential for its ecological restoration. The landscape of Sierra de Guadalupe is a system in which the inputs are mostly anthropogenic, for its limits with Mexico City and conurbated areas. The development of its ecosystems is indeterminated, men promotes, alters or destroys them. Changes in the landscape are visible with aerial and satelital images, also with satelital indices. The matrix landscape of Sierra de Guadalupe is formed by patches of scrubland, grassland, and forests. The first article describes landscape permeability with indices of Puyravaud, Mikels, Bowen & Burgess and Jaeger. Also the Moran's correlation index was calculated. With the Markov matrix were found more typical ecological transitions since 1994 to 2021. It is concluded that tiny reforestation have promoted a fine-grained landscape. Also, was determined ecological succession with a Markov matrix. The second article describes the anthropogenic fire regime of Sierra de Guadalupe from 2013 to 2021. Fire occurred in around 2388 ha in this period, many of which was burning on several occasions. Most of fires were surface fires, and most of the burnt area shapes are irregular and wide, but exist tiny shapes with lineal edges, almost always delimited by human elements (firebreaks, walls, paths, etc). The 27% of the burned area of Sierra de Guadalupe was burned each year, while 61% was burned only once time during the study period. Two thirds of the surface of Sierra de Guadalupe show high forest fuels accumulation.

Key words: Ecological restoration, fire regime, landscape, landscape permeability.

Thesis, Universidad Autonoma Chapingo
Author: Erick Eduardo Mendoza Ruiz.
Advisor: Dante Arturo Rodríguez Trejo.

Capítulo 1. Introducción general

La Ciudad de México enfrenta escasez de servicios ambientales fundamentales como el aire limpio (Landeros-Mugica & Ortega-Andrade, 2014) y el agua (Deloya, 2018). Especialmente el norte de la Ciudad, cuya urbanización ha confinado los montes que reciben el nombre de Sierra de Guadalupe, dando lugar a un área ocupada por matorrales, pastizales y masas forestales de más de 6000 ha rodeada por un cinturón de miseria. El paso de décadas de disturbios lo ha configurado como un paisaje perturbado, pero con gran potencial en cuanto a servicios ecológicos (Alberto Villavicencio, 2007), que serán más necesarios en el futuro, sin duda alguna. En tal contexto, el manejo de la Sierra de Guadalupe se entiende en el marco de la restauración ecológica (De Torre & Magro, 2018). Para planificar la restauración ecológica es fundamental entender la trayectoria del paisaje (Clewett et al., 2005).

Cuánto y cómo ha cambiado el paisaje de la Sierra de Guadalupe, con respecto a la trayectoria del paisaje, es la pregunta natural que dio origen al primer artículo “Trayectoria del paisaje de la Sierra de Guadalupe, Valle de México (2013-2021)”. En el desarrollo del trabajo fue evidente que el fuego es el disturbio más observable, después del avance de la ciudad, el que más configura el paisaje de la Sierra, dejando los doseles y suelos de un color oscuro; con el tiempo, la vegetación se recupera o se altera o se reforesta a lo largo de los años, otorgándole a la Sierra una gran complejidad en las características de sus mosaicos. Por esa razón fue necesario describir lo que se denominó régimen de fuego antropogénico.

Antropogénico porque todos los incendios que se cartografiaron fueron por la mano del hombre e intencionados. El concepto régimen de fuego se refiere a la frecuencia, forma, intensidad, altura de llama y en general todas las características que definan el comportamiento de los fuegos en un ecosistema (Nieto et al., 2015). ¿Qué características tiene el régimen de fuego? fue la segunda pregunta central de este trabajo de tesis, que dio origen al segundo artículo, “Régimen de fuego de la Sierra de Guadalupe, Valle de México (2013-

2021)”. Ambos trabajos brindan información valiosa que pueden usarse para el manejo de la Sierra de Guadalupe. Conciérne a la sociedad y el Estado discutir la mejor manera de restaurar la Sierra de Guadalupe, y estos trabajos serán necesarios para ese momento.

1.1. Tesis sobre la Sierra de Guadalupe

La Sierra de Guadalupe ha sido ampliamente estudiada. Destaca el gran número de tesis de licenciatura que se han generado, principalmente editadas en la Universidad Autónoma de México, Universidad Autónoma Metropolitana, Instituto Politécnico Nacional, y Universidad Autónoma de la Ciudad de México. Casi todos los estudios son locales, la zona de estudio se extiende a una cañada, o una o varias microcuencas. Dentro de los que si aplican para toda la Sierra de Guadalupe está la tesis doctoral sobre los costos económicos y sociales (Escobar Delgadillo, 2012) de la deforestación, que estima el valor económico de las consecuencias de la deforestación (inundaciones, alcantarillado, etc.).

Otro de los trabajos cuya zona de estudio es toda la Sierra de Guadalupe, y que es el trabajo más cercano al que presentamos, es el que se titula “Dinámica ambiental de la Sierra de Guadalupe de 1985-2016” (Ayala López, 2017) el cual compara el dosel detectado con datos Landsat (Landsat 8, 2016). Esas mismas imágenes fueron descartadas en este trabajo como único método de teledetección, pues la resolución espacial es sumamente gruesa (900 m²) y detecta las zonas sombreadas como si fueran dosel, sobreestimando las masas forestales. También existe un trabajo sobre factores de cuenca y escorrentías de todas las cuencas de la Sierra (Medina Sosa, 2013).

Entre la población de urbana que habita la Sierra se extiende el temor de los deslizamientos de suelo y rocas que han llegado a costar la vida de varios vecinos, así como a las inundaciones, que año con año causan pérdidas económicas y hasta humanas; estos fenómenos han sido varias veces estudiados, el más extenso habla de los riesgos hidrometeorológicos (Ochoa Torres, 2011) que también describe la cuenca y su fisiografía. De este trabajo se retoma la base de la delimitación de la zona de estudio que aquí se propone.

También se han elaborado mapas de riesgo por métodos bivariados (Campos Vargas, 2006).

1.2. Investigaciones a escala local de la Sierra de Guadalupe

Los estudios locales que se han desarrollado en la Sierra de Guadalupe son muy diversos. Se revisaron aquellos trabajos con cercanía a la presente tesis. Algunos otros trabajos no citados aquí son de corte histórico, social, económico que involucran a la Sierra y su población. De las tesis que se desarrollaron en la Sierra de manera local, en una cuenca, demarcación, pendiente, o barrancas, existen estudios de avifauna y su diversidad beta (Contreras Rodríguez, 1999), sobre mamíferos (Barragán Saldaña, 2020), que estudian el estrés ambiental en las poblaciones de ranas (Méndez de la Cruz, 2018), de herpetofauna (Martínez Najera, 2017). Los insectos son un tema muy estudiado en algunas zonas de la Sierra de Guadalupe, pues se han levantado trabajos de campo sobre coleópteros (Rocha Gustavo, 2015), lepidópteros diurnos (Velázquez Flores, 2014) y odonatos (Ortíz Medina, 2014).

Entre los estudios locales, que fueron desarrollados en una parte en la Sierra, destacan los de evaluación ambiental. El trabajo más importante es una tesis doctoral que evalúa y desarrolla una metodología cualitativa para la evaluación de servicios ambientales en una cuenca de la Sierra (Alberto Villavicencio, 2007), pero perfectamente aplicable a cualquier otra cuenca de esta. También se han practicado inventarios, diagnósticos y evaluaciones ambientales para Parque Residencial Coacalco, que es una colonia que colinda con la Sierra (Reyes Reyes, 2013), para Tultitlán, (Rojas Pérez, 2013) para la microcuenca del arroyo Peña Gorda, (Rojas Briseño, 2015), para la Cañada del Encinar (Cara García, 2018), para la subcuenca Llanetes, así como para Coacalco (Correa Huerta, 2002).

Luego existen los trabajos sobre procesos abióticos, principalmente deslizamientos de suelo y rocas en Ecatepec y Tlalnepantla (Vázquez Leyva, 2006), además de Tlalnepantla y Tultitlan (Galván García, 2005). Falta por retomar los estudios sobre calidad de suelo en matorral de encino al occidente

de la Sierra (Navarrete Segueda, 2011) y la estimación de costos de un proyecto de reforestación en el Estado de México (Escobar Delgadillo, 2007). El autor del presente también contribuyó con el balance hídrico, erosión de suelo y detección de zonas potenciales de recarga hídrica de la fosa de Cuauhtepac (Mendoza Ruiz, 2020).

1.3. Publicaciones científicas sobre la Sierra de Guadalupe.

Los trabajos publicados en revistas científicas que se relacionan al presente problema de investigación tratan sobre temas muy parecidos a las tesis, pero son mucho menos. Cronológicamente, los problemas de investigación han sido muestreos de reptiles en la Ciudad de México (Méndez de la Cruz et al., 1992), sobre geomorfología y deslizamientos de suelo y rocas en la Ciudad de México (Fraustro Martínez, 1998; García Palomo et al., 2006; Lugo Hupb & Salinas-Montes, 1996). También se ha trabajado sobre el desarrollo de los suelos endurecidos de la Sierra (Vela Correa & Flores-Román, 2004), sobre el éxito de la reforestación de encino vinculada a la elección del micrositio en una parcela en el Estado de México (Ramírez Contreras & Rodríguez Trejo, 2007).

Se han estimado los niveles orgánicos de carbono en el Distrito Federal (Vela Correa et al., 2011). Es notable el conocimiento que se ha desarrollado sobre la ecología de las agallas del encino por el mismo equipo de trabajo, en la Sierra se han encontrado nuevas especies asociadas (Serrano-Muñoz et al., 2015; Serrano-Muñoz et al., 2016) (Serrano-Muñoz et al., 2016), les siguieron muestreos de hemípteros en Ecatepec, Estado de México (Cortés-Jiménez et al., 2016), y de coleópteros carroñeros (Rodríguez-Castillo et al., 2019). El último artículo publicado fue un inventario de caída de rocas (Hernández Avelino et al., 2023). Como puede observarse, la preocupación de la población es compartida por muchos investigadores, la mayoría de los estudios hablan de los peligros de la topografía de la Sierra. En el área de estudio hay educadores ambientales profesionales, destacan los trabajos de Martínez, (2023) y Estrada (2021).

1.4. Hipótesis

- La Sierra de Guadalupe cuenta con más cubierta forestal que en 1994.

- Las masas forestales que se han establecido con éxito están compuestas principalmente de especies exóticas.
- La dinámica del fuego es la más determinante en la configuración del paisaje.
- El régimen de fuego antropogénico también obedece a la dinámica de acumulación de combustibles.
- Existen zonas en la Sierra de Guadalupe con acumulación de combustibles desde hace más de diez años.

1.5. Objetivos

Objetivo general

Describir el desarrollo histórico del paisaje de la Sierra de Guadalupe a partir de índices paisajísticos y la definición de su régimen de fuego antropogénico por su extensión de área afectada, tipo de incendio, forma y frecuencia.

Objetivos particulares

- Estimar la razón de cambio del crecimiento bajo el modelo del interés compuesto (Puyravaud, 2003).
- Estimar la fragmentación del paisaje (Gurruxtaga, 2003).
- Estimar la disección del paisaje (Bowen & Burgess, 1981).
- Estimar la cohesión del paisaje (Jaeger, 2000).
- Estimar la autocorrelación espacial del paisaje (Zhu et al., 2022).
- Detectar las sucesiones ecológicas más comunes a partir de cadenas de Markov (Ching et al., 2013).
- Mapear los incendios forestales con técnicas de teledetección del 2013-2021.
- Detectar tipos de incendio que se presentaron.
- Describir la forma de los incendios.
- Determinar la frecuencia de los incendios en el periodo.
- Determinar los componentes estadísticos de la serie de tiempo de área quemada.

En el primer capítulo presenta los antecedentes, justificación, hipótesis y objetivos. El segundo capítulo establece el marco teórico de la presente tesis. El

tercer capítulo describe la trayectoria del paisaje de la Sierra de Guadalupe. El cuarto capítulo define el régimen de fuego antropológico en la zona de estudio. Y el quinto capítulo concluye y recomienda a partir de la investigación realizada.

Capítulo 2. Revisión bibliográfica

En este capítulo se construye el marco teórico de la presente tesis. El estudio de la ecología del paisaje se ha desarrollado desde 1930 desde la primera aparición del concepto construido como una categoría de la ecología (Troll, 2003), donde se concibe al mosaico como una consecuencia de condiciones específicas de la relación del biotopo y biocenosis, incluyendo al ser humano, lo que entonces se entendería como enfoque holístico. Mucho se ha trabajado desde entonces y más aún con el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica. Las publicaciones más importantes en esta disciplina actualmente son las revistas *Landscape Ecology* y *Landscape and Urban Planning*, tan solo la primera ha registrado el crecimiento en las publicaciones y el factor de impacto que ha tomado la ecología del paisaje como una interdisciplina, publicándose menos de doscientas páginas en 1998 y más de 1400 en 2007 (Wu, 2007).

Actualmente la integración de los datos puntuales en el mapa, para su análisis matemático, es obligatoria no solo en estadística espacial (Garrocho & Campos Alanís, 2013), si no para casi todos los aspectos de la ecología del paisaje. En el mapa se manifiesta el arreglo fractal al igual que en toda la naturaleza, los mosaicos son extensiones de vegetación homogénea y diferente a su alrededor. La porción del paisaje que no está ocupada por mosaicos se conoce como matriz, el mosaico tiene una zona núcleo y un borde, que es la región por la que recibe y emite información, materia y energía con la matriz, existen mosaicos largos y estrechos que comunican otros mosaicos y reciben el nombre de corredores (Armenteras & Vargas, 2016).

Uno de los trabajos más relevantes en ecología del paisaje es el de Farina (2006), no solo porque integra técnicas modernas para el análisis, evaluación, planeación y manejo de los paisajes y los ilustra con ejemplos concretos. Si no por el desarrollo epistemológico que ofrece. Desde los prefacios se describe el desarrollo histórico de la disciplina. En la introducción encontramos los postulados más importantes. El desarrollo del libro aborda los métodos, modelos matemáticos y categorías que integran el cuerpo teórico de la ecología del

paisaje. Las categorías más importantes se incluyeron implícitamente en los dos artículos que aquí se presentan.

2.1. Naturaleza, rol y descripción del paisaje.

El paisaje se ha interpretado al menos en tres jerarquías distintas. La naturaleza del paisaje, el rol del paisaje y la descripción del paisaje. La naturaleza del paisaje puede ser material o conceptual. La sustancia del primero es el biotopo y la biocenosis, la sustancia de la naturaleza conceptual del paisaje es la información (Stonier, 1996). El paisaje toma varios roles, puede ser entendido como un dominio, como un sistema o como una unidad, en lo real, es los tres a la vez, pero no todos los trabajos sobre paisaje pueden alcanzar tal entendimiento.

Conocer el paisaje en lo concreto y en lo abstracto es muy similar a enfocar figuras en una imagen *Gestalt*. En lo concreto, se suelen aplicar métricas a los parches (enfocan la copa), y en otras ocasiones se tiene interés por la matriz (se enfocan en las dos caras), también así en lo abstracto, a veces los trabajos se enfocan en el nivel de descripción del paisaje y se pierde la dimensión conceptual de la naturaleza del paisaje, entre otros casos. Esta tesis integra análisis de los parches, de las celdas, y de la matriz del paisaje, y se interpretó al paisaje en su rol de sistema. Como dominio el paisaje tiene subdominios correspondientes a una familia de eventos, fenómenos, información, o lo que sea real en el paisaje conceptual o material. Esos subdominios, naturalmente contendrán metadominios, es un arreglo geometría fractal, pero en el nivel conceptual (Farina, 2004).

Otro rol del paisaje es el del sistema, en específico el sistema complejo. Además de contener los elementos del sistema clásico propuesto por (Bertalanffy, 1969), el paisaje es un contenedor de complejidad explícita. Está definido por varias condiciones materiales y conceptuales, por ejemplo, a nivel de macroprocesos queda determinado por economía, religión, cultura, ambiente y conceptualmente lo definen su ecología, geología, etc. Es complejo en tanto que contiene diferentes elementos que entre ellos y fuera del mismo paisaje, crean, destruyen, o más bien transforman, información, energía y materia. La diferencia entre un

ecosistema primario y un paisaje esencialmente es el contexto geográfico complejo en el que está enmarcada. Para entender el ecosistema como un paisaje es necesario concebir el intercambio de materia, energía e información entre los elementos de este, son esas relaciones las que definen al sistema.

El paisaje también cumple el rol de la unidad. Lo es si presenta un borde distinguible de su exterior y es posible diferenciar las funciones dentro del borde, entre su matriz y sus mosaicos (Palka, 1995). El paisaje forma una unidad autopoietica (Maturana & Valera, 1980), es decir, que se sostiene y reproduce a sí mismo. De esta manera se define al ecotopo, como la unidad mínima de los paisajes. En este rol, es aún más determinante la escala, pues un paisaje puede o no ser unidad según la jerarquía, la unidad, claramente incluye a los humanos y su influencia.

2.2. Teorías fundamentales de la ecología del paisaje,

En la epistemología que estudiamos se reconocen cada vez más teorías fundamentales, que son las categorías sobre las que descansa esta nueva disciplina. En la segunda edición del libro de (Farina, 2004) se incluyen nuevas teorías de la ecología del paisaje; complejidad, información, cognoscibilidad y autopoiesis, y biosemiótica y ecosemiótica. Como se adelantó, el paisaje cumple el rol de sistema complejo. Un sistema cuya unidad no es tan solo la suma de sus elementos, lo que le confiere complejidad. Esa complejidad puede ser descompuesta en tres fuentes. Complejidad algorítmica, la que obedece a modelos matemáticos, complejidad determinística, porque el sistema complejo tiende a la entropía y determinadamente al caos, y complejidad agregada que resulta de la interacción entre los elementos del sistema.

La complejidad se configura según la jerarquía (Wu & Marceau, 2002). La complejidad del paisaje no puede representarse en la geometría clásica ni en la geometría fractal, porque existe una dinámica permanente de crecimiento en zonas vacías y de claros (Hastings & Sugihara, 1993). Se sostiene que un sistema es complejo si cumple con la hipótesis de incertidumbre interdominio y de conexión. La hipótesis de incertidumbre establece que ciertas perturbaciones

aíslan el intercambio de material, energía e información con otros sistemas. Cuando un sistema experimenta incertidumbre es altamente probable que emita información atípica. La complejidad es incierta, por eso un sistema complejo puede alterar sus procesos, arreglos, información espontáneamente.

La hipótesis de interdominio supone que el paisaje tiene códigos distintos para compartir información, energía y materia entre sus mismos componentes. La complejidad es un lenguaje que conecta diferentes sistemas y dominios. La hipótesis de interconexión reconoce que, en la actualidad, los ecosistemas están ampliamente comunicados. Si un sistema recibe más información de la que es capaz de procesar, colapsará. Es decir, si el sistema tiene grandes entradas de información, materia o energía, perderá su capacidad de autorregularse, disminuirá su autopoiesis. El aumento en la importación de información disminuye el tiempo de procesarla por el paisaje, aumentando la incertidumbre (Barbieri, 2008).

La teoría de la información la sitúa como un ente del mismo nivel que la materia y la energía. Más aún que el conjunto de pulsos electromagnéticos y datos, la información es un elemento en el modelo de la comunicación. La cognoscibilidad se refiere al conocimiento que se tiene de un sistema. Naturalmente el ecosistema se encuentra en aparente equilibrio, entre perturbaciones y entrada de información, materia y energía. También dentro del sistema se desarrolla la autopoiesis, en el balance de los procesos de producción, transformación y destrucción de sus componentes (Farina, 2017).

