



Universidad Autónoma del Estado de México

Facultad de Geografía

“Patrones de distribución de *Pinus hartwegii*, como posible estrategia de adaptación al cambio climático en el Parque Nacional Nevado de Toluca”

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO EN
GEOGRAFÍA**

**PRESENTA:
MARLEN FABIOLA GARCÍA MARTÍNEZ**

**ASESOR:
DR. ANGEL ROLANDO ENDARA AGRAMONT**

**REVISORES:
DR. MIGUEL ÁNGEL GÓMEZ ALBOREZ**

MTRO. LUIS RICARDO MANZANO SOLIS

Toluca, México; Marzo 2013.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por sus múltiples bendiciones que me han llevado al lugar donde estoy ahora.

A mi familia, por el apoyo que me demostraron en cada momento. Soy muy afortunada.

Al Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR) por el apoyo brindado para la realización de este trabajo, a través del proyecto de investigación “Adaptación al Cambio climático en zonas de alta montaña del Estado de México” clave FE029-2011(103.5/11/3605).

Al Dr. Gabino Nava Bernal director del ICAR, por todo el apoyo que me ha brindado, por la confianza y sabias enseñanzas.

Al Dr. Angel Rolando Endara Agramont (ICAR), digno asesor de este trabajo por todo el apoyo incondicional y paciencia aún en momentos difíciles. Gracias por todo lo aprendido.

Al Dr. Miguel Ángel Gómez Alborez (CIRA), por su tiempo y por realizar aportaciones valiosas que enriquecieron la calidad del trabajo, haciendo fácil la comprensión del tema, además de su accesibilidad para la obtención de información que fue de gran ayuda para la elaboración del trabajo.

Al Mtro. Luis Ricardo Manzano Solís (GEOGRAFÍA), que también fungió como revisor de tesis, por su tiempo y por sus acertados comentarios que favorecieron sin duda la calidad del trabajo.

A mis amigos Martha, Mario, Noé y José Luis, por el valioso tiempo y apoyo en la realización del trabajo de campo y todas las experiencias vividas.

A todos mis profesores de la Facultad de Geografía, a los cuales admiro, por su competente conocimiento, por los consejos y los ánimos para seguir adelante, que en su momento cada cual me hizo saber.

A todos los amigos que descubrí durante la licenciatura, por todas las maravillosas experiencias que tuvimos y porque sin ustedes no hubiera sido lo mismo.

A todos los que directa pero sobretodo indirectamente hicieron posible la culminación de este logro: Muchas Gracias.

MARLEN FABIOLA

DEDICATORIAS

A mis Padres

Martha y Epifanio por ser la motivación de mi vida, por el gran sacrificio que hicieron para que yo culminara este logro, por su amor, comprensión y apoyo, a ti papi por ser mi héroe y a ti mami por ser mi heroína.

A mi hermana

Deisy por brindarme tu apoyo incondicional, el amor y la fuerza que me das para seguir adelante a pesar de las adversidades, siempre juntas.

A mis abuelos

Amalia, Juan y María de Jesús por el cariño, respeto y admiración que me demuestran, por sus sabios consejos, ánimos y apoyo incondicional. ¡Lo logre!

A los pequeños de la familia

Estefania, Yesenia y Alberto por sus sonrisas, besos y abrazos, por su inocencia que alegra todos mis días. Y este trabajo sea fuente de motivación a superarse en un futuro no muy lejano, sabiendo que todo esfuerzo tiene su recompensa.

A toda mi familia

Tíos, tías, primos, primas, por los ánimos, aportaciones, consejos y por estar apoyándome en cada momento.

MARLEN FABIOLA

Tabla de contenido

RESÚMEN	1
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. Antecedentes	5
1.2. Planteamiento del problema.....	9
1.3. Justificación.....	10
1.4. Objetivos	12
1.4.1. Objetivo general.....	12
1.4.2. Objetivos específicos.....	12
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	13
2.1. El concepto de Biogeografía	13
2.2. Los bosques.....	14
2.2.1 <i>Pinus hartwegii</i>	17
2.3. Cambio Climático	19
2.3.1. Clima y Cambio Climático.....	19
2.3.2. Cambio climático y vegetación	20
2.3.3. Cambio climático y patrones de distribución.....	22
2.3.4. Variables Climáticas	28
2.4. Sistemas de Información Geográfica	29
2.4.1. Modelación del Cambio Climático.....	30
2.4.2. IDRISI y análisis de series de tiempo	31
2.4.3. Métodos de Representación Cartográfica para la Vegetación.....	36
2.5. Conceptos relacionados.....	38
CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	41
3.1. Localización	41
3.2. Geomorfología	43
3.3. Geología.....	44
3.4. Edafología	45
3.5. Hidrología.....	47
3.6. Clima	48
3.6.1. Distribución espacial del clima.....	50

3.7. Características biológicas	50
3.7.1. Los principales tipos de vegetación para el área de estudio son los siguientes:	52
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.....	56
4.1. Área de estudio.....	57
4.2. Distribución altitudinal del bosque de <i>Pinus hartwegii</i> (> 4,000 msnm)	57
4.3. Determinación del límite altitudinal de <i>Pinus hartwegii</i>	61
4.4. Determinación de los patrones de distribución del arbolado juvenil establecido en altitudes mayores a 4,000 msnm.	62
4.5. Análisis de la información.....	66
4.6. Análisis de series temporales.....	67
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	72
5.1. Distribución altitudinal del bosque de <i>Pinus hartwegii</i> (> 4,000 msnm)	72
5.2. Límite altitudinal de <i>Pinus hartwegii</i>	73
5.3. Patrones de distribución del arbolado juvenil	74
5.3.1. Condiciones geográficas que determinan los patrones de distribución....	75
5.4. Análisis exploratorio: relación de variables dasonómicas con respecto a la distribución altitudinal	79
5.5. Análisis de perfiles de las variables climáticas.....	89
5.5.1. Comportamiento climático histórico y el establecimiento de arbolado juvenil.....	89
CONCLUSIONES.....	98
RECOMENDACIONES	101
BIBLIOGRAFÍA	102
ANEXOS	108