Por último, la teoría de biosemiótica y ecosemiótica. La semiótica es relativa al lenguaje. Todo nuestro mundo puede ser abstraído en señales organolépticamente vinculadas al espectro electromagnético. La semiótica se compone del signo, de la interpretación y el objeto en sí. Es el proceso de replicar un signo para reemplazarlo en la misma función; siendo que el primer signo no puede realizar la misma función que su réplica, ni la réplica en la función del original porque es incompatible en su lenguaje, tiempo o espacio. Cada semiosis

requiere de una semiosis previa (Covarrubias-Villa & Guadalupe Cruz-Navarro, 2019).

La semiosis vertical es la que se realiza dentro del mismo organismo y asegura autopoiesis (por ejemplo, la síntesis de proteínas). Y la semiosis horizontal, que se refiere a la comunicación entre los organismos (Barbieri, 2008). La biosemiótica se enfoca a la comunicación dentro y fuera del ecosistema en su biocenosis, la ecosemiótica integra el factor antropológico (Karlin, 2016).

Adicionalmente la ecología del paisaje había definido otras teorías fundamentales. La teoría de metapoblaciones se refiere a las poblaciones (de todas las especies presentes) y su dinámica entre ellas, dentro y fuera del mosaico. Teoría de la biogeografía insular compara la dinámica de las especies de una isla, con la de un mosaico inmerso en la matriz del paisaje (Vila Subirós et al., 2006).

Teoría de percolación. Describe la entropía en el sistema. Estudia el flujo de energía a través del paisaje. Esta teoría es válida para todas las jerarquías y dominios del paisaje, desde el paisaje como unidad, hasta la fauna de una sección del paisaje (He & Hubbell, 2003)

Teoría de perturbaciones. El paisaje es parcialmente configurado según las perturbaciones que en él se presentan (Simmonds & Mann, 2013).

Teoría jerárquica. El paisaje puede analizarse desde cualquier escala, integrándose de forma distinta aun cuando el paisaje es el mismo. Un paisaje puede ser analizado desde una escala que lo involucre completo, o desde jerarquía menor, como a nivel de bosque, individuo (fisiológicamente), entre otros. En la teoría jerárquica también están incorporados los niveles epistemológicos de análisis del paisaje (naturaleza, rol o descripción), existe una jerarquía conceptual (Farina, 2017).

El primer artículo, referente a la trayectoria del paisaje abordó al paisaje en su rol de sistema, con especial enfoque a la teoría de percolación. Otro concepto fundamental en ese artículo fue el de historia del paisaje (Tappeiner et al., 2021), se define al paisaje como resultado de condiciones actuales y también históricas,

así como el paisaje futuro está determinado por las condiciones actuales del paisaje. El paisaje está determinado en dos formas desde su pasado, en la dependencia que tiene el cada parche en su pasado (el desarrollo inherente de los parches y su matriz) y los efectos legados. Tanto los parches como la información, energía y materia legada, están configurados por elementos internos y externos. Ese legado entre los diferentes estadios del paisaje afecta a los parches y a los procesos del sistema.

2.3. La relevancia de la ecología del paisaje en el manejo de los recursos naturales y la restauración ecológica.

Es relevante el papel de los investigadores chinos en la ecología del paisaje. En 2018 se celebró el Sexto Foro de la Ciencia del Paisaje Sustentable en Beijing, para ese entonces se publicaban al menos seiscientos artículos al año relativos a ecología del paisaje tan solo en China. La ecología del paisaje ha servido como sustento de lo que el Estado reconoce como “civilización ecológica” caracterizada por un pujante “progreso ecológico”, es decir, la concretización de la sustentabilidad. Es tan importante este tema en aquel país, que se discute en el congreso del Partido Comunista Chino. De esta manera, en el Sexto Foro de la Ciencia del Paisaje Sustentable se ha determinado que la ciencia de los paisajes sustentables es la incorporación de los planes de producción económica en la ecología del paisaje (Frazier et al., 2019).

Los métodos de ecología del paisaje se pueden contar por cientos. Algunos interpretan bajo modelos matemáticos a parches, matriz, bordes y corredores, pero otros aplican estadística espacial sobre una cuadrícula que divide al paisaje en celdas (muy popular entre los investigadores chinos, estableciéndose un nuevo elemento del paisaje: la celda. Por la gran magnitud de índices paisajísticos y métodos, es más útil hablar desde la epistemología actual de la ecología del paisaje. Sirva este esbozo como marco teórico de esta tesis y como introducción a la ecología del paisaje, que aún no está definida con claridad, de la que se han desprendido varias escuelas que concuerdan en que el paisaje es complejidad explícita.

La pertinencia de estos trabajos está en su aplicación del manejo de los recursos naturales. En ese aspecto, el trabajo de (Bettinger et al., 2009) Sirvió de base para los métodos y conclusiones que se escriben en esta tesis, orientadas a los conceptos que se establecen en los primeros capítulos de citado libro, para que en un futuro puedan ser usados como indicadores y fuentes de información útiles en la planeación y ejecución del manejo. Para Bettinger et al. (2009), el manejo forestal es un conjunto de prácticas silvícolas con consideraciones económicas cuyas metas van desde lo puramente ecológico hasta lo puramente económico.

Aunque todos los parámetros del bosque pueden ser cuantificados en dinero, es necesario incluir nuevos indicadores entre las metas del manejo como la calidad de agua, biodiversidad, aumento de fauna silvestre, captura de carbono, también índices paisajísticos y el régimen de fuego. Un plan de manejo forestal puede visualizarse como el conjunto de actividades que han de realizarse para conseguir un objetivo. Por lo general, si el manejo tiene objetivos a corto plazo, entonces el plan considera acciones con resultados a corto plazo, como en nuestros programas nacionales que se renuevan cada cinco a quince años. Esto es inconveniente para la sustentabilidad, la planeación debe realizarse en un marco temporal muy amplio. De ahí la importancia de iniciar con la descripción objetiva del paisaje como sistema.

La planeación forestal tiene ventajas importantes y necesarias en el contexto actual de crisis climática. Como implementar actividades precisas, predecir el crecimiento de las masas forestales o el aumento de servicios ambientales, optimizar los recursos que son limitados, conservar o desarrollar hábitat, y administrar presupuestos. La planeación debe considerar que toda actividad tiene consecuencias en todos los elementos y roles del sistema, incluyendo el social y económico, por lo que es conveniente elaborar diferentes hipótesis del resultado de cada estrategia de manejo. Los resultados de esta investigación aportan información a esas hipótesis y estrategias.

En el mismo sentido de la aplicación de los resultados de estos trabajos en el manejo del paisaje. Para definir que es la restauración de un paisaje es necesario

entender la dinámica de su trayectoria, si es que esta restauración se refiere a un estadio anterior de ese paisaje o un ecosistema de referencia preservado en el sitio o fuera del sitio (Clewett et al., 2005). En la trayectoria del paisaje se distingue la sucesión ecológica. Esa sucesión ecológica no siempre termina en un ecosistema de referencia, tiene barreras abióticas y bióticas que no le permiten trascender al ecosistema objetivo (De Torre & Magro, 2018). Esos ecosistemas son los pastizales y matorrales de la Sierra de Guadalupe que se incendian con frecuencia, por eso la necesidad del segundo artículo. Se puede decir que los esfuerzos de restauración empezaron desde las primeras reforestaciones del siglo anterior, pero a la fecha no han tomado una estructura ni planeación a la altura del reto de la restauración ecológica. Para esto es necesario identificar resultados intermedios a lo largo de la trayectoria de recuperación, objetivos que sean medibles, definidos en el tiempo, específicos y alcanzables (Gann et al., 2019) esos objetivos son estimables con la información de este trabajo de tesis.

2.4. El régimen de fuego

El fuego puede verse como un evento de colapso parcial y temporal del paisaje. sucede cuando la información, materia y energía se acumulan y un evento fortuito libera dicha acumulación de manera violenta. Los fuegos son más frecuentes sobre ciertos tipos de vegetación, con respecto a otros, cosa que es muy visible en la Sierra de Guadalupe, cuyas masas forestales, matorrales y pastizales están adaptados al fuego en su gran mayoría (Rodríguez Trejo, 2014). Los efectos positivos y negativos del fuego a nivel paisaje son muy variados y numerosos. Como ejemplos, la temperatura aumenta en la zona y los suelos pierden humedad temporalmente o se erosionan según la severidad del fuego, lo que estimula el estrés hídrico y nuevos eventos de fuego, también puede limitar el establecimiento de bosques si el fuego es muy frecuente.

Los seres humanos tienden a aumentar el área quemada por año en las zonas con vegetación limítrofes a sus poblaciones. Asimismo, la influencia humana tiende a incrementar los combustibles forestales a partir de la exclusión de fuego. Por otra parte, los fuegos constantes y severos (es decir, los regímenes de fuego

alterados) reducen la conectividad, el amortiguamiento del paisaje a grandes cantidades de información, aumentando severidad, extensión y frecuencia. Los regímenes de fuego alterados promueven algunas especies exóticas que son más inflamables y tolerantes que las especies nativas (Tepley et al., 2017). El fuego promueve pastizales muy palatables que son preferidos por vacas que también arrancan brinzales de árboles nativos, lo que impide la sucesión ecológica. Siendo esos efectos reales para la Sierra de Guadalupe, se vuelve necesario concebir el manejo de fuego en la misma.

El régimen de fuego y la configuración del paisaje están fuertemente relacionados (Myers, 2006). Para entender objetivamente el papel de ese disturbio y tomar su manejo de manera consciente y planificada, es indispensable delinear el régimen de fuego, entendido como el conjunto conceptual de características que definen a los fuegos en el paisaje (McLauchlan et al., 2020).

2.5. Literatura citada

Alberto Villavicencio, A. (2007). *Evaluación de funciones y servicios ambientales Parque Estatal Sierra de Guadalupe-Proyecto de conservación ecológica de la zona metropolitana del Valle de México*. Editorial de la Universidad de Granada.

Armenteras, D., & Vargas, O. (2016). Patrones del paisaje y escenarios de restauración: Acercando escalas. *Acta Biológica Colombiana*, 21(1), S229–S239. <https://doi.org/10.15446/abc.v21n1sup.50848>

Ayala López, A. (2017). *Dinámica ambiental de la Sierra de Guadalupe*. UNAM.

Barbieri, M. (2008). Biosemiotics: A new understanding of life. In *Naturwissenschaften* (Vol. 95, Issue 7, pp. 577–599). <https://doi.org/10.1007/s00114-008-0368-x>

Barragán Saldaña, A. S. (2020). *Mamíferos en las Áreas Naturales Protegidas “Sierra de Guadalupe, La Armella y El Tepeyac”, Ciudad de México, México*. UNAM.

- Bertalanffy. (1969). *General System Theory* (Braziller).
- Bettinger, P., Boston, K., Siry, J. P., & Grebner, D. L. (2009). *Forest management and planning*. AP.
- Bowen, G. W., & Burgess, R. L. (1981). *A Quantitative Analysis of Forest Island Pattern in Selected Ohio Landscapes*.
- Campos Vargas, M. (2006). *Comparación de un método cualitativo con uno bivariado para la evaluación de peligro por proceso de procesos de ladera en la Sierra de Guadalupe, Edo. de México*. UNAM.
- Cara García, I. A. (2018). *Diagnóstico ambiental y aproximación a la valoración de servicios ambientales, en la cañada del Encinar, Parque Estatal Sierra de Guadalupe, Coacalco, Estado de México*. UNAM .
- Ching, W., Huang, X., K. Ng, M., & Siu, T.-K. (2013). *Markov Chains* (F. S. Hillier & C. C. Price, Eds.; 2nd ed.). Springer .
<http://www.springer.com/series/6161>
- Clewell, A., Rieger, J., & Munro, J. (2005). *Guidelines for Developing and Managing Ecological Restoration Projects*. www.ser.org
- Contreras Rodríguez, Y. de J. (1999). *Estudio preliminar de la avifauna del parque natural Sierra de Guadalupe, Estado de México*. UNAM.
- Correa Huerta, G. (2002). Estudio de Impacto Ambiental en la Subcuenca Llanetes del parque estatal Sierra de Guadalupe ubicada en el municipio de Coacalco, México. In 2002. UNAM.
- Cortés-Jiménez, J. A., Del Pilar Villeda-Callejas, M., Barrera-Escorcía, H., & Lara-Vázquez, J. Á. (2016). Hemiptera (Heteroptera) from Sierra de Guadalupe, Ecatepec, State of Mexico. *Sistemática y Morfología* , 3, 864–868.

Covarrubias-Villa, F., & Guadalupe Cruz-Navarro, M. (2019). The territory landscape appropriation: An epistemological dispute. *Cinta de Moebio*, 64, 82–98. <https://doi.org/10.4067/S0717-554X2019000100082>

De Torre, R., & Magro, S. (2018). *Guía Práctica de Restauración Ecológica*. <https://www.researchgate.net/publication/329059824>

Deloya, D. L. (2018). Ciudad: la agenda ausente de los políticos. El caso de la CDMX City: The absent agenda of the politicians. The case of the CDMX. In *Revista Legislativa de Estudios Sociales y de Opinión Pública* (Vol. 11).

Escobar Delgadillo, J. L. (2007). *Hacia un proyecto de reforestación y absorción de carbono en el Parque Estatal Sierra de Guadalupe como Respuesta al Incremento de GEI*. FES Aragón .

Escobar Delgadillo, J. L. (2012). *Costos económicos y sociales de la deforestación: el caso de la Sierra de Guadalupe*. UNAM.

Estrada H., G. (2021). *Sierra de Guadalupe, un espacio para todos. Curso-taller de educadores ambientales (no formal)*. UACM.

Farina, A. (2004). *Verso una scienza del paesaggio* (Perdisa, Ed.).

Farina, A. (2006). *Principles and Methods in Landscape Ecology Towards a Science of Landscape Landscape Series Landscape Series* (Vol. 3). Springer .

Farina, A. (2017). *Ecología del paisaje*. Publicacions Universitat d'Alacant.

Fraustro Martínez, O. (1998). Derrumbes, deslizamientos y expansión lateral del suelo provocados por la sismicidad en graben de Cuauhtepac: región sur de la Sierra de Guadalupe en la Ciudad de México. *Investigaciones Geográficas* , 38, 15–29.

Frazier, A. E., Bryan, B. A., Buyantuev, A., Chen, L., Echeverria, C., Jia, P., Liu, L., Li, Q., Ouyang, Z., Wu, J., Xiang, W. N., Yang, J., Yang, L., & Zhao, S. (2019). Ecological civilization: perspectives from landscape ecology and landscape sustainability science. In *Landscape Ecology* (Vol. 34, Issue 1). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00772-4>

Galván García, A. H. (2005). *Procesos de remoción en Masa y Zonificación de Peligros en la Ladera Oeste de la Sierra de Guadalupe, Estado de México*. UNAM.

Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., Hallett, J. G., Eisenberg, C., Guariguata, M. R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., Gonzales, E., Shaw, N., Decler, K., & Dixon, K. W. (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology*, 27(S1), S1–S46. <https://doi.org/10.1111/rec.13035>

García Palomo, A., Carlos Valerio, V., López-Miguel, C., Galván-García, A., & Concha-Dimas, A. (2006). Landslide inventory map of Guadalupe Range, north of the Mexico Basin. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 2, 195–204.

Garrocho, C., & Campos Alanís, J. (2013). Réquiem por los indicadores no espaciales de segregación residencial. *Papeles de Población*, 77, 269–300.

Gurrutaga, M. (2003). *Índices de fragmentación y conectividad para el indicador de biodiversidad y paisaje de la CAPV*. <https://www.researchgate.net/publication/302265358>

Hastings, H. M., & Sugihara, G. (1993). *Fractals. A user's guide for the natural sciences*. OxfordUniversity Press.

He, F., & Hubbell, S. P. (2003). Percolation theory for the distribution and abundance of species. *Physical Review Letters*, 91(19). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.198103>

Hernández Avelino, I., Aceves Quesada, J. F., & Legorreta Paulín, G. (2023). Rockfall inventory, statistical analysis and geomorphological mapping of the Area Nueva Locality in the NE portion of the Sierra de Guadalupe, State of Mexico. *Investigaciones Geográficas*, 110. <https://doi.org/10.14350/RIG.60677>

Jaeger, J. A. G. (2000). Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation. *Landscape Ecology*, 15, 115–130.

Landeros-Mugica, K., & Ortega-Andrade, P. (2014). Landeros, calidad del aire. *Behavioral/Medicine*, 4(1), 1–12.

Landsat 8. (2016). *Path 36, Row46*. USGS. <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Lugo Hupb, J., & Salinas-Montes, A. (1996). Geomorfología de la Sierra de Guadalupe (al norte de la Ciudad de México) y su relación con peligros naturales. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13(2), 240–251.

Martínez M., Y. A. (2023). *Intervención Socio Ambiental para la Conservación de la Biodiversidad del Área Natural Protegida Sierra de Guadalupe*. UNAM.

Martínez Najera, R. E. (2017). *Riqueza específica de herpetofauna en la Sierra de Guadalupe Cerro Picacho en el Municipio de Tultitlán, Estado de México*. UNAM.

McLauchlan, K. K., Higuera, P. E., Miesel, J., Rogers, B. M., Schweitzer, J., Shuman, J. K., Tepley, A. J., Varner, J. M., Veblen, T. T., Adalsteinsson, S. A., Balch, J. K., Baker, P., Batllori, E., Bigio, E., Brando, P., Cattau, M., Chipman, M. L., Coen, J., Crandall, R., ... Watts, A. C. (2020). Fire as a fundamental ecological process: Research advances and frontiers. In *Journal of Ecology* (Vol. 108, Issue 5, pp. 2047–2069). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13403>

Medina Sosa, L. D. (2013). *Cálculos de los factores de cuenca y de las escorrentías, en las microcuencas de la Sierra de Guadalupe, Cuenca del Valle de México*. Instituto Politécnico Nacional.

Méndez de la Cruz, F. R. (2018). *Efecto del estrés ambiental en Hyla arenicolor, Hyla eximia y Spea multiplicata de la Sierra de Guadalupe, Estado de México*. UNAM.

Méndez de la Cruz, F. R., Carrillo R., J. L., Santa Cruz, M. V., & Aguilar-Cortez, R. (1992). Observaciones sobre el Status de los anfibios y reptiles de la Sierra de Guadalupe (Distrito Federal-Estado de México). *Anales Del Instituto de Biología de La UNAM*, 249–256.

Mendoza Ruiz, E. E. (2020). *Balance hidrológico-forestal y urbano de la cuenca La Armella, Sierra de Guadalupe, Ciudad de México*. Universidad Autónoma Chapingo .

Muturana, H. R., & Valera, J. F. (1980). *Maturana Autopoiesis and cognition. The realization of the living*. Rediel Publishing Company.

Myers, R. L. (2006). *Convivir con el fuego-Manteniendo los ecosistemas y los medios de subsistencia mediante el Manejo Integral del Fuego*. <http://tncfuego.org>

Navarrete Segueda, A. (2011). *Indicadores de calidad de suelo en matorral de Quercus spp., para la restauración ecológica en el área natural protegida Sierra de Guadalupe, México*. UNAM.

Nieto, G. G., Isabel, M., Salas Rey, M. P., & Madrid,; Análisis del Régimen De Incendios Forestales Y Su Relación Con Los Cambios De Uso del Suelo En La Comunidad Autónoma De. (2015). *Analisis of forest fires regime and its relation with land use changes in the autonomous community of Madrid (1989-2010)*. 16, 281–304. www.geo-focus.org

Ochoa Torres, M. (2011). *Caracterización de los riesgos hidrometeorológicos y de los usos del suelo, en la Sierra de Guadalupe, Cuenca del Valle de México*. Instituto Politécnico Nacional.

Ortíz Medina, G. R. (2014). *Odonatofauna de la Sierra de Guadalupe, en el parque ecológico Ehécatl, Ecatepec, Estado de México*. UNAM.

Palka, E. J. (1995). Coming to grips with the concept of landscape. *Landscape Journal*, 14(1), 63–73.

Puyravaud, J. P. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177(1–3), 593–596. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00335-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00335-3)

Ramírez Contreras, A., & Rodríguez Trejo, D. A. (2007). Efecto de calidad de planta, exposición y micrositio en una plantación de *Quercus rugosa*. *Revista Chapingo. Series Forestales y del Ambiental*, 10(1), 5–11.

Reyes Reyes, B. (2013). *Diagnóstico de la Sierra de Guadalupe en las Inmediaciones del Parque Residencial Coacalco, Estado de México*. Los Reyes Iztacala .

Rocha Gustavo, D. (2015). *Estudio del orden coleóptero de la zona noreste de la Sierra de Guadalupe, Ecatepec Estado De México*. UNAM.

Rodríguez Trejo, D. A. (2014). *Incendios de vegetación. Su ecología, manejo e historia* (Vol. 2). Colegio de Postgraduados .

Rodríguez-Castillo, I., Jiménez-Sánchez, E., & Padilla-Ramírez, J. R. (2019). Coleópteros atraídos en la carroña en una zona afectada por la urbanización en la Sierra de Guadalupe, Estado de México, México. *Entomología Mexicana* , 66, 340–345.

Rojas Briseño, R. G. (2015). *Diagnóstico socio-ecológico de la microcuenca del Arroyo Peña Gorda*. Instituto Politécnico Nacional.

Rojas Pérez, G. A. (2013). *Diagnóstico ambiental del parque estatal, Sierra de Guadalupe, Tlaxiá, Estado de México*. UNAM .

Karlin, S. M. (2016). Etnoecología, ecosemiosis y ecología integral en Salinas Grandes (Argentina). *Revista Etnobiología* , 14(1), 23–28.

Serrano-Muñoz, M., Alfredo Villegas-Guzmán, G., Callejas-Chavero, A., Lomeli-Flores, R., Romero-Rangel, S., Ayala, de, Santo Tomás, col, & Hidalgo, M. (2015). Sinergini y chalcidoidea (hymenoptera) asociados a una agalla inducida por *Atrusca* sp. (Hymenoptera: Cynipidae: Cynipini) de la región noroeste de Sierra de Guadalupe, Estado de México. *Entomología Mexicana*, 2, 155–160.

Serrano-Muñoz, M., Villegas-Guzmán, G. A., Callejas-Chavero, A., Lomeli-Flores, R., Barrera-Ruiz, U. M., Pujade-Villar, J., & Ferrer-Suay, M. (2016). Himenópteros asociados a las agallas de *Andricus quercus lanigera* (Hymenoptera: Cynipidae, Chalcidoidea) de Sierra de Guadalupe, Estado de México. *Biología e Historia Natural*, 3, 177–182.

Simmonds, J. G., & Mann, J. E. (2013). *A first look at perturbation theory*. (4th ed.). Courier corporation .

Stonier, T. (1996). Information as a basic property of the universe. *BioSystem* , 38, 125–140.

Tappeiner, U., Leitinger, G., Zariña, A., & Bürgi, M. (2021). How to consider history in landscape ecology: patterns, processes, and pathways. *Landscape Ecology*, 36(8), 2317–2328. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01163-w>

Tepley, A. J., Thomann, E., Veblen, T. T., Perry, G. L. W., Holz, A., Paritsis, J., Kitzberger, T., & Anderson-Teixeira, K. (2017). Influences of fire–vegetation feedbacks and post-fire recovery rates on forest landscape vulnerability to altered fire regimes. *Jorunal Ecology*, 1925–1940. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12950>

- Troll, C. (2003). Ecología del paisaje. *Ecología del Paisaje* , 68, 72–84.
- Vázquez Leyva, D. (2006). *Estudio de estabilidad de taludes rocosos y tratamientos de estabilidad en la parte oriental de la Sierra de Guadalupe municipios de Ecatepec y Tlalnepantla*. UNAM.
- Vela Correa, G., & Flores-Román, D. (2004). Morphogenesis of Soils with Hardened Layers of the Sierra de Guadalupe, Mexico. *Terra Latinoamericana* , 22(3), 255–265.
- Vela Correa, G., López Blanco, J., & Rodríguez Gamiño, M. de L. (2011). Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones Geográficas* , 77, 18–30.
- Velázquez Flores, M. A. (2014). *Estudio faunístico de los lepidópteros diurnos del Parque Ecológico Ehécatl en la Sierra de Guadalupe Ecatepec, Estado de México*. UNAM.
- Vila Subirós, J., Vargas Linde, D., Llausás Pascual, A., & Ribas Palom, A. (2006). Conceptos y métodos fundamentales en ecología del paisaje (landscape ecology). Una interpretación desde la geografía. *Documents d'analisi Metodologic En Geografia*, 48, 151–166.
- Wu, J. (2007). Past, present and future of landscape ecology. In *Landscape Ecology* (Vol. 22, Issue 10, pp. 1433–1435). <https://doi.org/10.1007/s10980-007-9172-9>
- Wu, J., & Marceau, D. (2002). Introduction. Modeling complex ecological systems: an introduction. *Ecological Modelling*, 153, 1–6.
- Zhu, Z., Mei, Z., Xu, X., Feng, Y., & Ren, G. (2022). Landscape Ecological Risk Assessment Based on Land Use Change in the Yellow River Basin of Shaanxi, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(15). <https://doi.org/10.3390/ijerph19159547>

Capítulo 3. Trayectoria del paisaje de la Sierra de Guadalupe, Valle de México (1994-2019)

RESUMEN.

La Sierra de Guadalupe es el último reducto forestal al norte de la Ciudad de México. Para restaurar su paisaje o manejarlo, es necesario conocer su desarrollo. Este trabajo describe el comportamiento de las masas forestales en la Sierra de Guadalupe en las últimas décadas a partir de la comparación del área y perímetro de los mosaicos, también se aplicaron cuatro índices paisajísticos: Puyravaud (2003), Mikels (2003), Bowen & Burgess (1981) y Jaeger (2000), así mismo, el índice de autocorrelación con la matriz de Markov se encontraron las transiciones más frecuentes. Se definió la Sierra de Guadalupe como un conjunto de microcuencas con una extensión de 16,813 ha. En 1994, 8698 ha estaban urbanizadas, para el 2019 el concreto había cubierto 1741 ha más. Se han establecido 540 ha de bosque y plantaciones, además de las que 1670 ha que ya existían. El bosque de encino se ha extendido por las cañadas en 74 ha.

En general, el paisaje ha sido afectado casi en su totalidad por factores humanos, ya sean con impacto ambiental negativo, como la construcción de colonias, o impacto positivo, como las reforestaciones. Los índices paisajísticos indican que, salvo las plantaciones de eucalipto, la mayoría de las comunidades forestales se han vuelto mosaicos pequeños, dispersos, y con poca área núcleo, configurando un paisaje de grano fino. También, la retracción de la frontera forestal ha promovido mayor fragmentación.

Palabras clave: Autocorrelación espacial, Fragmentación, índices paisajísticos, restauración ecológica, matriz de transición.

Tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Erick Eduardo Mendoza Ruiz.

Director de la tesis: Dante Arturo Rodríguez Trejo.

ABSTRACT.

Sierra de Guadalupe is the last forestry redoubt at the north of Mexico City. To restore or to manage it, is necessary to know its development. This work describes the forest patch behavior on Sierra de Guadalupe along the last decades, from area and perimeter comparison, also were estimated four landscape indexes: Puyravaud (2003), Mikels (2003), Bowen & Burgess (1981) and Jaeger (2000). The autocorrelation index, with the Markov matrix, were found frequent vegetal successions. Sierra de Guadalupe was defined as a set of microbasins with 16,813 ha of extension. By 1994, 8698 ha were urbanized, in the year 2019 the concret had cober 1741 ha more. Was established 540 ha of forest, plus 1670 ha which already existed. Oak forest was spread by small valleys and ravines at 74 ha.

Generally, landscape was affected almost entirely by humans, whether with negative impacts, like urbanconstructions, or positive impacts, as the reforestation. Paisajistic index shows that, except for the eucalypt plantations, most of forest community became as small patches, scattered, and with small core area, it is a fine grain landscape. Also, forest border retraction has promoted more fragmentation.

Keywords: Ecological restoration, fragmentation, landscape indices, spatial autocorrelation, transition matrix.

3.1. Introducción

La Sierra de Guadalupe es el último reducto forestal al norte de la ciudad de México, está enclavada en medio de una de las masas urbanas más grandes del mundo. En 1992, el gobierno del entonces Distrito Federal y del Estado de México gestionaron un préstamo con el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en la Cumbre de la Tierra, la cual se celebró en Rio de Janeiro (Alberto Villavicencio, 2007), que se aplicaron en el muro ecológico y reforestaciones. Este trabajo explica lo que sucedió con aquellos esfuerzos. **Entender la trayectoria del paisaje es fundamental para lograr la restauración ecológica** (Clewell & Aronson James, 2004). Este estudio presenta elementos para la planeación conceptual del manejo de los recursos naturales en la Sierra, concierne a las autoridades, así como para los grupos voluntarios que se esfuerzan en los trabajos de restauración en la Sierra de Guadalupe.

Conocer con exactitud la trayectoria histórica de un paisaje tan degradado como la Sierra de Guadalupe es una tarea compleja (De Torre & Magro, 2018) y solo posible en el intervalo entre la fotografía aérea más antigua y útil y la más reciente. Adoptar en conjunto, Sociedad y Estado, un proyecto de restauración es la única manera de lograr un paisaje que preste los imprescindibles servicios ambientales que constituirán, en un futuro cercano, la resiliencia de la población urbana que vive en la Sierra de Guadalupe ante el calentamiento global. Debido a la crisis climática, la Sierra de Guadalupe se vuelve estratégica en cuanto a recursos fundamentales para la sociedad, como lo es el agua. Los pozos en la Ciudad de México abaten sus niveles precipitadamente. Para asegurar los servicios ambientales del futuro, hay que entender cómo evolucionó el paisaje.

A partir de entonces, el sistema lacustre de la Sierra de Guadalupe fue desapareciendo progresivamente, cómo dejan testimonio las pinturas de José María Velasco (1876-1890). La vegetación que se puede observar desde la colonia española hasta inicios de 1980 indica un claro aumento de la vegetación exótica, relegando a especies nativas, reminiscentes de lo que alguna vez debe haber sido bosque caducifolio tropical (Calderón de Rzedowski & Rzedowski, 2005). Las acciones de restauración sin continuación o coordinación a resultado

en un paisaje de grano fino y muy complejo. **El objetivo del estudio es describir el desarrollo histórico del paisaje en la Sierra de Guadalupe a partir de distintas expresiones matemáticas que miden indirectamente el flujo de la energía entre la matriz y los mosaicos de la Sierra (teoría de percolación).**

3.2. Metodología

La Sierra de Guadalupe es el conjunto de 27 microcuencas exorreicas cuyas partes más baja se encuentran entre la cota 2200 a 2375 msnm. Está compuesto por cincuenta elevaciones, siendo la de menor altitud el cerro Lomas de Cartagena con 2340 msnm y el más alto, el pico de los tres padres que alcanza 3000 msnm. El área de estudio tiene una extensión de 16,813 ha (Figura 1).

Ubicación de la Sierra de Guadalupe

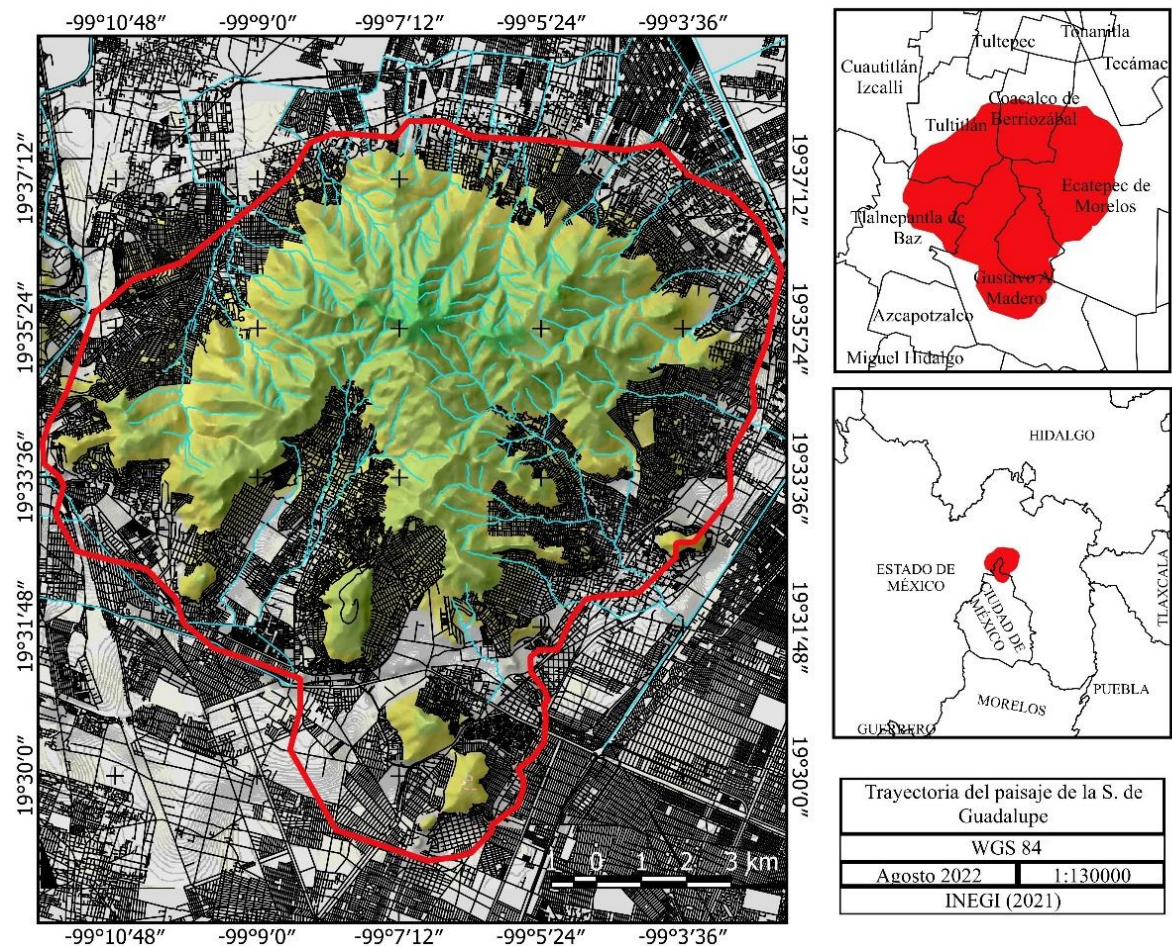


Figura 1. 1. Ubicación de la Sierra de Guadalupe.

Se encuentra en el eje Neovolcánico transversal al norte del valle del Anahuac. La precipitación fue de 591 a 695 mm anuales 1951 a 2010, una temperatura media anual de 23.8 a 24.6°C (CONAGUA, 2010). Su fórmula climática es C(w0)(w) (Vela -Correa & Flores-Román, 2004). Es probable que en las zonas más altas de la Sierra de Guadalupe haya mayor precipitación, y menor temperatura.

Uno de los recursos fueron imágenes del satélite Sentinel 2^a de 12 de febrero de 2021 (Sentinel 2^a, 2021), que, durante la temporada de sequía, no detectan del todo plantas anuales y matorrales caducifolios, pues para entonces ya han tirado sus hojas mientras que los árboles perennes (coníferas, eucaliptos, casuarinas, encinos) conservan su verdor. Los encinares componen las masas forestales naturales de la Sierra de Guadalupe. Al generar el NDVI de estas imágenes son reconocibles las masas forestales, con esta herramienta se trazaron los polígonos, rectificando con las imágenes WordView 3 que Google Earth rescata de(INEGI, 2019), encerrando en un polígono las comunidades que más se parecen por composición y densidad (QGIS, 2023), en esta capa vectorial se incluyeron pastizales y matorrales también.

Los polígonos se ajustaron a las ortofotos de 1994 que ofrece (INEGI, 1994) y se extrajeron los que correspondían a masas forestales. De esta manera se generó la base de datos necesaria para analizar la trayectoria de la cobertura vegetal, natural y artificial de la Sierra de Guadalupe. Comparando la extensión de los nuevos parches, se encontró la tasa de cambio para cada tipo de comunidad y la extensión promedio de cambio. Se considera que un paisaje con pequeños y numerosos parches separados entre sí favorecen la biodiversidad vegetal pero no permiten el desarrollo de fauna que requiere grandes extensiones para desarrollarse (Myers, 2006). Además, un patrón de grano grueso es más conveniente para la Ciudad de México por los servicios ambientales que prestaría en términos de captación, filtración y retención de agua (Pretzsch et al., 2008), misma que causa estragos a la vez que es escasa en las comunidades urbanas que rodean la Sierra de Guadalupe, entre muchos otros.

Una vez identificadas todas las comunidades vegetales, es decir los parches del paisaje, se discernieron las comunidades a someter al análisis de fragmentación. Se sumaron las áreas de cada categoría y en total, para encontrar las diferencias al inicio y final del periodo de estudio. También así, se encontró la extensión y perímetro promedio de cada una de las categorías de comunidades vegetales que se eligieron. Usando el área de estas categorías se estimó la distribución horizontal de las comunidades. En cuanto a la distribución vertical, fue necesario extraer los valores del modelo de elevación digital correspondiente (INEGI, 2022), a partir de la capa vectorial de los bosquetes, clasificándolos según su comunidad vegetal. Después se hizo la gráfica en R (R Core Team, 2020) para visualizar los intervalos.

Dentro de todo el estado del arte de la ecología del paisaje los índices que se usaron son: media de cambio anual, razón de cambio (Puyravaud, 2003), índice fragmentación (Gurruxtaga, 2003), índice de disección (Bowen & Burgess, 1981), índice de cohesión (Jaeger, 2000), índice de autocorrelación (Zhu et al., 2022), y matriz de transición de Markov (Ching et al., 2013).

Para estimar la media del cambio en los mosaicos, se aplicó en la calculadora de campos (QGIS, 2023):

$$tc = \frac{A_2 - A_1}{t_2 - t_1}$$

Donde: A es el área del mosaico y t el año en que se presentó esa condición, el subíndice 2 indica una fecha más reciente y tc es la media de cambio anual en hectáreas. Razón de cambio de (Puyravaud, 2003):

$$r = \left(\frac{100}{t_2 - t_1} \right) \ln \left(\frac{A_2}{A_1} \right)$$

Esta representa la razón de interés compuesto ® con el que han cambiado los mosaicos expresados en porcentaje por año.