Tabla de figuras

FIGURA 1. BOSQUE DE <i>PINUS HARTWEGII</i> EN EL PARQUE NACIONAL NEVADO DE TOLUCA.	18
FIGURA 2. REDISTRIBUCIÓN DE ESPECIES EN LAS REGIONES DE ALTA MONTAÑA.....	27
FIGURA 3. REPRESENTACIÓN DEL PROCESO PARA OBTENER UNA SERIE TEMPORAL EN MANN-KENDALL. ..	36
FIGURA 4. MAPA DE LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO EN EL PNNT.	41
FIGURA 5. UBICACIÓN DEL SISTEMA VOLCÁNICO TRANSVERSAL.	42
FIGURA 6. MAPA HIPSOMÉTRICO DEL ÁREA DE ESTUDIO EN EL PNNT 43	43
FIGURA 7. MAPA DE GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO DENTRO DEL PNNT.	44
FIGURA 8. MAPA DE EDAFOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO DENTRO DEL PNNT.....	46
FIGURA 9. MAPA DE HIDROLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO DENTRO DEL PNNT 48	48
FIGURA 10. MAPA DE CLIMA DEL ÁREA DE ESTUDIO DENTRO DEL PNNT.	49
FIGURA 11. MAPA DE OCUPACIÓN DE SUELO DEL ÁREA DE ESTUDIO DENTRO DEL PNNT.	52
FIGURA 12. ZACATONAL ALPINO EN EL CRÁTER DEL PNNT 53	53
FIGURA 13. PÁRAMO DE ALTURA EN EL PNNT 54	54
FIGURA 15. METODOLOGÍA. 56	56
FIGURA 16. ÁREA DE ESTUDIO..... 57	57
FIGURA 17. BOSQUES UBICADOS POR ENCIMA DE LA COTA 4,000 MSNM EN EL PNNT 58	58
FIGURA 18. PROCEDIMIENTO..... 60	60
FIGURA 19. PROCEDIMIENTO..... 60	60
FIGURA 20. COMBINACIONES. 61	61
FIGURA 21. MANCHAS DE ARBOLADO JUVENIL POR ENCIMA DE LOS 4,000 MSNM EN EL PNNT 62	62
FIGURA 22. TRABAJO DE CAMPO-INVENTARIO 63	63
FIGURA 23. ESTIMACIÓN DE LA EDAD DEL ARBOLADO MEDIANTE CONTEO DE VERTICIOS..... 64	64
FIGURA 24. CÁLCULO DE ALTURA CON CLINÓMETRO..... 65	65
FIGURA 25. PRESENCIA DE MUÉRDAGO, DESCORTEZADOR E INCENDIOS. 65	65
FIGURA 26. MÓDULO CREATE / EDIT TIME SERIES FILES..... 68	68
FIGURA 27. EARTH TRENDS MODELER. 69	69
FIGURA 28. EARTH TRENDS MODELER 70	70
FIGURA 29. EXPLORE TEMPORAL PROFILES..... 71	71
FIGURA 30. BOSQUES CONTINUOS EN EL PNNT. 72	72
FIGURA 31. SITIOS DE MUESTRO POR ENCIMA DE LOS 4,000 MSNM EN EL PNNT..... 73	73
FIGURA 32. ÁRBOLES UBICADOS A MAYOR ALTITUD EN EL PNNT..... 74	74
FIGURA 33. ARBOLADO JUVENIL EN LA CARA NORTE Y OESTE DEL CRÁTER..... 75	75
FIGURA 34. REDISTRIBUCIÓN DE ESPECIES EN EL PNNT 78	78
FIGURA 35. DISTRIBUCIÓN DEL PROMEDIO DE EDADES POR RANGO ALTITUDINAL. 80	80
FIGURA 36. RELACIÓN EDAD-ALTITUD. 80	80
FIGURA 37. DISTRIBUCIÓN DE ALTURAS POR RANGO ALTITUDINAL..... 82	82
FIGURA 38. RELACIÓN ALTURA-ALTITUD..... 82	82
FIGURA 39. DISTRIBUCIÓN DE DIÁMETROS POR RANGO ALTITUDINAL..... 83	83
FIGURA 40. ADAPTACIÓN DEL <i>PINUS HARTWEGII</i> 84	84
FIGURA 41. ESTABLECIMIENTO POR ARRIBA DEL LÍMITE VEGETAL. 84	84
FIGURA 42. ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN 85	85
FIGURA 43. DISTRIBUCIÓN DE <i>PINUS HARTWEGII</i> 88	88
FIGURA 44. DENSIDAD DE INDIVIDUOS DE <i>PINUS HARTWEGII</i> 85	85
FIGURA 45. PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL 1960-2010. 87	87
FIGURA 46. TEMPERATURA MÁXIMA PROMEDIO ANUAL 1960-2010..... 88	88
FIGURA 47. TEMPERATURA MÍNIMA PROMEDIO ANUAL 1960-2010..... 89	89
FIGURA 48. ESTABLECIMIENTO DE ARBOLADO Y EL INCREMENTO HISTÓRICO DE LA PRECIPITACIÓN 90	90
FIGURA 49: ESTABLECIMIENTO DE ARBOLADO Y EL INCREMENTO HISTÓRICO DE LA TEMPERATURA MÁXIMA91	91
FIGURA 50: ESTABLECIMIENTO DE ARBOLADO Y EL INCREMENTO HISTÓRICO DE LA TEMPERATURA MÍNIMA 92	92
FIGURA 51. MAPA DE TENDENCIA DEL COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN EN EL PNNT 94	94
FIGURA 52. MAPA DE TENDENCIA DEL COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA MÁXIMA. 95	95
FIGURA 53. MAPA DE TENDENCIA DEL COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA MÍNIMA. 97	97