Índice de fragmentación (Gurruxtaga, 2003) permite comparar el paisaje a través del tiempo:

$$F = \frac{A_t}{(n)(Rc)}$$

A_t representa el área total del área de estudio, específicamente el área que correspondía a las zonas no urbanas de la Sierra de Guadalupe en 1994 y 2018

respectivamente. **Dónde n es el número de parches de cada comunidad, en algunas comunidades los parches en 1994 son igual a cero, para estos no aplica el índice de fragmentación en este periodo, es el caso de los cedros blancos y la casuarina. Rc es la dispersión de las manchas, expresada como:**

$$Rc = 2dc\left(\frac{\lambda}{\pi}\right)$$

La expresión dc es la distancia media desde el centro un mosaico al centro del mosaico más cercano. λ es la densidad media de las manchas, igual al cociente del número de manchas entre la superficie total del área (ha) multiplicado por cien. Está ecuación no considera el área de los parches, en su lugar utiliza la distancia entre ellos.

Índice de disección de(Bowen & Burgess, 1981):

Relaciona el perímetro de cada parche (Pi) con el perímetro de un círculo cuya área es la misma del parche (Ai), según la siguiente igualdad:

Aplicando la igualdad para el conjunto de todos los mosaicos se obtiene:

$$Dlt = \frac{\sum Pi}{2\sqrt{\pi} \sum Ai}$$

Luego, fue ajustado a todo el paisaje en porcentaje, s es la superficie no urbana:

$$Dlt\% = (Dlt)\left(\frac{100}{\sqrt{s}}\right)$$

Índice de Cohesión(Jaeger, 2000):

Es la probabilidad de que dos animales de la misma especie se encuentren estando en el sitio de investigación.

$$C = \sum \left(\frac{Ai}{At}\right)^2$$

Donde C es el índice de cohesión, Ai es el área de un parche cuando i tiene rango de uno al número total de parches en todas las categorías, y At es área total del paisaje (depende del año).

Este índice aplica a todo el paisaje. Para acercarse aún más a la descripción de la trayectoria del paisaje en la Sierra de Guadalupe, se empleó el concepto de autocorrelación espacial, que nos permite **cuantificar la agrupación de los datos. El estadístico que se usó para este propósito es el siguiente. Índice de Moran** (Zhu et al., 2022):

$$I = \left(\frac{n}{\sum_i \sum_j w_{ij}} \right) \left(\frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \right)$$

Donde w_{ij} es la matriz de distancias de cada uno de los píxeles, lo que determina si son vecinos o no, x es la observación, i y j corresponde a dos diferentes píxeles, de tal manera que w_{ij} es una matriz cuadrada donde se encuentra la distancia entre cada una de las parejas de píxeles resultantes de la imagen rasterizada del paisaje (anteriormente producida) a una resolución de 100 m por lado de píxel (dando como resultado una matriz cuadrada de más de cuatro millones de elementos), x es el uso de suelo establecido con anterioridad (por ejemplo, para el bosque de encino tiene la categoría 4).

El software R (R Core Team, 2020) cuenta con una librería capaz de calcular el índice de Moran, solo es necesario administrar una matriz con las coordenadas (dos vectores) y la categoría de uso de suelo a la que corresponde el píxel (o la mayoría del píxel). Todas las ecuaciones anteriores permiten estimar cuantitativamente el éxito de los trabajos de restauración.

También se obtuvo la matriz de transición de Markov, que permite entender la sucesión ecológica y transición que se ha presentado en la Sierra de Guadalupe, así como los efectos antropogénicos sobre el paisaje. Dicha matriz está compuesta por la probabilidad de una categoría para transformarse en otra (Ching et al., 2013). Se rasterizaron (resolución 5 m por artista de píxel) los archivos vectoriales de uso de suelo de 1994 y 2019, estimando la proporción en la que un uso de suelo cedió su territorio a otro, esto se llama matriz de transición

En general, la matriz de transición da cuenta de las sucesiones ecológicas más comunes en la Sierra de Guadalupe, o bien, los cambios antropogénicos.

3.3. Resultados y discusión

En 1994 gran parte de la cuenca, la que corresponde a la parte baja y más llana, había sido lotificada y habitada, es muy evidente que la densidad de ese tejido urbano dejaba descubierto el suelo desnudo o residuos de vegetación, que en conjunto representaban un atenuante ambiental en lo que respecta a la recarga hídrica, amortiguamiento de altas temperaturas, calidad del aire, entre otros. En 1994 se estableció el muro ecológico solo en el lado correspondiente del otrora Distrito Federal (hoy Ciudad de México), que ha servido para detener parcialmente el avance urbano.

En cuanto a la matriz del paisaje, los matorrales han aumentado en densidad, ocupan ahora grandes extensiones dentro de la Sierra de Guadalupe, que pueden considerarse, conservadas, o recuperadas, han superado las perturbaciones de las últimas décadas, o bien no han pasado por ellas, y por lo tanto prestan más servicios ambientales que aquellos matorrales que se han fragmentado para dar paso a los pastizales, o los pastizales que no cambiaron su condición. En cuadro 1, se muestra el porcentaje de uso de suelo correspondiente a cada categoría.

Cuadro 1. 1. Distribución de los usos de suelo y vegetación.

Uso de Suelo y Vegetación	1994 (ha)	2019 (ha)	Δ (ha)
1.Tejido urbano continuo	51.73	58.39	6.66
2.Agricultura	3.57	1.19	-2.38
3.Matorral xerófilo	14.55	8.97	-5.58
4.Pastizal	10.08	5.91	-4.17
5.Matorral xerófilo/pastizal	5.75	11.30	5.55
6.Tejido urbano discontinuo	4.16	1.01	-3.15
7.Artefacto	0.24	0.19	-0.05
8.Bosque heterogéneo	0.92	1.33	0.42
9.Bosque heterogéneo abierto con sotobosque de matorral xerófilo	0.64	0.74	0.10
10.Bosque heterogéneo abierto en pastizal	0.28	0.33	0.05
11.Bosque de encino denso	1.83	1.96	0.14
12.Bosque de encino abierto con sotobosque de matorral xerófilo-pastizal	0.11	0.45	0.33
13.Plantación densa de eucalipto	3.65	5.06	1.41
14.Plantación abierta de eucalipto con sotobosque de matorral xerófilo	0.84	1.10	0.26
15.Plantación abierta de eucalipto con sotobosque de matorral xerófilo-pastizal	0.38	0.55	0.18
16.Bosque natural/ plantación de pirul	0.03	0.41	0.38
17.Bosque natural/ plantación de pirul abierto con sotobosque de matorral xerófilo	0.50	0.79	0.30
18.Bosque natural/ plantación de pirul con sotobosque de matorral xerófilo-pastizal	0.76	0.27	-0.50
19.Plantación de pino	0.005	0.04	0.03
20.Plantación de casuarina		0.01	0.01
21.Plantación de cedro blanco		0.11	0.11
Total	S.G.	16,813	

Nota: Artefacto se refiere a construcciones, minas, basureros.

El área total del conjunto de microcuencas es de 16,813 ha, por lo tanto, la extensión sin urbanizar es cercana a 8698 ha en la actualidad y fue de 6945 ha en 1994, es decir que el concreto cubrió 1741 ha más. Es muy importante no perder de vista que dicho fenómeno es una de las razones por la que varios

índices paisajísticos indican una tendencia de mayor fragmentación en la actualidad. Los pastizales y matorrales fueron ocupados por nuevas colonias principalmente. Mientras que otros pastizales han desarrollado matorrales en manchones u ocupando todo lo que antes era pastizal. Este efecto se puede observar claramente en las escorrentías por las que ha fluído el agua durante décadas y han promovido matorrales, nopaleras, y árboles aislados; y de igual forma con los matorrales que, en algunos casos han cedido pequeñas áreas. En la actualidad cerca de 706 ha de matorral y pastizal se perdieron. Es posible distinguir numerosos nopales entre muchos matorrales, son nopales silvestres envejecidos de los que es muy difícil descifrar la edad, pero es presumible que ya existían en 1994.

La matriz del paisaje de la Sierra de Guadalupe está compuesta por pastizales, matorrales abiertos y cerrados, y en toda ella, se encuentran árboles aislados, principalmente de eucalipto (*Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus camaldulensis*), pirul (*Schinus molle* L.), pero también otras especies como encinos (principalmente *Quercus rugosa* Neé pero hay varias de este género), o copales (*Bursera cunneata* Schltdl, *Bursera fagaroides* Kunth), entre otras. Hacia 2019 la matriz ocupaba un total de 4400 ha (26 % para todas las microcuencas y 63% para el paisaje no urbanizado) y en 1994 fueron 5100 ha (30% para todas las microcuencas y la misma proporción para el paisaje no urbanizado).

En general el bosque heterogéneo, compuesto principalmente por eucaliptos y pirules, aunque puede contener cualquier otra especie (desde cazahuates *Ipomea murucoides* Roem. et Schult, hasta zapotes blancos *Casimiroa edulis* Llave & Lex) se mantuvo constante, porque las zonas que sucedieron hacia las colonias se establecieron sobre los terrenos agrícolas, de pastizal y matorral afectando apenas algunas hectáreas de bosque heterogéneo. En la Sierra de Guadalupe se pueden encontrar árboles de todos los tipos, araucarias, ceibas (que son sagradas para una religión importante en la Sierra de Guadalupe, el Palo mayombe), ahuehuetes, aguacates, y un largo etcétera cuya razón de existir es la voluntad de los vecinos, para eso la categoría “bosque heterogéneo” que está compuesto principalmente de pirul y eucalipto. Sin embargo, aunque existen

grandes extensiones de la Sierra donde no se encuentra un solo árbol, la mayor parte de ella sostiene árboles aislados de eucalipto, pirul, y en menor frecuencia copales, pinos, cazahuates, entre muchos otros.

El encinar representa la comunidad más conservada de la Sierra de Guadalupe y ocupa una extensión importante en la parte más alta, después del cerro del Chiquihuite. Seguramente para 1994 ya existían brinzales de encino en las cañadas, favoreciéndose de su humedad, pero no se pueden apreciar en las ortofotos de esa época, en un fenómeno parecido al del desarrollo de matorrales. Hacia 2019 ya se observan corredores de encino correspondientes a las cañadas, entre encino cerrado y encino abierto, han aumentado 78 ha de cobertura con este tipo de bosque.

Las plantaciones de eucalipto son la comunidad (artificial) más importante de la Sierra de Guadalupe si se habla de extensión en cobertura forestal; 27 años antes ya existían 818 ha con plantaciones de eucalipto en diferentes densidades, hoy día existen cerca de 1128 ha. El pirul se ha establecido por su propia cuenta y también a partir de reforestación; el cambio de uso de suelo indica un aumento en la densidad de las masas abiertas que se observan en 1994 y la aparición de individuos que constituyen masas abiertas dónde antes existían matorrales. En las fotos aéreas de 27 años atrás, tan solo se encuentra un bosque de pino, en el cerro Zacatenco, ahora las masas de pino alcanzan 5.95 ha, además se han establecido nuevas plantaciones de casuarina (2.1 ha) y cedro blanco (14.4 ha). La figura 2 muestra la comparación de los mosaicos de 1994 y 2019. La ciudad se constituyó en las zonas bajas de las microcuencas, desde la altitud 2226 a 2610 msnm en la actualidad, y para 1994 era desde los 2226 hasta los 2605 msnm. El avance se detuvo en las zonas con más pendiente. La colonia vista hermosa es la que alcanza mayor altitud en la Sierra de Guadalupe.

Masas forestales de la Sierra de Guadalupe

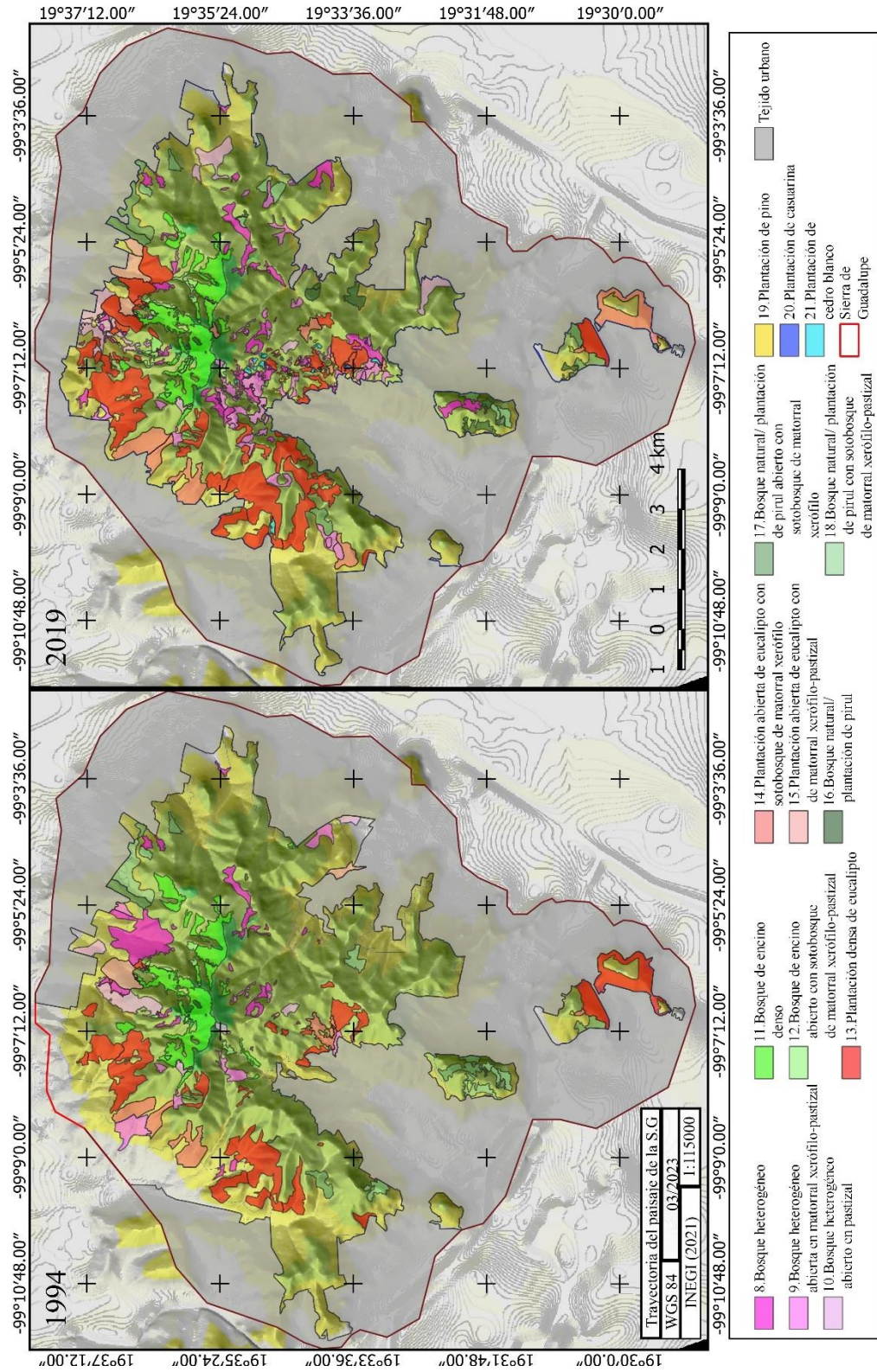


Figura 1. 2. Masas forestales de la Sierra de Guadalupe.

Cuadro 1. 2. Distribución de los usos de suelo y vegetación.

Clase dominante	Densidad/Sotobosque	1994 (msnm)		2019 (msnm)	
Bosque heterogéneo	8.Denso	2389	2606	2468	2677
	9.Abierto con sotobosque de matorral xerófilo	2331	2561	2480	2614
	10.Abierto en pastizal	2344	2618	2423	2532
Bosque de encino	11. Denso	2624	2805	2617	2802
	12.Abierto con sotobosque de matorral xerófilo-pastizal	2562	2631	2528	2630
Plantación de eucalipto	13.Denso	2467	2635	2403	2512
	14.Abierto con sotobosque de matorral xerófilo	2364	2428	2372	2394
	15.Abierto con sotobosque de matorral xerófilo-pastizal	2396	2466	2371	2433
Bosque natural/ plantación de Pirul	16.Denso	2456	2643	2395	2539
	17.Abierto con sotobosque de matorral xerófilo	2369	2518	2370	2477
	18.Abierto con sotobosque de matorral xerófilo-pastizal	2384	2499	2480	2561
Plantación de Pino	19.Cerrado	2473	2483	2350	2533
Plantación de Casuarina	20.Cerrado			2459	2462
Plantación de Cedro blanco	21.Cerrado			2459	2680

En el cuadro 2 se observa que la mitad de la cobertura forestal de bosque heterogéneo ocupaba una gran franja de los 2331 a los 2618 msnm, pero se encontraba dispersa hasta los 2800 msnm y desde los 2605 msnm, para 2019 más del 25% del bosque heterogéneo había desaparecido las altitudes menores a 2423 msnm, casi cien metros más que en 1994, cedidos a nuevas viviendas. Otra diferencia es que las masas abiertas del bosque heterogéneo en 1994 se agrupaban en altitudes de 2331 a 2618 msnm, tanto con sotobosque de matorral xerófilo como masas sin sotobosque (con pastizal), conjuntando 50% de superficie en esas altitudes. En 2019 las plantaciones de eucalipto con sotobosque de matorral ocuparon posiciones más altas en comparación a las plantaciones con pastizal (Cuadro 2 y Figura 3).

En el cuadro 2 se lee la altitud de la mitad de los píxeles cubiertos por cada comunidad vegetal. Se puede observar que el cambio en el bosque de encino cerrado es apenas perceptible, en tanto que el bosque de encino abierto se ha extendido por las cañadas. La mitad de las plantaciones de eucalipto cerrado se encontraron muy extendidos en 1994 mientras que en 2019 las reforestaciones posteriores a 1994 las concentraron en una franja más pequeña y baja (2403-2512 msnm).

En las categorías, plantación de eucalipto abierto (con matorral xerófilo y pastizal) se observa apenas una pequeña diferencia en la altitud. Tanto en 2019 como hacia 1994 las masas de eucalipto abiertas con sotobosque de pastizal o matorral se encuentran en alturas similares. La figura 3 muestra la distribución de las altitudes, aquí se observa la totalidad de los datos (no solo los centrales).