RESÚMEN

El cambio climático incide en la dinámica de los ecosistemas forestales, bajo este escenario los bosques de alta montaña serán los más afectados ya que están adaptados a condiciones de frío. El objetivo del presente trabajo de investigación fue identificar los patrones de distribución espacial de *Pinus hartwegii* por encima de los 4,000 msnm en el Parque Nacional Nevado de Toluca, para relacionarlo con variables climáticas. La metodología consistió en identificar los bosques ubicados por encima de los 4,000 msnm., mediante el análisis visual de imágenes de satélite SPOT 2010, aunado a ello se realizó un inventario dirigido a las poblaciones de *Pinus hartwegii* ubicadas por encima de la cota establecida y, que están representadas por pequeñas manchas de arbolado juvenil de entre 0.05 y 3.9 ha, haciendo un total de 14.5 ha de superficie; dichos individuos se clasificaron en plántulas (< 30 cm de altura), brinzales (≥ 30 cm < a 1.5 m altura), latizales (≥ 1.5 m de altura < 2.5 cm de DAP) y fustales (≥ 2.5 cm de DAP). En plántulas y brinzales se midió la altura, sanidad y edad; en latizales y fustales se midió DAP, altura, sanidad y edad. Cabe mencionar que la edad fue estimada por el número de verticilos que presentaba el fuste. El análisis de los resultados muestra que la edad promedio de las manchas de arbolado es de 20 años, siendo la edad que más se repite 13 años. Agrupando a los individuos por rango altitudinal se obtuvieron los siguientes resultados: 4,000-4,100 (promedio 20, moda 6); 4,100-4,200 (promedio 19, moda 9); 4,200-4,300 (promedio 19, moda 13) y finalmente > 4,300 (promedio 21, moda 14). Estos datos se relacionaron con las variaciones medias anuales de temperatura y precipitación de los últimos 50 años en el área de estudio (>4,000 msnm). La comparación de las edades con los datos climáticos muestran que en este periodo la temperatura máxima en torno al cráter se ha incrementado en un promedio de 0.02°C anuales, mientras que la mínima se incrementó en un promedio de 0.04 °C anuales; así también la precipitación se incrementó en un promedio de 8.05 mm/anuales. Esto sugiere mejores condiciones climáticas para el establecimiento de rodales nuevos, que se manifiesta por medio de un incremento de la distribución altitudinal de las poblaciones de *Pinus hartwegii*, favoreciendo el crecimiento de arbolado juvenil en zonas que antes no habían sido reportadas como arboladas. Por lo anterior, se concluye que, a medida que la zonas de alta montaña incrementan su temperatura, *Pinus hartwegii* tenderá a cambiar su distribución hacia mayores altitudes y, dado que las cumbres de las montañas son más pequeñas que las bases, estas poblaciones ocuparán menores superficies que las actuales.

Palabras Clave: cambio climático, distribución altitudinal, adaptación, *pinus hartwegii*.



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El clima está cambiando constantemente, sin embargo en los últimos 100 años, se ha observado un aumento significativo de las principales variables climáticas (temperatura y precipitación), (Ruiz, 2001). Los registros de temperaturas comenzaron desde 1880 y, a excepción de 1998, los nueve años más calurosos de la historia tuvieron lugar después del 2000, por lo que se dice que el planeta está viviendo su decenio más cálido. La temperatura anual global ha aumentado a una tasa promedio de 0,06 °C por década desde 1880, sin embargo algunas partes del planeta no presentan el mismo comportamiento (NOAA, 2013), por lo que hoy en día algunos organismos encargados del estudio del clima hablan de cambio climático o variabilidad climática.

Los bosques tienen la capacidad para influir en el cambio climático, particularmente cuando son perturbados por el hombre. Por ejemplo, la transformación de los bosques en otros tipos de cubierta del terreno, puede afectar al clima debido a los cambios del albedo o reflectividad del terreno. Además, la destrucción de la biomasa forestal por el fuego que libera gases de efecto invernadero (Brown, 1996).

Los cambios relacionados con la variabilidad climática han dejado ver la vulnerabilidad que el hombre y las diferentes especies tienen frente a ésta, sin embargo, el impacto dependerá del desempeño que tendrán las naciones en el desarrollo de medidas de mitigación y adaptación (Sánchez y Pineda, 2009).

Según Pineda y Sánchez (2009), a partir del reconocimiento de las diversas naciones del mundo de que este proceso de cambio climático global es un hecho, se reconoce también la necesidad de generar modelos que permitan evaluar los posibles impactos de ese cambio climático en los sistemas biofísicos (vegetación, caudales y plantas cultivadas). En este sentido, existe una gran



cantidad de literatura y de escenarios referentes al impacto de cambio climático sobre la vegetación en una escala global, los cuales indican que se puede esperar la migración de especies a lo largo de gradientes altitudinales y latitudinales.

Es importante analizar el cambio climático, desde el punto de vista de su impacto en los patrones de la distribución de los bosques, en este caso los establecidos por encima del límite de la vegetación.

El grupo intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) ha presentado evidencias incontrovertibles de los cambios observados y previstos del clima y sus impactos sobre sociedades y ecosistemas (IPCC, 2007). Como respuesta a este problema, se proponen dos grandes tipos de medidas: la mitigación (reducir la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera) y la *adaptación* (reducir la vulnerabilidad de las sociedades y los ecosistemas que enfrentan el cambio climático) a nivel internacional, nacional y local.

En el Estado de México se extienden grandes sierras y volcanes aislados, los que favorecen a la diversificación de altitudes, climas y tipos de vegetación. Sin embargo, junto a esta amplia gama de recursos naturales, se generan problemas ambientales debido a la cercanía al Distrito Federal, la presencia de grandes centros industriales y la presión de la actividad agropecuaria sobre los recursos forestales (Madrigal, 1992).

Tomando como caso de estudio el Parque Nacional Nevado de Toluca desde la cota 4,000 msnm, se pretende mostrar la evidencia de los efectos del cambio climático sobre el recurso forestal, a partir del análisis de los patrones de distribución y la edad del arbolado, como variable de respuesta adaptativa ante los cambios de temperatura y precipitación de los últimos 50 años.



El presente trabajo forma parte del proyecto de investigación: Adaptación al Cambio Climático en zonas de alta montaña del Estado de México y su estructura es la siguiente:

En el capítulo I se presenta el diseño general de la investigación, en el que se identifica al cambio climático como posible factor que determina la distribución de *Pinus hartwegii* a mayores altitudes. Asimismo se plantearon los antecedentes, planteamiento del problema, justificación y los respectivos objetivos.

En el capítulo II se aborda el marco teórico, en el cual se cita la revisión bibliográfica relacionada al tema y que permitió plantear las bases teóricas del trabajo de investigación, mismas que sirvieron para la conceptualización; los conceptos básicos son: área de distribución geográfica, adaptación, cambio climático, gradiente ambiental o geográfico, patrones de distribución, regeneración, sistema climático y variabilidad climática.

En el capítulo III se describe la caracterización física del área de estudio dentro del Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT), incluyendo: localización, hipsometría, geología, edafología, hidrología, clima y diversidad biológica.

En el capítulo IV, se puntualiza la metodología que se utilizó para obtener los resultados acordes a los objetivos de la presente investigación, se explica el procedimiento del trabajo de campo y el trabajo elaborado en gabinete, que consiste en el análisis exploratorio de la información, así como el procedimiento para la elaboración de perfiles de temperatura máxima, mínima y precipitación para los últimos 50 años.

En el capítulo V se muestran los resultados obtenidos por objetivo, la relación de variables dasonómicas (edad, altura y diámetro) con la distribución altitudinal, de igual manera se muestra su relación con el comportamiento espacio-temporal de las variables de temperatura y precipitación.



Para finalizar, se realizaron las conclusiones pertinentes sobre los resultados, considerando de gran importancia que, a medida que la zonas de alta montaña incrementen su temperatura, *Pinus hartwegii* tenderá a cambiar su distribución hacia mayores altitudes y, dado que las cumbres de las montañas son más pequeñas que las bases, estas poblaciones ocuparán menores superficies que las actuales.

1.1. Antecedentes

El cambio climático global, es sin duda alguna, uno de los problemas ambientales más importantes que enfrenta la humanidad, por tal motivo, desde la década de 1980, la Organización Meteorológica Mundial (OMM), y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), forma un grupo internacional sobre cambio climático conocido como el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, esto con la finalidad de combatir el fenómeno que afecta a todo el planeta.

Dentro de la “Cumbre de la Tierra” celebrada en Río de Janeiro, más de 150 países firmaron lo que se denominó “Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) con la legislación internacional, la cual proponía la reducción de emisiones de carbono. Más tarde en 1997 se aprobó el texto del protocolo de Kioto (PK), mediante el cual se controlarían las emisiones de seis Gases de Efecto Invernadero (GEI): CO₂, CH₄, N₂O, Hidrofluorocarbonos (HFCS), Perfluorocarbonos (PFCS) y Hexafloruro de Azufre (SF₆), (De Alba, 2004).

Para 1998, se estableció el “Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), cuya función es evaluar la información científica disponible sobre el mismo, valorar los impactos ambientales y socioeconómicos del “Cambio Climático” y formular estrategias de respuesta.



Se han elaborado cuatro informes. En el primer informe (1990) se confirma la existencia del cambio climático con bases científicas; en el segundo informe (1995), se presentó material sobre las implicaciones de emisiones y consecuencias regionales, así como los insumos para la negociación del “Protocolo de Kioto”; el tercer informe (2001), muestra datos más reales y predictivos sobre “Cambio Climático”, dando especial énfasis en la participación humana, éste centra sus resultados en ámbitos regionales y mundiales, en donde se identificaron los sistemas más vulnerables a dichos cambios y sus posibles impactos tanto ambientales como socioeconómicos; para el cuarto informe (2007), se muestran los incrementos observados de los promedios de la temperatura del aire y de los océanos, señalando que es probable que estos incrementos sean debido a las concentraciones de los gases de efecto invernadero producidos por el hombre, además de las tendencias a eventos extremos como olas de calor y fuertes precipitaciones (IPCC, 2007).

Dentro de la relación cambio climático y vegetación cabe mencionar que los ecosistemas están siendo gravemente afectados, muchas especies están en peligro de extinción, en función de los problemas que éste ocasiona. Lo probable es que los ecosistemas no se desplacen como un todo, sino que, adopten una nueva estructura como consecuencia de las alteraciones experimentadas en cuanto a la distribución y abundancia de las especies (IPCC, 1992).

Se prevé que la distribución en altitud de la vegetación se desplace a mayor altura; algunas especies con gamas climáticas limitadas a las cumbres montañosas pueden extinguirse debido a la desaparición de hábitat o al menor potencial de migración. Las comunidades en peligro son aquellas cuyas opciones de adaptabilidad son limitadas (por ejemplo las comunidades de montaña, las alpinas, las polares, las insulares y costeras, las asentadas sobre extensiones de vegetación residual, y los patrimonios y reservas naturales), así



como aquellas comunidades en que los cambios climáticos vienen a añadirse a las presiones ya existentes (IPCC, 1995).

El efecto neto del cambio climático en el crecimiento y en la productividad de los bosques es incierto, aunque hay muchas pruebas en los restos fósiles que indican que las plantas han experimentado cambios considerables en su distribución como consecuencia de los cambios climáticos (Ciesla, 1995).

Se han hecho estudios que prevén los cambios en la distribución natural de los ecosistemas vegetales y de las especies arbóreas, que pueden ser consecuencia de cambios de temperaturas y de humedad, debido a los niveles atmosféricos de los gases de efecto invernadero (Ciesla, 1995).

Un estudio realizado por un grupo de científicos que trabajó en los Alpes austriacos muestra que las especies vegetales alpinas se están desplazando hacia las cumbres de las montañas a una velocidad que oscila entre 1-4 m por año. Estos datos se basan en estudios realizados en 26 cumbres de montañas en 1992 y comparados con informes históricos de las especies vegetales alpinas de las mismas montañas de 70-90 años atrás. Los Alpes han experimentado un aumento de temperatura de 0.7°C durante el periodo citado (Grabherr *et al.*, 1994).

Los ecologistas opinan que las especies vegetales que tienen una amplia distribución geográfica y grandes poblaciones serán las que más probablemente sobrevivirán al cambio climático, mientras que las especies raras o con distribuciones geográficas limitadas correrán mayores riesgos de extinción; sobretodo, para aquellas especies limitadas a las grandes alturas, que a la larga no podrán cambiar su propia distribución hacia aún mayores alturas como respuesta a un clima más caliente (Ciesla, 1995).

Por el contrario otros afirman que, el peligro de extinción de especies de plantas y la consiguiente pérdida de la biodiversidad es mínima, porque las plantas



poseen variaciones genéticas que les permiten adaptarse a condiciones medio ambientales cambiantes, ya que la variación genética es un requisito previo para la evolución y es un mecanismo poderoso que permite a plantas y animales a cambiar y adaptarse (Eriksson *et al.*, 1993).