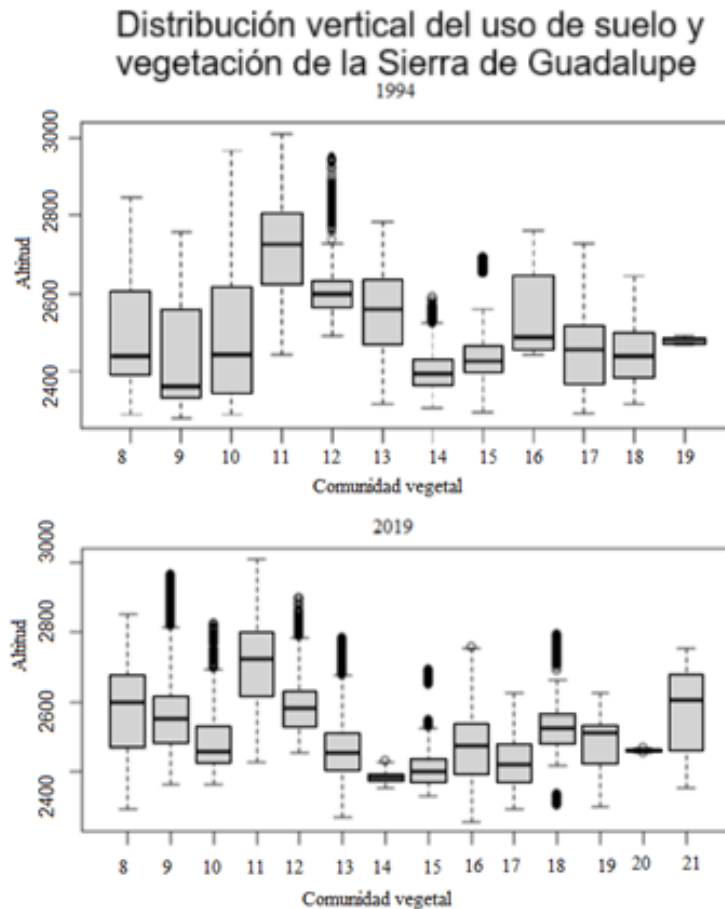


Figura 1. 3. Distribución vertical del uso de suelo en la Sierra de Guadalupe. Los números de la comunidad vegetal son los mismos se señalan en el cuadro 1.

En cuanto a las masas de pirul, comparten un nicho altitudinal muy parecido al del eucalipto. Igual que en esas masas forestales, las masas abiertas comparten altitudes ya sea con matorral xerófilo o con pastizal. Por lo demás, las plantaciones de pino, casuarina y cedro blanco se desarrollaron y fueron visibles en las imágenes después de 1994, principalmente pino y cedro blanco ocupan las mismas altitudes que aquellas de otras especies introducidas, eucalipto, y pirul. Las masas artificiales de casuarina apenas ocupan dos manchones significativos, aunque se presentan pequeños grupos a lo largo de toda la Sierra, lo mismo sucede con las plantaciones pino y cedro blanco, que tiene individuos aislados en toda la Sierra. En la zona y en general en los bosques de la Ciudad de México, el pastizal limita la regeneración, supervivencia de plantaciones y crecimiento de pinos debido a la competencia que representa (Sierra Pineda et al., 1991).

Tal como se observa en la figura 3, la cobertura forestal de todas las clases se encuentra en todas las altitudes de la Sierra (salvo los encinares) de una manera casi aleatoria, como después comprobará. Las especies nativas no son raras en la Sierra de Guadalupe, pero se encuentran dispersas en masas forestales con especies exóticas, solamente el bosque encino compone una masa forestal con especies nativas, tiene una superficie de 404 ha, y las especies exóticas componen una superficie de 1805 ha. En suma, la Sierra de Guadalupe es un paisaje altamente complejo dominado principalmente por masas artificiales de especies introducidas.

Un sistema tan complejo como la Sierra de Guadalupe tiene distintas dimensiones que pueden medirse, muchas caras que pueden analizarse. Destacan dos hechos fundamentales de los párrafos anteriores: la superficie arbolada ha aumentado en más de 540 ha, principalmente a partir de especies introducidas, y la superficie urbana de la Sierra de Guadalupe devoró más de mil hectáreas del paisaje. En el cuadro 3, se muestran las áreas de cada categoría por año, el número de parches (n), el cambio entre estos, la tasa de cambio, entendiendo que las masas forestales que no se observan para 1994 ya existían como brinzales o monte bravo (la mayoría son masas coetáneas), por lo que la tasa de cambio pierde un poco de sentido, pero no pierde su valor como indicador o meta. Algo similar sucede con la razón de crecimiento r de toda la extensión de las masas coetáneas; ya existían en 1994, pero no se veían.

Cuadro 1. 3. Área, número de parches, tasa y razón de cambio.

Dominante	Densidad/Sotobosque	1994		2019		Diferencia		Tc	
		Área (ha)	Parches	Área (ha)	Parches	(ha)	(parche)	(ha año ⁻¹)	r (%)
Bosque heterogéneo	Cerrado	153.91	23	223.95	52	70.04	29	2.80	1.56
	Abierto con matorral xerófilo	106.89	12	123.87	38	16.99	26	0.68	0.61
	Abierto con pastizal	47.66	5	63.18	10	15.52	5	0.62	1.17
Bosque de encino	Cerrado	306.86	14	329.65	14	22.80	0	0.91	0.30
	Abierto con matorral xerófilo-pastizal	18.93	9	70.73	20	51.80	11	2.07	5.49
Plantación de eucalipto	Cerrado	613.82	25	851.07	56	237.25	31	9.49	1.36
	Abierto con matorral xerófilo	140.65	7	184.16	12	43.51	5	1.74	1.12
	Abierto con matorral xerófilo-pastizal	63.72	4	93.18	4	29.46	0	1.18	1.58
Bosque natural/ plantación de pirul	Cerrado	4.62	6	68.36	17	63.74	11	2.55	11.23
	Abierto con matorral xerófilo	83.45	9	133.65	12	50.19	3	2.01	1.96
	Abierto con matorral xerófilo-pastizal	128.55	8	44.86	7	-83.70	-1	-3.35	-
Plantación de pino	Cerrado	0.82	1	6.41	15	5.59	14	0.22	8.58
Plantación de casuarina	Cerrado			2.13	2	2.13	2	0.09	
Plantación de cedro blanco	Cerrado			18.24	14	18.24	14	0.73	
Total		1669.87	123	2213.43	273	543.56	150	21.74	2.55

Nota: Tc corresponde al cambio por año y r razón de cambio (Puyravaud, 2003).

En otras masas como el bosque/plantación de pirul, bosque heterogéneo o algunos encinares (mismos que son incoetáneos), la razón de crecimiento r sí tiene aplicación. Sin embargo, en la zona de estudio el crecimiento regular que pueda tener cualquier masa en su cobertura se ve afectado por disturbios (reduciendo, alteraciones antropogénicas). Todas las categorías se mantuvieron o aumentaron el número de parches salvo el bosque/plantación de pirul abierto con pastizal, no así para el área, pues en varias categorías se redujo esta. Muy importante anotar que la tasa de cambio más alta es la del eucalipto, lo cual da

una idea del esfuerzo de reforestación que se ejecutó hace décadas, en cuanto a r, un gran desarrollo en el bosque/plantación de pirul cerrado corresponde a masas forestales de pirul abiertas que aumentaron en densidad, lo cual posiblemente se dio sin intervención humana.

Le sigue el bosque de encino abierto, mismo que ha tenido una razón de cambio tan alta por extenderse sobre las cañadas. Se observa el impacto en el bosque de heterogéneo y también la consolidación o desaparición del bosque/plantación de pirul abierto. Salvo esos datos la razón de cambio (Puyravaud, 2003) ronda entre 1.1% y 1.9%. El cuadro 4 demuestra el cambio en la forma de los mosaicos (área y perímetro).

Cuadro 1. 4. Área, número de parches, tasa y razón de cambio.

		1994		2019		Diferencia	
Densidad/Sotobosque							
Clase dominante		Área (ha)	Perímetro (km)	Área (ha)	Perímetro (km)	Área (ha)	Perímetro (km)
Bosque heterogéneo	Cerrado	6.69	1.7	4.31	1.3	-2.38	-0.5
	Abierto con matorral	8.91	1.6	3.26	1.1	-5.65	-0.5
	Abierto con pastizal	9.53	1.8	6.32	1.8	-3.21	0.0
Encino	Cerrado	21.92	4.0	23.55	4.7	1.63	0.7
	Abierto con matorral-pastizal	2.10	0.9	3.54	1.3	1.43	0.4
Eucalipto	Cerrado	24.55	3.0	15.20	2.1	-9.36	-1.0
	Abierto con matorral	20.09	2.7	15.35	1.9	-4.75	-0.7
	Abierto con matorral-pastizal	15.93	1.8	23.29	2.9	7.37	1.1
Pirul	Cerrado	0.77	0.5	4.02	1.1	3.25	0.6
	Abierto con matorral	9.27	1.7	11.14	1.9	1.86	0.2
	Abierto con matorral-pastizal	16.07	2.6	6.41	1.3	-9.66	-1.2
Pino	Cerrado	0.82	0.4	0.43	0.3	-0.39	-0.1
Casuarina	Cerrado			1.06	0.6	1.06	0.6
Cedro blanco	Cerrado			1.30	0.7	1.30	0.7
Promedio		11.39	1.89	9.73	1.80	-1.65	-0.09

Como se observa, el área de los parches en general se ha reducido, esto se debe a que se han establecido numerosos y pequeños manchones forestales. Hay que destacar que tanto las plantaciones de eucalipto, como el bosque de encino, siempre han sido las categorías cuyos mosaicos son más grandes. En general el perímetro de los mosaicos varía entre uno y tres kilómetros, y ha aumentado apenas unos cientos de metros en las últimas décadas. En cuanto al índice de fragmentación (Gurruxtaga, 2003), en el cuadro 5, no considera el área de los parches, es un índice que relaciona la distancia entre los parches de una

categoría, con la extensión del área de estudio, en este caso, la superficie no urbanizada de la cuenca.

Cuadro 1. 5. Índice de fragmentación (Gurruxtaga, 2003) y de cohesión (Bowen & Burgess, 1981).

Clase dominante	Densidad/Sotobosque	F		Dlt%	
		1994	2019	1994	2019
Bosque heterogéneo	Cerrado	4.28	0.52	13.22	14.78
	Abierto con matorral	2.06	1.20	11.34	12.68
	Abierto con pastizal	11.20	6.40	6.76	7.56
Encino	Cerrado	9.19	6.89	10.91	12.20
	Abierto con matorral-pastizal	12.83	4.16	9.00	10.06
Eucalipto	Cerrado	1.17	0.37	12.03	13.45
	Abierto con matorral	10.74	4.46	5.18	5.79
	Abierto con matorral-pastizal	35.51	90.71	3.64	4.07
Pirul	Cerrado	9.79	4.35	6.71	7.51
	Abierto con matorral	10.83	5.66	5.83	6.52
	Abierto con matorral-pastizal	16.14	16.55	4.19	4.68
Pino	Cerrado		16.03	6.04	6.76
Casuarina	Cerrado		272.93		2.94
Cedro blanco	Cerrado		7.05		7.30
		11.25	31.24	7.90	8.31

El índice de fragmentación (F) es grande cuando se trata de poca fragmentación y pequeño cuando se habla de mayor fragmentación. Reuniendo todos los mosaicos y aplicando este índice, la distancia entre manchones disminuye y, por lo tanto, la fragmentación. Lo más válido es entender el índice por categoría.

Cuadro 1. 6. Cambios totales de la masa forestal de la Sierra de Guadalupe.

	1994	2019	Diferencia
Área total bosquetes	1669.87	2213.43	543.56
Área total zona forestal	8686	6945	-1741.00
F	0.19	0.04	-0.15
C	0.01	0.01	
Dit%	20.18	31.034682	
Incremento medio			22.65
r			0.0117

Nota: F es el índice de fragmentación C (Gurrutaga, 2003) , es el índice de cohesión (Jaeger, 2000). Dit% el índice de disección (Bowen & Burgess, 1981) y r la tasa de crecimiento (Puyravaud, 2003).

En las últimas dos columnas del cuadro 5, se lee el índice de disección (Bowen & Burgess, 1981), que compara el perímetro del parche con el perímetro de un círculo con la misma área, pues el círculo es la figura geométrica que alberga la mayor área núcleo. Las categorías que se acercan al 100% son las más disectadas. Cabe destacar que el eucalipto aumentó su complejidad junto con el pirul abierto con matorral en un porcentaje muy somero. El cuadro 6 es el concentrado de cuadros anteriores, incluye el índice de cohesión (Jaeger, 2000). Este último índice C es la probabilidad de encuentro de dos animales posicionados aleatoriamente en el paisaje, tal como se observa, la probabilidad es nula, tanto para 1994 como actualmente. También se observa el promedio del índice de Cohesión (Dit%) con la ligera variación de la que se habló en el párrafo anterior. Ahora, con celdas del paisaje más pequeñas aún, la matriz de transición de Markov se muestra en el cuadro 7.

Destacan las siguientes transiciones, algunas relacionadas con sucesiones ecológicas y otras con influencia antropogénica, la probabilidad de transición en el cuadro 7 se refiere a la superficie.

Tejido urbano discontinuo a Tejido urbano continuo. El tejido urbano continuo se consolidó completamente sobre el tejido urbano discontinuo de 1994. Esta

transición tuvo lugar, en su mayoría, en el norte de la Sierra de Guadalupe, donde existieron grandes extensiones de agricultura y tejido discontinuo, ahí no se levantó muro ecológico.

Pastizal a matorral. La matriz del paisaje que está compuesta por matorral y matorral con pastizal, se mantienen sin cambios en más de la mitad de las ocasiones, mientras que el pastizal sucedió a matorral con pastizal en 46%.

Matorral a bosque heterogéneo. El bosque heterogéneo cerrado se estableció en un 30% sobre matorrales, el bosque heterogéneo abierto con sotobosque de matorral lo hizo en un 59%. El 36% de bosque heterogéneo abierto en pastizal se estableció sobre matorral-pastizal.

Masas de encino. El encinar denso no presentó cambios significativos, en cuanto al encino abierto con matorral-pastizal, se desarrolló casi por partes iguales en pastizales y matorrales, esto debido a las acciones de restauración y a que los encinos han aprovechado las cañadas, dada la mayor humedad con la que cuentan. Un 12% del nuevo encinar abierto con sotobosque de matorral-pastizal se estableció en el bosque heterogéneo abierto. El bosque heterogéneo puede prestar las condiciones suficientes para suceder al encino.

Matorral a Eucalipto. El eucalipto se desarrolló cómo una masa abierta o cerrada, sobre los páramos que eran matorral, pastizal o matorral-pastizal.

Cuadro 1. 7. Matriz de transición de Markov.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Tejido urbano continuo	1	0.20	0.04	0.10	0.06	0.49		0.01	0.03	0.02			0.01		0.01						
Agricultura	2	0.64	0.14	0.07	0.02		0.11	0.01					0.01								
Matorral	3	0.01	0.71	0.15	0.01			0.01	0.01		0.01		0.06	0.01					0.01		
Pastizal	4	0.01	0.03	0.90	0.02	0.01		0.01					0.02								
Matorral/pastizal	5	0.06	0.46	0.16	0.29			0.01			0.01										
Tejido urbano discontinuo	6	0.01	0.13	0.05	0.18	0.62															
Artefacto	7	0.43	0.00		0.02		0.54						0.01								
Bosque heterogéneo	8	0.05	0.30	0.10	0.10	0.04		0.28	0.09		0.01		0.03								
Bosque heterogéneo	9	0.03	0.59	0.01	0.12				0.23						0.01						
abierto con sotobosque de matorral	10	0.00	0.06	0.08	0.36			0.07	0.11	0.30	0.01										
Bosque heterogéneo abierto en pastizal	11	0.02	0.06	0.05	0.02			0.03			0.83										
Encino	12	0.02	0.24	0.26	0.07			0.12			0.01	0.25		0.01	0.02						
Encino abierto con sotobosque de matorral-pastizal	13	0.02	0.12	0.05	0.18			0.01					0.55	0.02	0.04						
Eucalipto	14	0.12	0.12	0.12				0.01						0.63							
Eucalipto abierto con sotobosque de matorral	15		0.48		0.35										0.16						
Eucalipto abierto con sotobosque de matorral-pastizal	16	0.02	0.19	0.01	0.13							0.02				0.04		0.60			
Pirul	17	0.01	0.04		0.00												0.64	0.31			
Pirul abierto con sotobosque de matorral	18		0.52	0.01	0.10													0.37			
Pirul abierto con sotobosque de matorral-pastizal	19	0.34	0.37		0.14			0.01					0.01						0.14		
Pino	20	0.96	0.03											0.02							
Casuarina	21	0.41	0.48										0.12								
Cedro blanco																					

Masas de pirul. Un 60% de las masas cerradas de pirul, eran masas abiertas con matorral-pastizal. Un tercio de las masas abiertas de pirul con matorral xerófilo proviene de masas abiertas de pirul con pastizal. Más de la mitad de la extensión de las masas abiertas de pirul, con matorral xerófilo-pastizal en el sotobosque se establecieron donde antes había matorral xerófilo, o matorral xerófilo-pastizal

Pino, casuarina y cedro blanco. Las tres categorías, en 1994 eran en su mayor parte, agricultura o matorral.

En cuanto a la correlación, se dividió el paisaje forestal de la Sierra en celdas, en 1994 fue de 0.057 y para 2019 de 0.074, esto indica una dispersión aleatoria, es decir, el flujo de energía será más interrumpida que en un paisaje de patrón grueso, pero menos que un paisaje cuyo índice sea negativo

3.4. Conclusiones

En este trabajo se muestra la trayectoria del paisaje de la Sierra de Guadalupe, entendida como la ruta de desarrollo de un ecosistema a través del tiempo (Clewell & Aronson James, 2004). Por lo general, la restauración ecológica tiene por objetivo alcanzar un estado anterior, para esto es fundamental entender la trayectoria del paisaje (Clewell et al., 2005). En el caso de la Sierra de Guadalupe, los bosques primarios se aprovecharon casi en su totalidad hacia finales de 1910, para ese entonces también se habían drenado los grandes lagos de la Ciudad de México (Contreras Servín, 2015). El clima era distinto en ese entonces (Jáuregui Ostos, 2000) y probablemente también el suelo, las condiciones actuales permiten que especies originales sigan desarrollándose en masas aisladas menores a cientos de metros cuadrados en algunos casos. En esta situación están especies como el copal, el cazahuate y el chapulixtle entre otras.

El escenario de restauración de la Sierra de Guadalupe concuerda con un paisaje degradado que puede volver a su forma primaria (Clewell et al., 2005), cuya reminiscencia se encuentra en los encinares y matorrales xerófilos viejos. Describir la trayectoria del paisaje como aquí se hace se vuelve necesario para determinar qué comunidades vegetales se pueden incluir sobre qué otras y cómo

se han desarrollado las que ahora existen, así como los efectos que han tenido las estrategias anteriores, y delinear así, hacia dónde se van a dirigir los esfuerzos. El concepto de que especies introducidas son inaceptables en áreas naturales protegidas se vuelve un tanto frágil para las coníferas en la Sierra, pues existen especies introducidas que han demostrado buena aclimatación.

Por otra parte, existen especies que son ajenas al paisaje, como el eucalipto y el pirul, especies exóticas y naturalizada respectivamente, que han demostrado frugalidad en los matorrales y pastizales, y que componen gran parte de las masas forestales de la Sierra. Por supuesto, estas no deben de plantarse más, pero sí deben reconocerse los servicios ambientales que brindan. Esas plantaciones resultan tener menor índice de disección respecto al encinar, o el bosque heterogéneo (con especies nativas), cuentan con áreas núcleo más grandes y mayor probabilidad de albergar especies en su interior (Bowen & Burgess, 1981).

Aunque la creencia general es que la “naturaleza” se ha deteriorado en la Sierra de Guadalupe, está demostrado que al menos las comunidades forestales han aumentado en 540 ha. De estas últimas 461 ha son de eucalipto y pirul, en 1994 ya existían 1344 ha con eucaliptos y pirul. Casi toda la extensión de la Sierra de Guadalupe está configurada como un paisaje de grano fino según los anteriores índices, es probable que las especies que requieran de grandes extensiones forestales no se puedan desarrollar (Myers, 2006). La configuración del paisaje es el resultado tanto de la vegetación natural, como de su alteración por el hombre (disturbios), los intentos de este por revegetar y perturbaciones naturales.