La alta montaña en México se establece en los más altos edificios volcánicos activos a lo largo del Sistema Volcánico Transversal Mexicano (Lorenzo, 1964). Dentro del Estado de México la alta montaña comprende parte del Popocatepetl e Iztaccíhuatl y en su totalidad al Xinantécatl, los cuales representan tres de los cuatro edificios volcánicos más altos del país, todos comparten problemáticas similares, entre las cuales destacan: el cambio de uso de suelo, fragmentación y deforestación de sus bosques, producto, principalmente, de la gran carga demográfica alrededor de éstos (com. pers. Endara, 2012).

Para el caso de estudio, se consideró el Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT) que fue declarado por decreto presidencial el 15 de enero de 1936, el cual fue publicado en el Diario Oficial de la Federación el 25 de febrero del mismo año. En ese decreto se declara que el área deberá tratarse, en adelante como Parque Nacional, fijándose como límite inferior, la cota 3,000 msnm y se declara un rango de protección de 100 m a la redonda incluyendo las porciones de terrenos agrícolas y poblados que se encuentren en dicha área. El PNNT es uno de los parques nacionales más importantes de México por su diversidad biológica y provisión de servicios ambientales como calidad y cantidad de agua para los valles de Toluca y México.

La adaptación al cambio climático incluye todos los ajustes en el comportamiento o en la estructura forestal que reduce la vulnerabilidad a los cambios del sistema climático (Smith, Ragaland y Pitts, 1996). Si las poblaciones pueden adaptarse, y por cuánto tiempo, depende de los recursos disponibles (Nkem, 2009). Por lo anterior, el estudio de las estrategias de adaptación son de suma importancia para la supervivencia del *Pinus hartwegii* y



deberán considerarse en la investigación para realizar acciones dirigidas a la conservación y protección de los servicios ambientales que brindan estos ecosistemas y así lograr el manejo eficiente de los recursos naturales en el PNNT.

1.2. Planteamiento del problema

Los bosques de las zonas alpinas (mayores a 3,500 msnm) adquieren gran importancia, ya que albergan diversas especies endémicas, y solo ocupan el 1% del territorio nacional. En un escenario de cambio climático los bosques de coníferas y encinos serán los más afectados, entre éstos, los géneros *Pinus* spp y *Quercus* spp tendrán mayor vulnerabilidad a estos cambios, por estar adaptados a condiciones de frío (Arriaga y Gómez, 2004).

Estudios recientes sobre cambio climático regional y global señalan con un alto grado de confiabilidad, que los incrementos de temperatura pueden afectar tanto a los sistemas físicos como a los sistemas biológicos del planeta en distintos niveles (IPCC, 1995).

Los efectos del cambio climático global están favoreciendo al deterioro de los recursos naturales, así como una reducción en el recurso forestal de las zonas de alta montaña, en respuesta a estos cambios, los agentes locales han intentado adaptarse a través del cambio en crecimiento y áreas de regeneración del bosque, por tanto, se plantea que, la recuperación del área forestal puede adaptarse mejor a las nuevas condiciones del ambiente mediante estrategias específicas, así como el manejo integral de los recursos naturales que pueden proporcionar las herramientas para enfrentar estos cambios (com. Pers. Endara, 2012).

Debido al rápido aumento de temperatura, en los próximos cien años cambiarán la distribución geográfica y la diversidad biológica de muchos de los actuales



ecosistemas naturales (Ciesla, 1995). Por tanto se considera como un problema el hecho que no exista gran variedad de investigaciones científicas relacionadas al tema dentro del país, y así poder establecer las condiciones en las que se encuentra el bosque de alta montaña, conocer su comportamiento y así, poder aplicar las estrategias que ayuden a disminuir la baja forestal sobretodo en éstas áreas.

1.3. Justificación

Las investigaciones en México que están relacionadas con el tema de cambio climático son: vulnerabilidad y adaptación de especies vegetales, observaciones sistemáticas del clima y mitigación de emisiones de los GEI, análisis y evaluación de los posibles efectos en las actividades sociales y económicas, las cuales se integran en el Comunicado Nacional que México presenta ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC) (De Alba, 2004). Así, los estudios de impacto climático, han aumentado notablemente, repercutiendo en el ámbito científico, gubernamental y social, ya que ha incrementado la preocupación y participación de las organizaciones civiles, en líneas de investigación como adaptación y las medidas de mitigación principalmente (Villers y Trejo, 2004).

Desde el punto de vista geográfico, los estudios sobre las estrategias de adaptación de la vegetación resultan de vital importancia en el análisis del espacio geográfico y su interrelación con el medio ambiente ya que el cambio climático global ha impactado de manera significativa los ecosistemas de alta montaña, pero sobretodo en la distribución de la vegetación.

La relación entre los bosques y el cambio climático global se ha centrado más en la mitigación, en donde cabe mencionar no se han obtenido los resultados esperados, mientras que se ha prestado menos atención a cómo las actividades de manejo forestal, pueden ayudar a los ecosistemas boscosos a adaptarse a



dicho cambio (Guariguata, 2009). Aunque realizar propuestas de manejo forestal no es el objetivo de la investigación es indispensable realizar estudios que ayuden a obtener información veraz sobre el comportamiento de la vegetación que se ha establecido aproximadamente en los últimos 30 años por encima del límite de la vegetación, lo cual se relaciona a las variaciones climáticas, en este caso, *Pinus hartwegii* (el pino de las alturas), pues poco se ha investigado acerca de éste y su comportamiento.

Algunas poblaciones de árboles, debido a su variabilidad genética, podrán sobrevivir a los efectos del cambio climático, ajustándose a las nuevas condiciones a través de la *aclimatación*, es decir, que a través de la migración natural los árboles se desplacen hacia nuevas zonas con climas similares a los de su hábitat natural (Ciesla, 1995).

Existen dudas asociadas a todos los aspectos del cambio climático global, sobretodo en el impacto que éste ejercerá sobre los ecosistemas forestales (adaptación y capacidad de mitigación). Por lo anterior el tema de investigación encuentra plena justificación desde el punto de vista geográfico en la identificación de las posibles estrategias de adaptación del *Pinus hartwegii* en cuanto al cambio climático y su comportamiento, con el fin de contribuir en contra del deterioro gradual del recurso forestal en las zonas de alta montaña.



1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Identificar los patrones de distribución del *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Nevado de Toluca para establecer su relación con las variaciones climáticas y así conocer sus posibles estrategias de adaptación.

1.4.2. Objetivos específicos

Determinar la distribución altitudinal del bosque de *Pinus hartwegii* con la finalidad de establecer el límite de la vegetación arbórea.

Determinar los patrones de distribución del arbolado juvenil de *Pinus hartwegii* establecido en altitudes mayores a 4,000 msnm y así establecer el límite altitudinal de la especie.

Relacionar las variables dasonómicas del arbolado juvenil conforme a la distribución altitudinal, con la finalidad de establecer el periodo de establecimiento de la masa arbórea.



CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. El concepto de Biogeografía

La Biogeografía es la parte de la Geografía que hace referencia a los seres vivos que se encuentran sobre la superficie terrestre. Estrada y Saenz (1997), definen a la biogeografía como la ciencia que estudia el origen, la distribución, adaptación y asociación de organismos en el tiempo y el espacio. Es la ciencia que intenta describir y entender los innumerables patrones en la distribución de las especies. Y considera además los procesos que dieron lugar a sus distribuciones actuales (Morrone *et al.*, 2001).

La biogeografía es una ciencia integradora que estudia las distribuciones del pasado y del presente, tanto de plantas como de animales y otros organismos, así como los respectivos patrones y procesos que dieron lugar a ello. Su importancia radica en proporcionar información de cómo el ser humano ha alterado el medio ambiente y las consecuencias que se derivan de las distribuciones de los organismos. De esta manera, la biogeografía nos puede ayudar en la conservación de recursos y preservación de ambientes naturales a través del estudio sistemático del mismo (Morrone *et al.*, 2001).

La biogeografía como discute Ruíz (2007), se interesa por determinar y localizar las áreas en que se repiten las interacciones de seres vivos y las causas que favorecen tal distribución; estudia la biosfera (porción de la atmósfera que llega aproximadamente a 5,000 metros de altura hasta donde es posible la vida, incluyendo la flora y fauna, ya sea sobre el suelo, el subsuelo o el agua dulce o salada), al ser interdisciplinaria, tiene partes de la Biología y Ecología, mientras que el aporte desde la ciencia Geográfica es la espacialidad de los fenómenos y las interacciones climáticas entre otros.



Dado que la Geografía es una ciencia holística y se apoya de sus ramas (biogeografía ecológica, panbiogeografía, etc.), así como de otras ciencias afines (geología, paleontología, evolución, sistemática, ecología, fisiología, climatología, oceanografía, entre otras) para enriquecer y complementar los trabajos de investigación desde diferentes enfoques. La Biogeografía Ecológica por ejemplo, trata del estudio de los patrones de distribución, en términos de interacciones entre los organismos y sus ambientes físicos y bióticos, tanto actuales como en el pasado reciente (Estrada y Saenz, 1997).

De acuerdo con Estrada y Saenz (1997), la afinidad y complementación entre la Geografía y la Biogeografía, radica en que ambas son disciplinas que parten de la observación y el análisis y, por ello, tienen la virtud de contar con una gran cantidad de ciencias afines, y de que ambas estudian a su objetivo a través del tiempo y el espacio. Mientras que la diferencia consista en que la Geografía estudia y explica aquellos fenómenos ya sean físicos, biológicos o humanos que ocupan un espacio en un tiempo determinado y, la biogeografía se especializa en aquellos fenómenos vivos (biológicos) a diferentes niveles, sin embargo, el campo que ambas dejan para la investigación es inmenso.

De acuerdo a las definiciones mostradas, se resume que la biogeografía es una ciencia integradora, que nos ayuda a comprender el cómo y el porqué de los patrones y procesos de distribución de los organismos, y la relación estrecha que guardan con su ambiente ecológico.

2.2. Los bosques

Las regiones naturales en México se determinan por las interacciones entre factores climáticos, situación geográfica, orografía y la hidrología, los cuales determinan el entorno geográfico de cada región. Según Ruiz (2007), México



está dividido en siete regiones biogeográficas, de las cuales los bosques es la región de interés para esta investigación.

Los bosques son las regiones biogeográficas terrestres más extensas, ocupando el 30% de la superficie emergida del planeta (FAO, 2007); añadiendo su enorme valor en términos de biodiversidad. Los ecosistemas forestales albergan al menos el 75% de las especies continentales y una parte importante de la biomasa terrestre (Ruiz, 2007).

Los bosques desempeñan un papel primordial en el ciclo global del carbono porque almacenan grandes cantidades de carbono (C) en la vegetación y el suelo, intercambian C con la atmósfera a través de la fotosíntesis y la respiración, son fuentes de C atmosférico cuando son perturbados por causas humanas o naturales (p.ej. incendios forestales, utilización de malos sistemas de aprovechamiento, corta y quema para transformación en usos no forestales) y se convierten en sumideros de C atmosférico (es decir, transferencia neta de CO₂ desde la atmósfera a la tierra) durante el abandono de la tierra y su regeneración tras la perturbación. Los seres humanos tienen potencial, a través de la ordenación forestal, para alterar las reservas y flujos del carbono forestal alterando con ello su papel en el ciclo del carbono y su potencial para cambiar el clima.

Los bosques son importantes reguladores de la calidad del aire, disminuyen los efectos del cambio climático, debido a la fijación de carbono, son importantes productores de suelo evitando la erosión, son ambientes de alta energía y de abundancia de agua, en forma de humedales y complejas redes hídricas que drenan hacia las partes medias y bajas de las cuencas, donde se asienta gran parte de la población, presentan formaciones vegetales únicas en el mundo, tanto por su composición florística como por las particularidades evolutivas que han desembocado en altos niveles de endemismo y diversidad biológica.



De acuerdo con Ruiz (2007) las condiciones específicas de topografía, latitud y vientos oceánicos determinan la existencia de bosques mesófilos en la ceja de las sierras expuestas a la influencia del golfo de México o del océano pacífico, o bien, de grandes macizos de bosques de coníferas o encinos que cubren las partes altas de las montañas y del altiplano. En las partes más elevadas, los zacatonales o páramos y las nieves perennes coronan cumbres del Sistema Volcánico Transversal (SVT).

Para el caso de México existen varios tipos de bosques predominando los bosques de pino y de encino o una mezcla de ambos, considerándose como la nación más rica en especies de pino y de encino del mundo, esto como resultado de la variedad climática presente en el país. Se calcula que en el país existen alrededor de 50 especies diferentes de pinos y cerca de 150 especies de encinos (Ruiz, 2007).