Las tendencias detectadas permiten afirmar que el bosque heterogéneo, el de encino y las plantaciones de pino, eucalipto y, pirul son estables. Se pone de relieve la necesidad de realizar su manejo forestal, por ejemplo, la aplicación de aclareos y repoblaciones bien fundamentadas, sin lo cual se facilita el fin de estas masas: la exclusión de fuego promueve la acumulación de combustibles forestales. En la zona de estudio y en general en los bosques de la Ciudad de

México, el pastizal limita la regeneración, supervivencia de plantaciones y crecimiento de pinos debido a la competencia que representa (Sierra Pineda et al., 1991)

Todas las comunidades de la Sierra de Guadalupe son tolerantes o resistentes al fuego, aún en condiciones de alta cantidad de combustible, salvo el cedro blanco a causa de la delgadez de su corteza (Rodríguez Trejo, 2014). Por ello es importante que, como parte del manejo forestal, se realice el manejo de fuego y no solo su prevención y combate (que siempre serán relevantes). La política de exclusión de fuego que se sigue en la Sierra de Guadalupe, así como la no intervención a las masas forestales sobredensas, entre otros, generan condiciones que contribuyen a la pérdida de bosques naturales y artificiales. Es importante que se incluyan las categorías de manejo forestal, de recursos naturales y restauración ecológica en los próximos programas de manejo. Entender la restauración ecológica en los marcos de la ecología del paisaje es necesariamente buscar colaboración entre los gobiernos del Estado de México y de la Ciudad de México. Estudios como el presente, sirven como apoyo al manejo de ecosistemas pues proveen información sobre su composición, estructura y procesos. Por esta razón, en la Sierra de Guadalupe primero se debe realizar un amplio estudio de los recursos naturales y luego una planeación conceptual, tal como lo marca la Sociedad Ecológica de Restauración (Clewett et al., 2005). De esto mismo debe hablar el siguiente programa de manejo.

En el cuadro 5 casi todas las categorías presentan mayor fragmentación ahora que en 1994. Esto se debe a dos factores: el avance de la mancha urbana y el aumento de polígonos (fragmentación y reforestación). En un paisaje donde existen varios parches dispersos, el flujo de energía se verá modificado entre los mosaicos (Wu, 2009), independientemente del área de estos (Gurrutaga, 2003). Es muy importante acompañar este índice con información de cambio de uso de suelo, porque es contraintuitivo que un paisaje más reforestado esté más fragmentado. La bondad de las ecuaciones consiste en que pueden detectar la fragmentación del paisaje entendiéndolo como un concepto dentro de la

percolación, ofreciendo un panorama claro sobre los disturbios del paisaje (Farina, 2006).

Las políticas Estatales de reforestación establecieron extensas masas de eucalipto, mientras que los esfuerzos posteriores, incluyendo los de la sociedad civil, han establecido pequeñas masas forestales. Según el índice de fragmentación (Gurruxtaga, 2003), detecta que las pequeñas reforestaciones han promovido la fragmentación en la Sierra de Guadalupe, esto no implica necesariamente que sea perjudicial al paisaje, pero si es necesario tenerlo en cuenta para el manejo de recursos naturales. Sería mejor ir estableciendo reforestaciones sucesivas de forma aledaña para ir aumentando la superficie que está única masa artificial va cubriendo.

Son los bosques de encino y plantaciones de eucalipto las masas forestales menos fragmentadas. Disminuyendo su área núcleo aun cuando el área de estas ha aumentado. Tal aumento de fragmentación es consecuencia del aumento de mosaicos dispersos y la expansión de la frontera urbana.

3.5. Referencias

Alberto Villavicencio, A. (2007). Evaluación de funciones y servicios ambientales Parque Estatal Sierra de Guadalupe-Proyecto de conservación ecológica de la zona metropolitana del Valle de México. Editorial de la Universidad de Granada.

Bowen, G. W., & Burgess, R. L. (1981). A Quantitative Analysis of Forest Island Pattern in Selected Ohio Landscapes.

Calderón de Rzedowski, G., & Rzedowski, J. (2005). Flora fanerogámica del Valle de México (2nd ed.). Instituto de Ecología, A.C y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

Ching, W., Huang, X., K. Ng, M., & Siu, T.-K. (2013). Markov Chains (F. S. Hillier & C. C. Price, Eds.; 2nd ed.). Springer .
<http://www.springer.com/series/6161>

Clewell, A., & Aronson James. (2004). Principios de SER International sobre la Restauración Ecológica. www.ser.org

Clewell, A., Rieger, J., & Munro, J. (2005). Guidelines for Developing and Managing Ecological Restoration Projects. www.ser.org

CONAGUA. (2010). Gran Canal 15040.
<https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>

Contreras Servín, C. (2015). La transformación del paisaje en el Distrito Federal. Del crecimiento urbano a la primera crisis ambiental en México (1st ed.). Universidad Autónoma de San Luis Potosí .

De Torre, R., & Magro, S. (2018). Guía Práctica de Restauración Ecológica. <https://www.researchgate.net/publication/329059824>

Farina, A. (2006). Principles and Methods in Landscape Ecology Towards a Science of Landscape Landscape Series Landscape Series. Springer.

Gurruxtaga, M. (2003). Índices de fragmentación y conectividad para el indicador de biodiversidad y paisaje de la CAPV.
<https://www.researchgate.net/publication/302265358>

INEGI. (1994). Cuautitlán y Ciudad de México (E14A29).
<https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes/>

INEGI. (2019). Cuautitlán/Gustavo A. Madero. Google Earth.

INEGI. (2022). Continuo de Elevaciones Mexicano.
<https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>

Jaeger, J. A. G. (2000). Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation. *Landscape Ecology*, 15, 115–130.

Jáuregui Ostos, E. (2000). El clima de la Ciudad de México (1st ed.). Plaza y Valdés, S.A. de C.V.

Myers, R. L. (2006). Convivir con el fuego-Manteniendo los ecosistemas y los medios de subsistencia mediante el Manejo Integral del Fuego.
<http://tncfuego.org>

Pretzsch, H., Grote, R., Reineking, B., Rötzer, T., & Seifert, S. (2008). Models for forest ecosystem management: A European perspective. In *Annals of Botany* (Vol. 101, Issue 8, pp. 1065–1087).
<https://doi.org/10.1093/aob/mcm246>

Puyravaud, J. P. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177(1–3), 593–596.
[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00335-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00335-3)

QGIS, D. T. (2023). QGIS (3.30.3). Open Geospatial Foundation.
<https://qgis.org/es/site/>.

R Core Team. (2020). R: A language and environment for statistical computing.
R foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>.

Rodríguez Trejo, D. A. (2014). Incendios de vegetación. Su ecología, manejo e historia (Vol. 2). Colegio de Postgraduados .

Sentinel 2A. (2021).
S2A_MSIL1C_20170417T170311_N0204_R069_T14QMG_20170417T171425. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> Highlight

Sierra Pineda, A., Vázquez Soto, J., & Rodríguez Trejo, D. A. (1991). La autoecología del *Pinus radiata* en la Cuenca de México.

Vela -Correa, G., & Flores-Román, D. (2004). Morfogénesis de suelo con capas endurecidas de la Sierra de Guadalupe, México. *Terra Latinoamericana* , 22(3), 255–265.

Wu, J. (2009). Ecological Dynamics in Fragmented Landscapes. In Levin S (Ed.), *Princeton guide to ecology* (pp. 438–444).

Zhu, Z., Mei, Z., Xu, X., Feng, Y., & Ren, G. (2022). Landscape Ecological Risk Assessment Based on Land Use Change in the Yellow River Basin of Shaanxi, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(15). <https://doi.org/10.3390/ijerph19159547>

Capítulo 4. Régimen de fuego de la Guadalupe, Valle de México (2013-2021)

RESUMEN

El fuego es la perturbación que más configura el paisaje de la Sierra de Guadalupe. El fuego que se presenta en ella es siempre provocado por el hombre. Encontrar el régimen de fuego antropogénico de la Sierra de Guadalupe es determinante en el manejo del fuego. A partir de los Sistemas de Información Geográfica, con la información más antigua y legible, se determinó el régimen de fuego que se presentó del 2013 al 2021. Se caracterizó su área quemada, tipo, forma y frecuencia de los incendios. La suma de toda el área que se ha quemado en el periodo de estudio es cercana a los 3900 ha, sin embargo, muchos de esos incendios se presentaron en zonas quemadas anteriormente, tomando esto en cuenta, el fuego ha tenido lugar en una extensión cercana a 2388 hectáreas, es decir, un tercio del área protegida de la Sierra de Guadalupe. En su gran mayoría fueron incendios superficiales y de formas delimitadas por efectos humanos: caminos, bardas y construcciones, brechas cortafuego, y por barreras naturales como peñascos, confiriendo formas anchas e irregulares, pero también algunas con bordes lineales. El área que se incendió cada año es de 646 ha, la que se incendió cada dos años fue de 112 ha, la que se incendió una vez en los nueve años de estudio tiene una extensión de 1461.27 ha. Se recomienda liberar de combustible las zonas que no han sido perturbadas, incluyendo el bosque de encino, el ecosistema más prístino de la Sierra.

Palabras clave: Incendios de vegetación, manejo de fuego, régimen de fuego antropogénico, Sistemas de Información Geográfica.

Tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Erick Eduardo Mendoza Ruiz.

Director de la tesis: Dante Arturo Rodríguez Trejo.

ABSTRACT

Fire is the disturbance that most shapes the landscape of the Sierra de Guadalupe. The fires that occur in it are always caused by humans. Determining the anthropogenic fire regime of the Sierra de Guadalupe is crucial in fire management. Using Geographic Information Systems, with the oldest and most readable information available, the fire regime that occurred from 2013 to 2021 was determined. Its burned area, type, shape, and frequency of fires were characterized. The total area burned during the study period is close to 3,900 hectares, however, many of these fires occurred in previously burned areas. Taking this into account, fire has occurred over an area of approximately 2,388 hectares, which is roughly one-third of the protected area of the Sierra de Guadalupe. The majority of these were surface fires with shapes defined by human effects such as roads, fences, buildings, firebreaks, and natural barriers like cliffs, resulting in wide and irregular shapes, but also some with linear edges. The area burned each year was 646 hectares, while the area burned every two years was 112 hectares, and the area burned once in the nine-year study period covered 1,461.27 hectares. It is recommended to clear fuel from undisturbed areas, including the oak forest, which is the most pristine ecosystem in the Sierra

Keywords: Anthropogenic fire regime, fire management, geographic information systems , vegetation fires

4.1. Introducción

Pocas son las descripciones del régimen de fuego en la CDMX y en el Estado de México. Ninguna de la Sierra de Guadalupe. El régimen de fuego es la descripción generalizada de las características de los fuegos en un paisaje (McLauchlan et al., 2020): extensión del área quemada, tipo de incendio (aéreo o superficial), forma del incendio, frecuencia, entre otros. En el caso de la Sierra de Guadalupe los incendios forestales son provocados y suprimidos intencionalmente, por esta razón se ha denominado régimen de fuego antropogénico, ampliamente relacionado al paisaje (Tepley et al., 2017). En este documento se hace un recuento de los incendios que acontecieron en la Sierra de Guadalupe del 2013 al 2021 y se describe su régimen.

La esencia del concepto “incendio forestal” es la pérdida de control del fuego. Por esta razón, la definición de incendio forestal corresponde a lo que se mapeó. A nivel de sistemas de información geográfica, se comprobó el papel del fuego sobre los diferentes ecosistemas, como refiere Rodríguez Trejo (2014) para los presentes en la zona de estudio el fuego es el disturbio que configura el paisaje con más rapidez en la Sierra de Guadalupe. Se extiende principalmente sobre pastizales y matorrales, afectando a veces masas forestales que han resistido o tolerado el paso de los fuegos en su mayoría.

El dramatismo del fuego forestal en la ciudad levanta preocupaciones entre sus habitantes. Aunque la supresión absoluta del fuego puede destruir algunos de los ecosistemas más importantes del mundo (Shive et al., 2022) también su uso inconsciente. Los fuegos forestales no dejarán de suceder en la Sierra de Guadalupe, el régimen de fuego antropogénico está determinado por accidente (cuando un accidente como la ruptura de un cable de conducción eléctrica se rompe e inicia un incendio), negligencia (si se usa el fuego para eliminar basura y se escapa y convierte en incendio) e intención (vandalismo, por ejemplo). Otra posibilidad para el fuego en la Sierra es su uso técnico, mediante quemas prescritas o bien quemas controladas, pero se ha utilizado muy poco así hasta la fecha. El objetivo de este documento es describir el régimen de fuego

antropogénico en la Sierra de Guadalupe a partir de los incendios del periodo 2013-2021.

4.2. Metodología

Los incendios que aquí se estudiaron, son aquellos que tuvieron una extensión mayor a 1500 m² (los menores a dicha superficie fueron considerados conatos, incendios muy pequeños como para tener efectos perceptibles). En la Sierra de Guadalupe son numerosos los conatos de incendio, es probable que se cuenten por cientos. La estadística que aquí se ofrece se refiere a los eventos significativos, mayores a la superficie referida, a los que sí impactaron temporal y espacialmente en la Sierra de Guadalupe. Se eligieron las fechas del 2013 hasta 2021 porque solo de esos años se tienen imágenes satelitales legibles. Para trazarlos en mapas, se usaron tres herramientas, imágenes satelitales, índices satelitales, y datos abiertos. Las imágenes fueron visualizadas en Google Earth (MAXAR, 2021), (Sentinel 2^a, 2021), (Landsat 8, 2016). **El índice usado fue el NBR (normalized burn ratio) que relaciona los valores de reflectancia de los píxeles** (Chuvieco et al., 2008), para detectar **área quemada**.

$$NBR = \frac{SWIR - NIR}{NIR + SWIR}$$

Donde NIR corresponde al infrarrojo cercano y SWIR al infrarrojo de onda corta. Se usaron las imágenes de dos satélites distintos. Para las imágenes Landsat 8 del 2013 al 2016 (Landsat 8, 2016) el NIR corresponde a la banda 5, y el SWIR a la banda 7. Para las imágenes Sentinel 2 del 2017 al 2021 (Sentinel 2^a, 2017-2021) el NIR se encuentra en la banda 8 y el SWIR en la banda 11. Por último, se verificó con los datos vectoriales en formato de punto que ofrece el Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales del 2013 al 2022 (SPPIF, 2022).

En primer lugar, se observaron todas las zonas cuyos píxeles eran de un NRB mayor a 0.06. Estas zonas se confunden con matorrales viejos y sombras muy oscuras, por esta razón fue necesario corroborarlo con las imágenes disponibles en Google Earth. Varios incendios inadvertidos en Google Earth fueron fácilmente encontrados por el satélite. A su vez, muchas zonas quemadas

detectadas por el NRB en realidad no lo eran. Los polígonos fueron trazados a mano alzada. Los incendios dejan una marca que es visible después de varios años, por ejemplo, el pasto que crece después de un siniestro tiene un color muy distinto a aquel que le colinda y no fue quemado en ese incendio, o bien las cenizas perduran en el suelo dándole un color más oscuro y distinto. Asimismo, algunos árboles mueren e indican los límites del fuego, de tal manera que se usaron distintos criterios para trazar lo que se observa en las imágenes del pasado en un archivo vectorial. **Por último, se corroboró la información con la base de datos del SPPIF (SPPIF, 2022), pues algunos incendios que se encontraron no están registrados en el SPPIF, y también el SPPIF indicó otros que se habían omitido.**

La superficie fue analizada a partir de un enfoque cronológico, en nueve años y también espacial. El análisis espacial se realizó extrayendo el área de cada polígono (QGIS, 2023) y procesándolo en cuadros dinámicos (Microsoft, 2019). A partir de dividir a la Sierra de Guadalupe en 12 microcuencas y la frontera urbana, se trazaron las zonas de estudio. La similitud de las zonas con las microcuencas se muestra en las figuras 1 y 2

Microcuencas de la Sierra de Guadalupe

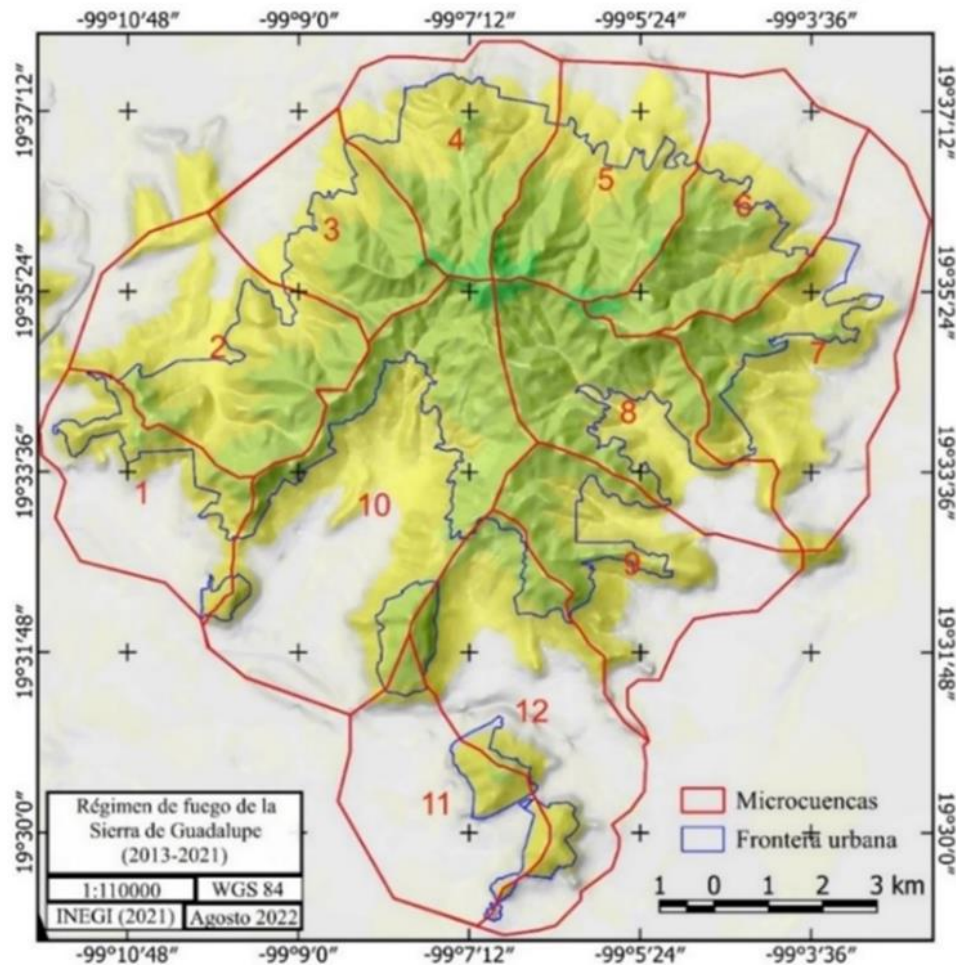


Figura 2. 1. Microcuencas de la Sierra de Guadalupe.

Se delimitaron las zonas de estudio entre el parteaguas de las cuencas y la frontera urbana. Las microcuencas 11 y 12 desaparecieron. La extensión de la microcuenca 12, que se encuentra en el macizo principal de la Sierra de Guadalupe, fue incluida en la zona de estudio correspondiente a la microcuenca 9. Las elevaciones del Tenayo, Chiquihuite, Zacatenco, Guerrero y Gachupines, es decir todos los cerros aislados, se agruparon en una zona de estudio. El Cerro Gordo, al oriente de la Sierra de Guadalupe, no fue considerado porque en la realidad no es una zona sujeta a protección. Tampoco el Cerro del Tepeyac.

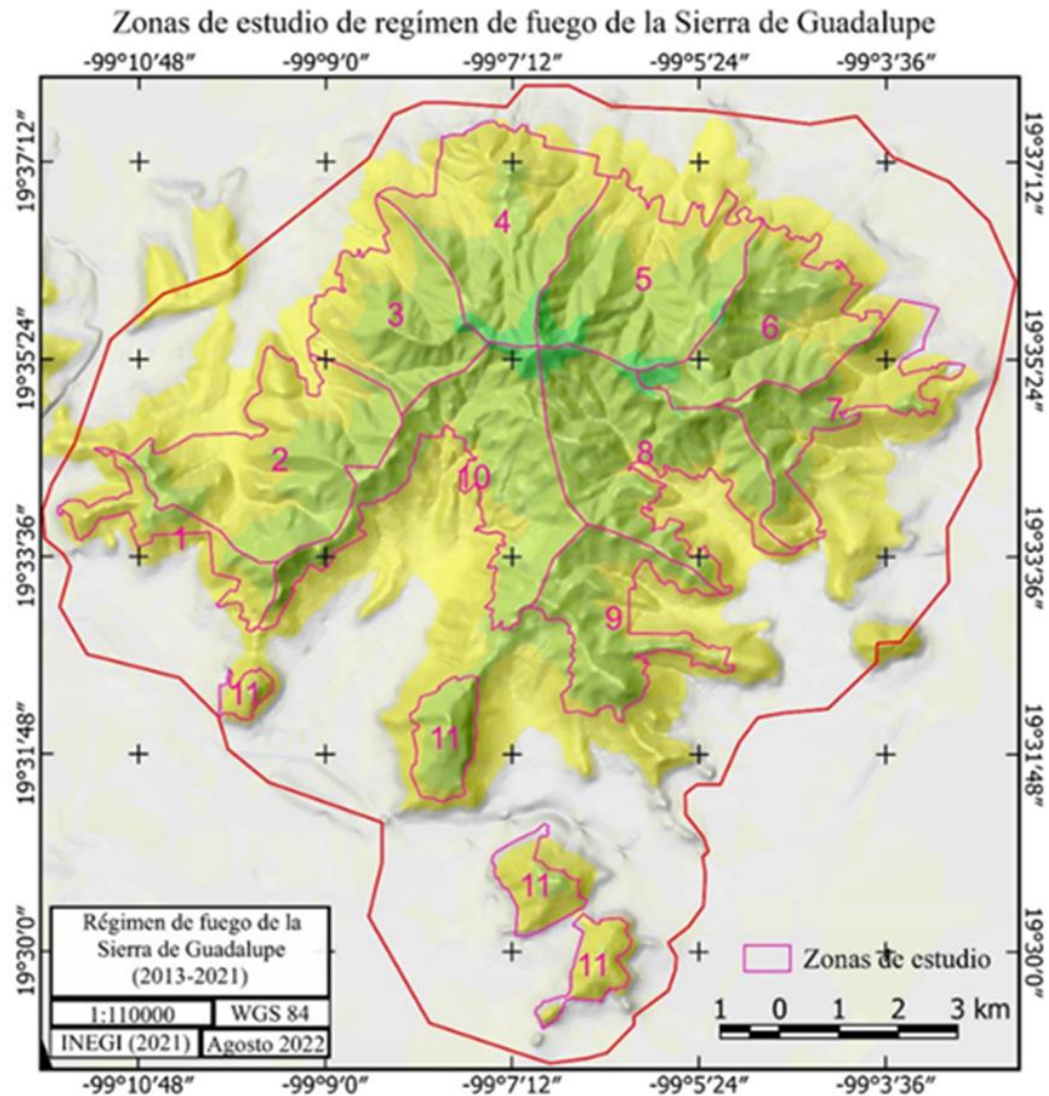


Figura 2. 2. Zonas de estudio de régimen de fuego.

También se discriminó entre incendios aéreos y superficiales. Los incendios subterráneos no son visibles por este método, pero no son comunes en el área de estudio y se asimilaron a los incendios superficiales. Solamente las masas forestales y de matorrales pueden desarrollar incendios aéreos, y por lo general se manifiesta por el consumo y la muerte de ramas y hojas de la mayoría de los árboles, en contraste con los incendios superficiales, que solamente afectan combustibles superficiales, aunque cuando son intensos pueden quemar o deshidratar parte de las copas de los árboles. Para describir la frecuencia de fuego, se consideraron los traslapes de los polígonos de incendios ocurridos en

diferentes años. Cada una de esas zonas tuvo una frecuencia menor a nueve años. Los incendios que se presentaron solo una vez en el mismo sitio en todo el periodo estudiado tendrán una frecuencia de al menos una vez cada nueve años. Las zonas dónde los fuegos no llegaron a propagarse, por efecto de los combatientes forestales, o no se presentaron, tendrán una frecuencia mayor a nueve años.

La mayoría de los incendios recurrentes en la misma zona no tienen un periodo de retorno uniforme. Algunas zonas se incendiaron cada año durante un lustro, y después permanecieron sin fuegos en varios años, este fenómeno no se representa en la figura 5, es un mapa simplificado que muestra los intervalos como si fueran uniformes, como promedios. Así mismo, la figura 5 agrupa áreas grandes para que sean distinguibles en el mapa, lo cual quiere decir que no en toda la zona se presentan incendios con la frecuencia indicada, si no que en esa zona se presentó al menos un incendio en la frecuencia señalada. **Por último, se analizó gráficamente el área quemada, descomponiéndola como una serie de tiempo** (Racine, 2019). El criterio de frecuencia fue igual a dos. Cada año tiene dos temporadas con respecto a incendios se refiere, la temporada de incendios y la temporada de lluvia. En el año tomamos primero la temporada seca con área igual a la superficie de los incendios y después la temporada de lluvias con área igual a cero.

4.3. Resultados y discusión

Área afectada (superficie)

En la Sierra de Guadalupe el promedio de área de polígonos quemados alcanza 5.7 ha. Pero el incendio más extenso registrado en el periodo estudiado fue uno de >168 ha, que se presentó en 2020, afectando principalmente matorral y pastizal. En la figura 3 se observa el trazo de los incendios forestales que se presentaron en la Sierra de Guadalupe en el periodo 2013 a 2021.

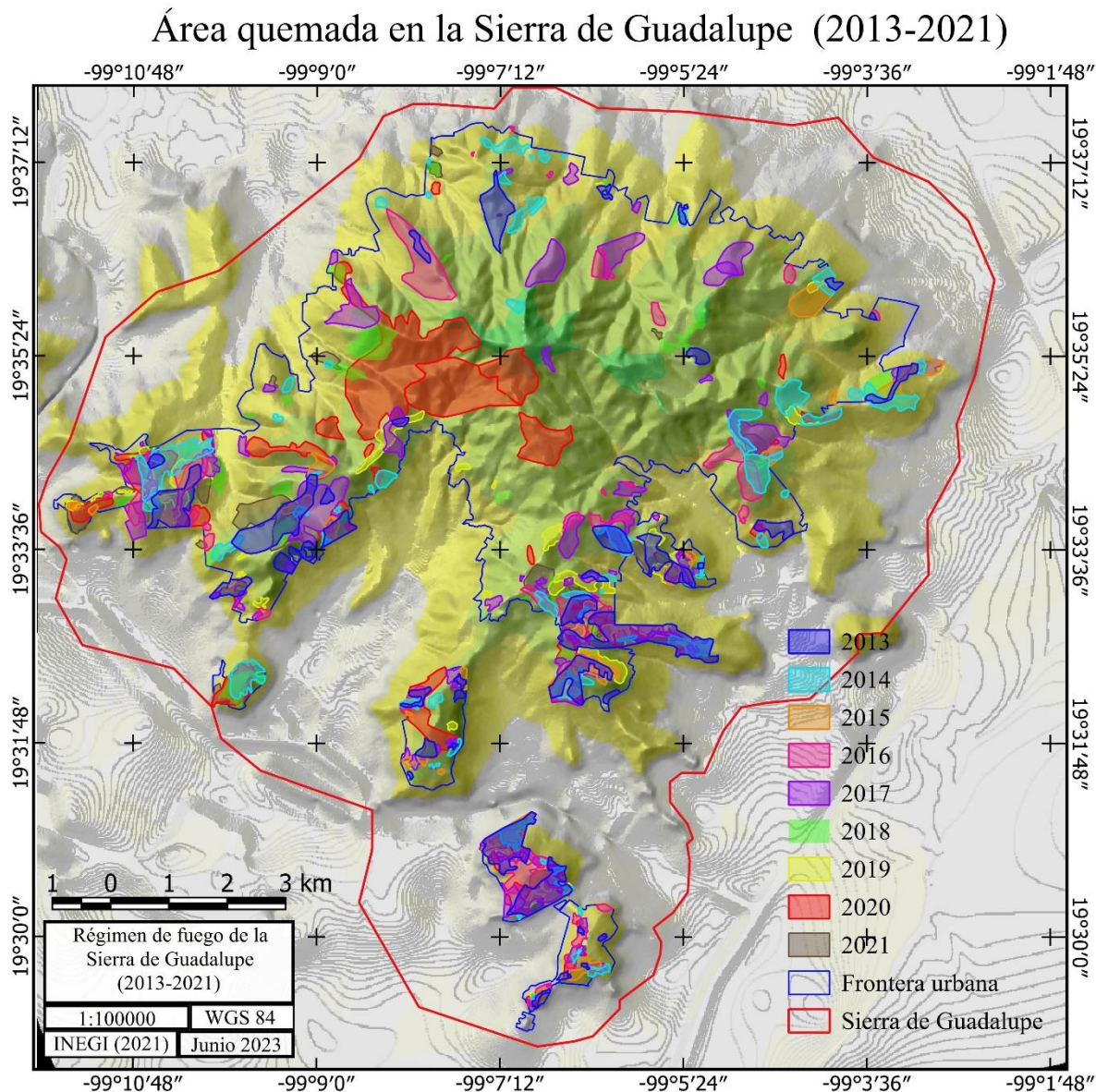


Figura 2. 3. Área quemada en la Sierra de Guadalupe (2013-2021)

En el cuadro 1 se observa la superficie quemada durante el periodo del 2013 al 2021. En esos nueve años el fuego afectó 3,918.42 ha, aproximadamente. El 2020 fue el año con más superficie quemada representando el 5% del área protegida de la Sierra (850.79 ha) y el año con menor superficie fue el 2019 con tan solo el 1.5% (253 ha).

Cuadro 2. 1.Extensión de la superficie quemada (ha) por año y por tipo de vegetación.

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Suma
Bosque de encino	7.12	3.24	1.09	7.27	8.22	1.34	0.00	29.51	0.40	58.18
Bosque heterogéneo	9.01	7.07	0.26	4.46	12.31	7.25	2.99	69.14	5.41	117.90
Bosque natural/ plantación de pirul	67.12	5.10	5.40	35.66	30.10	2.39	5.62	17.36	29.03	197.78
Plantación de eucalipto	67.84	18.51	2.94	11.77	89.22	19.40	31.30	76.62	23.46	341.06
Plantación de cedro blanco	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.16	0.00	4.16
Plantación de pino	0.02	0.00	0.00	1.16	0.58	0.00	0.00	0.12	0.00	1.89
Matorral, pastizal	134.67	2.85	28.91	128.55	2.00	44.03	102.59	458.57	53.13	955.30
Pastizal, matorral	62.29	0.00	88.71	69.50	61.84	0.67	5.17	14.18	40.37	342.73
Matorral	14.14	108.88	3.10	29.35	42.45	73.34	13.61	31.52	8.31	324.69
Pastizal	215.17	224.52	95.75	114.26	291.20	250.39	91.74	149.61	142.08	1574.72
Suma	577.40	370.16	226.17	401.97	537.91	398.81	253.02	850.79	302.19	3918.42

La comunidad menos afectada fueron las masas forestales artificiales de casuarina, que no han sido incendiadas en el periodo y que representan muy poca extensión en el área de estudio, mismo caso que el pino y cedro blanco que apenas acumularon unas cuantas hectáreas. De la reforestación con coníferas que se hizo en la Sierra de Guadalupe (Sierra Pineda et al., 1987) existen unas cuantas masas forestales, pero muchos árboles aislados o en pequeños grupos, dispersos en todos los ecosistemas de la Sierra. Por lo que es natural que estas poblaciones, ya reducidas, no representen una gran extensión en la estadística. Los matorrales y pastizales, que componen la mayor extensión de la Sierra de Guadalupe, han sido sometidos a fuegos en al menos 3197 ha, algunos se presentaron en el mismo lugar año con año, o bianualmente.

Son los ecosistemas sin vegetación arbórea los que experimentan más cambios en menor tiempo por la acción del fuego, también son los más extensos de la Sierra de Guadalupe y componen la matriz del paisaje. En el cuadro 2 se muestran los máximos, promedios y mínimos de área quemada para cada categoría.

Cuadro 2. 2. Estadísticos por vegetación

	Mínimo	Media	Máximo
Bosque de encino	0 (2019)	6.46	29.51(2020)
Bosque heterogéneo	0.26(2015)	13.10	69.14(2020)
Bosque natural/ plantación de pirul	2.39(2018)	21.98	67.12(2013)
Plantación de eucalipto	2.94(2015)	37.90	89.22(2017)
Plantación de cedro Blanco	0	0.46	4.16(2020)
Plantación de pino	0	0.21	1.16(2016)
Matorral, pastizal	2(2017)	106.14	458.57(2020)
Pastizal, matorral	0(2014)	38.08	88.71(2015)
Matorral	3.1(2015)	36.08	108.88(2014)
Pastizal	91.74(2019)	174.97	291.20(2017)
Suma	102.43	435.38	1207.67

Del cuadro 2 se desprenden tres escenarios hipotéticos, el que se vería menos perturbado, el escenario promedio y el escenario extremo. **En el caso en que los ecosistemas se vieran disturbados en la menor medida que han registrado en un mismo año, el área quemada (102.43) sería apenas 0.6% de la S.G. En un año cualquiera, el área quemada esperada será cerca de 435.38 hectáreas (2.6% del total de la Sierra). Si en la Sierra de Guadalupe se diera la mayor perturbación registrada en un mismo año, se vería afectada en un 7.85% (1319.9 ha). Contrastando la matriz del paisaje (matorrales y pastizales), con sus mosaicos (masas forestales), podemos observar que la matriz va a incendiarse en cuando menos noventa y seis hectáreas.** En la superficie arbolada se puede esperar al menos cinco hectáreas por año. En promedio, la matriz cambiará al menos en trescientas sesenta hectáreas por causas de fuego, las masas forestales solo lo harán en ochenta hectáreas como mínimo. En el escenario extremo, las masas forestales serán incendiadas en un orden de doscientas siete hectáreas, mientras que, en la matriz del paisaje, en los pastizales y matorrales, los fuegos impactarán sobre novecientos cuarenta y siete.

Para utilidad de los manejadores de esas zonas, en el cuadro 3 se presentan las estadísticas de incendios dividida por cada zona de estudio (figura 2).

Cuadro 2. 3. Área quemada por zona de estudio.

Zona de estudio	Jurisdicción	Mínimo	Media	Máximo
1	Tlalnepantla	8.67(2015)	26.9	45.62(2020)
2	Tultitlán y Tlalnepantla	22.2(2015)	73.9	130.88(2020)
3	Tultitlán	0(2015, 2019)	49.28	189.93(2020)
4	Coacalco y Tultitlán	0(2019)	16.69	38.13(2013)
5	Coacalco y Ecatepec	0(2015, 2020)	15.54	58.89(2017)
6	Ecatepec y Coacalco	0(2021)	11.75	32.3 (2015)
7	Ecatepec	7.55(2016)	36.09	91.74(2014)
8	Ecatepec y Tlalnepantla	1.76(2021)	19.01	44.51(2016)
9	Tlalnepantla y Ecatepec	52.31(2015)	84.18	190.35(2013)
10	Gustavo A. Madero	1.87(2021)	39.16	210.64(2020)
11	Gustavo A. Madero y Tlalnepantla	42.67(2019)	80.42	139.11(2020)
Suma		137.3	452.92	1172.1

Nota: Los años en los que se presentó el evento están indicados entre paréntesis

La sumatoria de los vectores del cuadro anterior es congruente con la del cuadro 2, se pueden usar como indicadores año con año. Las zonas de estudio que han presentado mayor área quemada son las 10, 9, 3, 11, y 2. Las que no han desarrollado incendios lo suficientemente importantes para registrar alguna superficie afectada en los nueve años de estudio han sido las 3, 4, 5, 6, 8 y 10. En promedio, las zonas de estudio son afectadas desde una decena de hectáreas hasta más de las ochenta. Las zonas de estudio 3, 5, 7, 9 y 11 tienen una diferencia de años entre la mínimo y máximo disturbio de menos de tres años. En las zonas 3 y 11 primero se presentó un gran consumo de combustibles y luego años de poca perturbación. En las zonas 5, 7 y 9 primero se presentó poca área afectada y luego el año de perturbación máxima.

El penúltimo caso concuerda con una reducción de combustibles que abate la posibilidad de que se presenten incendios, por lo menos el año siguiente o unos

años después del incendio. El último caso corresponde con acumulación de combustibles y eventual incendio de mayor magnitud.

Una vez descompuesta la serie de tiempo correspondiente al área quemada (R Core Team, 2020) no se detecta variación aleatoria. Es decir, el área quemada al año solo puede ocurrir en temporada seca, sin variación alguna. Entonces es la tendencia el único componente que realmente brinda información. En la figura 4 se observa la descomposición de la serie de tiempo.

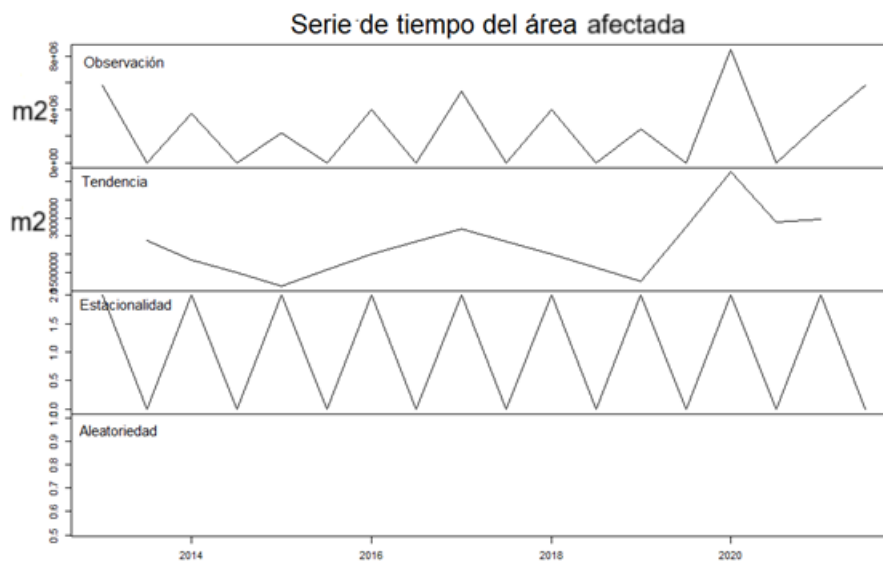


Figura 2. 4. Serie de tiempo del área afectada.