Los bosques de pino se encuentran prácticamente desde el nivel del mar hasta el límite de la vegetación arbórea ocupando vastas superficies del territorio mexicano (Rzedowski, 2006). La distribución geográfica de los bosques de pino se extiende principalmente a lo largo de la Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental, Sistema Volcánico Transversal, Sierra Madre del Sur, Macizo de Oaxaca, Sierra Madre de Chiapas y las sierras de Juárez y San Pedro Mártir en Baja California Norte (Eguiluz, 1978).

De acuerdo con Ruiz (2007) los bosques de coníferas (pino y oyamel) son bosques siempre verdes y resistentes a heladas, a largos períodos de sequía, a incendios forestales así como al pastoreo. Esto se debe a la capacidad de regeneración y al rápido crecimiento de muchas especies principalmente pinos.

Se debe mencionar que las zonas alpinas de México, son de gran importancia ya que albergan un sinnúmero de especies endémicas, y ocupan el 1% del territorio nacional. En un escenario de cambio climático, estas especies son las



más susceptibles de ser afectadas, por estar adaptadas a condiciones frías. (Iglesias y Tivo, 2006).

2.2.1 *Pinus hartwegii*

Esta especie se establece en suelos negros de pradera y climas templado fríos (Caballero, 1967), pueden desarrollarse en pendientes pronunciadas sin mayores complicaciones durante su crecimiento (Perry, 1991). La madera es dura y resinosa, se emplea en la industria de pulpa para papel y aserrío, en algunas regiones se usa en mueblería, durmientes, cercas y leña (Eguiluz, 1978).

Sus características morfológicas son: de 8 a 25 m de altura (Eguiluz, 1978); 40 a 70 cm de diámetro normal, las ramas bajas son perpendiculares al fuste, copa gruesa y redondeada (Perry, 1991). Presenta 3 a 5 hojas por fascículo, longitud de hojas entre 10 a 17 cm, longitud de conos 8 a 12 cm y el color de conos de moreno-púrpura a casi negro (Yáñez, 2004). Es una especie de hábito perennifolio, su etapa de floración en el Distrito Federal, Estado de México y Puebla, abarca los meses de marzo y abril. Los conos se desarrollan en invierno y maduran de octubre a enero. Las poblaciones de esta especie presentan la máxima producción de conos cada 5 años (Patiño *et al.*, 1983).

Constituye además un bosque abierto y poco denso, que es acompañado por pastos amacollados de los géneros *calamagrostis*, *festuca* y *mulhelenbergia*, entre otros, al igual que de pequeñas hierbas, algunos arbustos, musgos y líquenes. Por lo mismo su volumen forestal es de los más bajos, aun cuando su índice de crecimiento y regeneración se encuentra reportado como de los más altos del país (Beaman, 1962; Anaya *et al.*, 1980 y Luján, 1981), aunque en su desarrollo depende mucho de las condiciones ambientales de su manejo.

El *Pinus hartwegii* se considera una especie que se localiza en los límites superiores para los rangos de distribución natural del género *Pinus spp.*, también conocido como el pino de las altas montañas (figura 1), es una especie que muestra una elevada tolerancia a las bajas temperaturas y es la única especie de pino en México que se encuentra en el límite de la vegetación arbórea entre los 2,800 y los 4,200 msnm (Campos, 1993).

Algunas de las poblaciones naturales de esta especie en México se encuentran seriamente amenazadas por factores naturales y antropogénicos, constituyendo en la actualidad poblaciones reducidas, fragmentadas y aisladas entre sí (Madrigal y González, 1993). El crecimiento de esta especie *Pinus hartwegii* está limitado principalmente por las condiciones ambientales predominantes en dichas zonas (bajas temperaturas y escasa precipitación) (Hernández *et al.*, 2005; Madrigal y González, 1993).

Dentro del Estado de México, los límites reportados para el bosque conformado se establecen a los 4,000 msnm, y se ubican en el Parque Nacional Itza-Popo, Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT), Monte Tlaloc y Sierra de las Cruces (com. pers. Endara, 2012).



Figura 1. Bosque de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Nevado de Toluca. Fuente: Endara, 2012.



2.3. Cambio Climático

2.3.1. Clima y Cambio Climático

El clima, debe ser entendido como el “conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan una región” (Real Academia Española), es además, un sistema no-lineal en el que la atmósfera, los océanos, tierra y seres que habitan los mismos e interactúan de forma compleja.

Entendiéndose como “no-lineal” a los cambios que en algún componente del sistema pueden ocasionar variaciones mínimas en el sistema global o, por el contrario (y más preocupante) pequeñas variaciones en los componentes del sistema que pueden ocasionar grandes cambios en todo el sistema, este parece ser el caso que define al sistema climático de la Tierra (IPCC, 2007).

El clima y la temperatura media de la superficie de la Tierra, dependen del balance entre la energía solar que recibe el planeta y la energía (radiación infrarroja) que éste emite. La atmósfera que envuelve el planeta está principalmente constituida por nitrógeno, oxígeno y argón, pero también tiene otros gases como bióxido de carbono (CO_2), ozono (O_3), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) conocidos como gases de efecto invernadero. Se entiende al cambio climático como el efecto que mantiene la temperatura de la superficie del planeta más caliente de lo que sería sin su existencia (Garduño, 2004).

Según Guariguata (2009), el cambio climático es un fenómeno global, con impactos a largo plazo y que involucra interacciones complejas entre procesos naturales (fenómenos, ecológicos y climáticos), sociales, económicos y políticos a escala mundial. Este puede dividirse en tres grandes líneas de investigación relacionadas:



La primera hace referencia al tiempo actual y persigue la detección y caracterización del cambio y su repercusión en los recursos naturales y en los sistemas sociales.

La segunda se centra en la predicción, a medio plazo y se basa en modelos matemáticos del sistema climático y de generar simulaciones confiables del comportamiento futuro del clima, a escala global y en los últimos años también regionales.

La tercera se refiere al pasado; se centra en el análisis de la variabilidad climática, en la deducción de los factores que la determinaron y la reconstrucción de su influencia en los sistemas naturales y la historia de la humanidad.