La tendencia no es lineal, pero es cíclica, lo que reafirma la dinámica de acumulación y liberación de energía y combustibles cada dos años. La tendencia después del 2019 se elevó al doble de lo que se había presentado desde 2013.

Tipo de incendio

Los incendios aéreos suelen ser los de mayor intensidad y severidad, por el combustible que se consume en ellos (Muñoz, 2001). Para definir el régimen de fuego antropogénico en la Sierra de Guadalupe analizaremos los tipos de incendio que en ella se desarrollaron. Evidentemente, la matriz del paisaje, compuesta por matorrales de especies crasicaules, como nopales y agaves, así como pastizales, no experimentó incendios aéreos, los matorrales más

desarrollados y altos, no fueron afectados en este periodo de tiempo. Por esta razón en el cuadro 4, solamente se analiza el porcentaje de incidencia de incendios aéreos con respecto al año.

Cuadro 2. 4. Área quemada por vegetación.

Ecosistema/Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Bosque de encino	0.37	0.22	0.00	1.81	0.79	0.00	0.00	3.45	0.00
Bosque heterogéneo	0.00	0.73	0.00	0.22	1.92	0.00	0.00	4.84	0.00
Bosque natural/ plantaciones de pirul	2.39	0.00	0.00	0.00	3.17	0.00	0.00	0.37	5.09
Plantación de cedro blanco	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00
Plantación de eucalipto	5.96	0.15	0.00	1.60	7.75	1.09	0.00	7.17	0.00
Plantación de pino	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	0.01	0.00
Suma del porcentaje de incendios aéreos	8.73	1.10	0.00	3.62	13.73	1.09	0.00	15.94	5.09
Área total de incendios (por año) (ha)	577.40	370.16	226.17	401.97	537.91	398.81	253.02	850.79	302.19

Los incendios aéreos representan el 5.48% en promedio del total de incendios en la Sierra. Siendo el eucalipto el ecosistema más impactado por el fuego aéreo (41.66 ha en 2017) y los menos afectados fueron las plantaciones de casuarina, pino y cedro blanco. El área de la suma de todos los incendios aéreos es igual a 298.21 ha, es decir 7.6 % de todos los incendios que se registraron para este estudio en la Sierra de Guadalupe.

Forma del incendio

En la misma definición del régimen de fuego cabe el concepto de forma. La mayoría de estos polígonos afectados por el fuego tienden a tener un ancho cercano a su largo. En mucho menor cantidad aparecen los fuegos que dejan una figura alargada, también son escasos aquellos que tienden a ser cuadrados. Los incendios en la Sierra son limitados por artefactos como bardas, terrazas,

caminos, cultivos, tecorales, lo que confiere aristas rectas a varios polígonos incendiados. También son limitados por brechas cortafuego, igual que el combate directo de los brigadistas y voluntarios. Las barrancas y peñascos, afloramientos rocosos son comunes en la Sierra y detienen el avance del fuego en varias ocasiones. Otro factor que delinea la forma del polígono quemado es la acumulación de combustible: las zonas que ya fueron incendiadas en años anteriores sirven como barrera de nuevos fuegos, pues no cuentan con suficiente combustible suficiente para propagar el fuego.

Frecuencia

A partir de los nueve años estudiados se propone la siguiente frecuencia de incendios en la Sierra de Guadalupe (Figura 5).

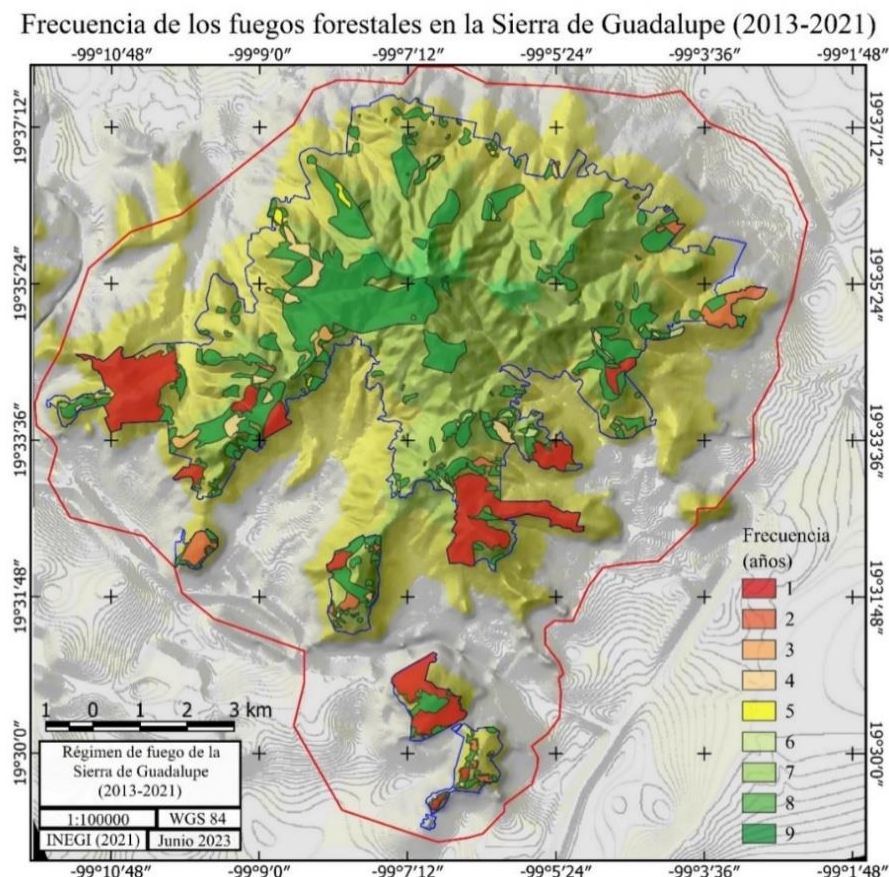


Figura 2. 5. Frecuencia de los fuegos forestales en la Sierra de Guadalupe.

Cada color indica una frecuencia redondeada. Cada polígono muestra que en esa zona se han presentado incendios en la frecuencia indicada por su color, aun

cuando no la han cubierto toda. Aquellas zonas que no están coloreadas no fueron incendiadas en el periodo de estudio, por lo que tienen una frecuencia de fuego mayor a nueve años. La suma del área quemada, sin contar traslapes, representa el 34% del área no urbanizada de la Sierra de Guadalupe (6945 ha). Son 11 las zonas donde la frecuencia fue de un año en el periodo de estudio. En el cuadro 5 se agrupa el área por frecuencia redondeada.

Cuadro 2. 5. Área por categoría de frecuencia

Frecuencia	Área (ha)	Porcentaje
1	646.89	27
2	112.65	5
3	26.86	1
4	87.22	4
5	18.40	1
6	17.64	1
7	14.85	1
8	2.65	0
9	1461.27	61
Suma	2388.43	100

Con estas características se establecen varios parámetros del régimen de fuego antropogénico en la Sierra de Guadalupe, durante el periodo de estudio, la mayoría de cuyos ecosistemas están formados por especies adaptadas al fuego, si bien hay algunas que son sensibles, que no están adaptadas al fuego, como es el caso las plantaciones de cedro blanco, debido a la delgadez de su corteza (Cuadro 6) (Rodríguez-Trejo, 2014). Es de esperar que los combustibles que no se quemaron en los años estudiados lo hagan en los próximos, pues en el periodo estudiado solamente un tercio del área forestal de la Sierra se expuso al fuego, gran parte matorral y pastizal.

Cuadro 2. 6. Adaptaciones al fuego, o sensibilidad al fuego, en las especies arbóreas o arbustivas dominantes en la vegetación nativa o en plantaciones forestales establecidas en Sierra de Guadalupe (Con base en información de Rodríguez-Trejo, 2014).

Comunidad natural o plantación	Ejemplos de especies dominantes	Adaptaciones al fuego en tales especies
Matorral xerófilo	<i>Opuntia</i> spp.	Rebrotación de cladodios.
Pastizal	Varias, como <i>Muhlenbergia</i> sp.	Rebrotación a partir de rizomas, floración post-fuego.
Bosque de encino	<i>Quercus rugosa</i>	Rebrotación basal, rebrotación epicórmica, corteza gruesa, regeneración post-fuego moderada en micrositios.
Plantación de eucalipto	<i>Eucalyptus camaldulensis</i> <i>Schinus molle</i> (especie naturalizada)	Lignotubérculo (rebrotación basal), rebrotación epicórmica, corteza gruesa, corteza inflamable que provee continuidad vertical a combustibles. Corteza gruesa, rebrotación basal y epicórmica.
Plantaciones de pinos	<i>P. radiata</i>	Corteza gruesa, cierto grado de rebrotación

		epicórmica, potencial regeneración en áreas afectadas por el fuego.
Comunidad natural o plantación	Ejemplos de especies dominantes	Escasa adaptación al fuego o sensibilidad a este
Plantaciones de cedro blanco	<i>Callitropsis</i> (=Cupressus) lusitanica	Corteza delgada, copa baja que proporciona continuidad vertical de combustibles, follaje inflamable. Baja capacidad de rebrotación post-fuego.
Plantaciones de casuarina	<i>Casuarina equisetifolia</i>	Corteza más bien delgada. Baja capacidad de rebrotación post-fuego.
Plantaciones de pinos piñoneros	<i>P. cembroides</i>	Corteza más bien delgada, baja capacidad de rebrotación post-fuego.

4.4. Conclusiones

Luego de un periodo de poca incidencia de fuego, sucede un año de grandes áreas afectadas. El combustible que se acumula en periodos de exclusión de fuego, tarde o temprano será incendiado. Esta conclusión es válida para toda la Sierra: existen zonas dónde el fuego no ha consumido combustible durante el periodo del 2013 a 2021, es de esperar que grandes incendios se presenten en los próximos años, por la energía que está acumulada en esas cañadas. Dentro

de las zonas que han acumulado combustible, se encuentra el bosque de encino que corona a la Sierra. El fuego en la Sierra de Guadalupe es de origen humano, hasta ahora ha pertenecido en buena medida a la categoría intencional (vándalos). Existen capacidades técnicas en la misma Sierra para iniciar un plan de manejo de fuego que permita convivir con él; si esto no se hace, se pagará con alteración de los ecosistemas (Myers, 2006).

El fenómeno que se da en las zonas de estudio 3,5,7,9 y 11 sugiere una dinámica de acumulación de combustibles que finalmente facilita, en un año seco, la ocurrencia de un incendio extenso, intenso y severo. Después, en la misma zona inicia nuevamente la acumulación progresiva de materiales (Holling, 1986). En las zonas 3 y 11 se presentó la segunda dinámica: el combustible se consumió y por eso las perturbaciones fueron a menos. Las zonas 5, 7 y 9 sugieren la primera dinámica: el combustible se acumuló después de una ausencia de perturbaciones y se liberó su energía en un evento más intenso y severo.

En el cuadro 4 también se observa un fenómeno de acumulación y liberación de combustible/energía que se confirmó en el análisis de serie de tiempo. Los eventos más importantes de fuego aéreo se dieron uno o dos años después de que no se presentaran los mismos. El periodo de retorno en el que se presenta un área quemada mayor al 8% fue de dos a tres años. Los años que presentaron mayor porcentaje de incendios aéreos fueron los mismos que presentaron mayor área quemada en total (2013, 2017, 2020), denotando una temporada intensa, más seca. Las series de tiempo indican un aumento importante en la tendencia.

La mayoría de las comunidades y especies vegetales de la Sierra de Guadalupe están adaptadas al fuego, salvo algunas como el cedro blanco. No obstante, al parecer, la interacción entre perturbaciones (DeLong et al., 2012) es la principal causa de la muerte de árboles en la Sierra de Guadalupe.

La falta de manejo de los recursos naturales en la Sierra de Guadalupe ha promovido la desaparición de masas de pinos y cedro blanco. Es necesario manejar el fuego, la densidad de los matorrales y bosques, entre muchos otros aspectos, para evitar la desaparición de bosquetes y matorrales viejos. El mapa

que aquí se expone puede ser usado en zonas más pequeñas (una o pocas hectáreas) para planificar quemas prescritas, estimar el comportamiento del fuego o para definir el régimen de fuego para unidades mínimas de manejo. Debe considerarse al factor fuego en el ideotipo (Rodríguez-Trejo, 2006) de las plantas que se establecerán vía reforestación.

El fuego puede reducirse, pero no impedirse del todo. Por ello es importante que en la Sierra de Guadalupe se haga un manejo del fuego que vaya más allá de la prevención y el combate y que incluya, entre otros puntos, el uso técnico del fuego prescrito, con bases científicas.

4.5. Referencias

Chuvieco, E., Opazo, S., Sione, W., Ctor, H., Valle, J., Anaya, J., Di Bella, C., Cruz, I., Manzo, L., López, G., Mari, N., González, F., González-Alonso, G., Morelli, F., Setzer, A., Csiszar, I., Kanpandegi, J. A., Bastarrika, A., & Libonati, R. (2008). Global burned-land estimation in Latin America Using Modis Composite Data. *Ecological Applications*, 18(1), 64–79. <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/index.php>

DeLong, C., Burton, P., & Geertsema, M. (2012). Natural Disturbance Processes. In *Encyclopedia of Environmetrics*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470057339.vnn147>

Holling, C. S. (1986). The resilience of terrestrial ecosystems. *Sustainable Development of The Biosphere*, 292–320.

Landsat 8. (2016). Path 36, Row46. USGS. <https://earthexplorer.usgs.gov/>

MAXAR. (2021). Norte de la Ciudad de México. Google Earth. <https://www.maxar.com/products/satellite-imagery> Highlight

McLauchlan, K. K., Higuera, P. E., Miesel, J., Rogers, B. M., Schweitzer, J., Shuman, J. K., Tepley, A. J., Varner, J. M., Veblen, T. T., Adalsteinsson, S. A., Balch, J. K., Baker, P., Batllori, E., Bigio, E., Brando, P., Cattau, M., Chipman, M. L., Coen, J., Crandall, R., ... Watts, A. C. (2020). Fire as a fundamental ecological process: Research advances and frontiers. In *Journal*

of Ecology (Vol. 108, Issue 5, pp. 2047–2069). Blackwell Publishing Ltd.
<https://doi.org/10.1111/1365-2745.13403>

Microsoft. (2019). Excel (2019). Windows. <https://www.microsoft.com/es-mx/microsoft-365>

Muñoz Robles, C. A. (2001). Elaboración de un modelo espacial de peligro de incendios forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León .

QGIS, D. T. (2023). QGIS (3.30.3). Open Geospatial Foundation.
<https://qgis.org/es/site/>.

R Core Team. (2020). R: A language and environment for statistical computing. R foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>.

Racine, J. S. (2019). Reproducible econometrics using R. Oxford University Press.

Rodríguez Trejo, D. A. (2014). Incendios de vegetación: Su ecología, manejo e historia (Vol. 1).

Sentinel 2A. (2021). S2A_MSIL1C_20170417T170311_N0204_R069_T14QMG_20170417T171425. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> Highlight

Shive, K. L., Wuenschel, A., Hardlund, L. J., Morris, S., Meyer, M. D., & Hood, S. M. (2022). Ancient trees and modern wildfires: Declining resilience to wildfire in the highly fire-adapted giant sequoia. *Forest Ecology and Management*, 511. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120110>

Sierra Pineda, A., Vázquez Soto, J., Góngora Tapia, E., & Rodríguez Trejo. (1987). Evaluación de plantaciones forestales COCODER.

SPPIF. (2022). Histórico de incendios forestales. CONAFOR .
<http://forestales.ujed.mx/incendios2/>

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

Se concluye que el paisaje de la Sierra de Guadalupe es de grano fino. Las pequeñas reforestaciones, muchas con poca supervivencia y los constantes disturbios han generado un paisaje cuyos mosaicos son generalmente numerosos y pequeños. Esto dificulta la comunicación entre los individuos cuya especie requiere de grandes extensiones de dosel, por esta razón, es importante voltear a ver las estrategias de reforestación de grandes extensiones y sobre todo corredores. También se encontró que es fundamental que la sucesión ecológica sea emulada o facilitada por las labores de reforestación: los encinos en cañadas y zonas altas (ambas las más húmedas), detectar zonas dónde el pirul se encuentre en monte bravo para conformar doseles desarrollados y manejarlos.

Se propone como indicador de restauración el índice de Moran, en 1994 tuvo un valor de 0.057 y en 2019 de 0.074, podría aumentarse hasta 0.1 como meta alcanzable a largo plazo. En ese sentido debe definirse la restauración, en indicadores objetivos y planificados, considerando desde elementos técnicos hasta científicos. La Sierra de Guadalupe es un paisaje prominentemente urbano, desde inicios del siglo XX su paisaje fue totalmente configurado, es como un lienzo en blanco sobre el que se establecieron más de 540 ha desde 1994 siendo la gran mayoría especies exóticas. Es importante reconocer el valor y utilidad de esas plantaciones, pero no volver a replicarlas. En contraste, la elección de las especies a reforestar en las diferentes zonas de la Sierra de Guadalupe debe ser un proceso flexible, sin excluir coníferas o especies nativas de la región biogeográfica, aunque no estén presentes en la Sierra. Siempre preferir la experimentación como parte de la planificación estratégica.

En la Sierra de Guadalupe los incendios son los disturbios más importantes. Importantes en el sentido en que se destinan la mayor parte de los recursos en suprimirlos. En todo México se ha entendido el papel del fuego, pero en pocos lugares se habla del régimen de fuego netamente antropogénico. Principalmente porque el fuego natural es entendido como tolerable en diversos ecosistemas y en el régimen de fuego antropogénico no existen incendios por causas naturales.

Aun así, son inevitables, superan siempre las fuerzas del Estado y los voluntarios y, a través de su supresión, promueven la acumulación de combustibles. En este paisaje, rodeado de más de tres millones de personas, muchas de las cuales inician incendios por distintas causas y actitudes, no queda otra alternativa que ir más allá de la prevención y el combate y manejar el fuego técnicamente, con bases científicas, para reducir la acumulación de combustibles y usarlo como una herramienta en el manejo de la sucesión ecológica. Muchas son las discusiones que aún quedan para establecer algún plan de manejo. En este trabajo se concluyó que los incendios tienden a aumentar en extensión de manera notable para el presente periodo y desde 2019.

Cada dos o tres años, la extensión de área quemada aumenta, para el volver a descender durante dos o tres años, también en esos años se presentaron incendios aéreos con mayor extensión. En este sentido, se presume que en 2023 a 2024 se afecten combustibles acumulados por medio del fuego intencionado, el Estado debe anticiparse. Otra vez esto sucederá en el periodo del 2026 al 2029. Para llevar a cabo el manejo de fuego es importante tomar en serio los protocolos y capacitaciones, experiencias, literatura y técnicas que se han desarrollado en torno a la práctica de las quemas prescritas.

Promover el fuego técnico en la Sierra de Guadalupe (así como otras prácticas silvícolas) será polémico y requiere de mucha habilidad para ser explicado entre las autoridades. El manejo de fuego puede integrar al menos la supresión de fuegos malintencionados, la prescripción de quemas, y la educación ambiental. El educador ambiental que tome en sus manos la introducción al manejo de fuego debe promover la convivencia con el fuego prescrito y abandonar el enfoque de la exclusión.