Para el IPCC (2007), el término “cambio climático” denota un cambio en el estado del clima identificable (por ejemplo, mediante análisis estadísticos) a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos. Denota todo cambio del clima a lo largo del tiempo, tanto si es debido a la variabilidad natural como si es consecuencia de la actividad humana. Este significado difiere del utilizado en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC), que describe el cambio climático como un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que viene a sumarse a la variabilidad climática natural observada en períodos de tiempo comparables.

2.3.2. Cambio climático y vegetación

La vegetación arbórea que se establece por encima del límite superior crece en condiciones extremas, ya que los árboles tienen que afrontar la supervivencia



en las altas montañas y las restricciones ambientales como el frío, la sequía, la baja disponibilidad de nutrientes y vientos tempestuosos (Däniker 1923; Wardle 1974; Tranquillini 1979; Slatyer and Noble 1992; Holtmeier 2003).

La vegetación arbórea superior suele formar un ecotono entre el bosque continuo y la zona superior de la montaña, es decir, la línea del bosque. El ecotono de la vegetación arbórea se extiende desde el límite superior de una cubierta forestal continua hasta el límite del último árbol, que es el límite extremo superior de la aparición de especies de árboles (Wardle 1974; Tranquillini 1979; Holtmeier 1993).

Aunque en una escala global, el límite superior de diferentes especies de árboles puede variar con respecto a las condiciones laterales, el límite superior depende del balance de calor, que en todas partes se hace cada vez más desfavorable con la elevación creciente. Además, la temperatura también determina la condición fisiológica de los árboles, los cuales deben ser capaces de adaptarse y esta adaptación se tiene que sincronizar con variaciones estacionales en la temperatura (Troll 1973; Wardle 1974; Tranquillini 1979; Havranek y Tranquillini 1961).

El cambio climático y los bosques están íntimamente ligados. Por una parte, los cambios que se producen en el clima mundial están afectando a los bosques debido a que las temperaturas medias anuales son más elevadas, a la modificación de las pautas pluviales y a la presencia cada vez más frecuente de fenómenos climáticos extremos (FAO, 2012).

El estudio de los efectos del cambio climático sobre la vegetación de México, es un tópico relativamente poco explorado. Los estudios acerca de la manera en que la vegetación se manifiesta a los cambios ambientales van desde los muy particulares como los de respuestas fisiológicas, hasta cambios a gran escala



como el mapeo de zonas ecoclimáticas de la vegetación y el impacto que recibirían por una duplicación en concentración del CO₂ atmosférico.

Dentro del sector forestal las opciones para mitigar el cambio climático pueden agruparse en tres categorías: 1) conservación o almacenamiento del carbono almacenado en bosques existentes, 2) secuestro de carbono a través de un incremento de las áreas cubiertas con bosques, y 3) medidas para incrementar la capacidad de almacenamiento de carbono en bosques existentes (Carpio y Ramírez, 2001).

2.3.3. Cambio climático y patrones de distribución

Las hipótesis actuales que intentan explicar el desarrollo de los árboles por encima del límite de la vegetación incluyen, además del clima, estrés climático, perturbación, balance de carbono insuficiente, limitación para el crecimiento celular y la formación de tejido, limitación de nutrientes, así como la regeneración limitada (Alpandino 2013):

Estrés climático: considerado como una forma extrema y especial de limitación, es generalmente utilizado de manera errónea ya que las comunidades sucesionales que ha pasado el cernidor de la selección evolutiva rara vez experimentan condiciones fatales de estrés y, además lo que se considera muy estresante para algunos organismos salvajes, proporciona las condiciones de vida para otros, a pesar de que estas condiciones estén lejos de permitir las tasas máximas de crecimiento (prejuicio de lo óptimo). Cabe mencionar que el estrés climático no afecta de la misma manera a la vegetación por encima del límite arbóreo, que a las especies que se encuentran por debajo del mismo.

Las plantas alpinas experimentan una serie de condiciones físicas que para la mayoría de las otras plantas serían letales. Desviaciones moderadas de las condiciones óptimas de crecimiento no son vistas como estrés, sino como



"excursiones" esenciales que tienen un "efecto de entrenamiento" y aumentan la eficacia biológica a largo plazo de un organismo.

Los factores de estrés típico son las temperaturas excesivas tanto bajas como altas, sequía o anoxia (falta de oxígeno), radiación y concentraciones de ciertos químicos (sales, metales pesados, etc.). En la zona de vida alpina existen tres tipos comunes de estrés:

1) Estrés por bajas temperaturas

La distribución altitudinal de taxones refleja su tolerancia a extremos de temperaturas bajas. Los taxones de plantas alpinas no morirán debido a temperaturas bajo cero, pero algunas veces pueden sufrir pérdidas parciales de tejido.

2) Estrés por calor

Puede sonar paradójico el discutir los efectos extremos del calor en ambientes alpinos. Sin embargo, el efecto combinado de la fuerte radiación solar, inclinación y exposición de la ladera, además de la pobre cobertura vegetal en el sustrato de la superficie seca, puede hacer que las temperaturas del suelo sean lo suficientemente altas para matar a la mayoría de los organismos de la tierra. Por lo tanto, para periodos cortos, el calor puede convertirse en un criterio decisivo de supervivencia durante el reclutamiento de plántulas sobre suelo desnudo en estas zonas.

3) Alta radiación (incluyendo aspectos de la radiación UV)

Las plantas verdes necesitan radiación solar, pero algunas veces puede ser demasiado ya que la radiación puede sobrepasar la intensidad tolerable cuando las plantas están de pronto expuestas a altas radiaciones sin el suficiente tiempo de aclimatación.



Entre las creencias tradicionales sobre el estrés en plantas alpinas, aquella que dice que la radiación UV es destructiva, es una de las que tiene mayor peso, a pesar de que no hay evidencia que la apoye; tanto la radiación total y la radiación UV, no suponen un estrés significativo (destructivo) en especies que están aclimatadas y adaptadas al ambiente alpino.

Perturbación: considerada como la alteración del orden o del desarrollo normal de algo, incluye disturbios como el pastoreo y la predación, erosión o enterramiento, fuego o viento. El daño mecánico por el viento, el hielo, la nieve y avalanchas afectan la mecánica fisiológica de los árboles (Havranek and Tranquillini 1995).

El *balance de carbono* de un ecosistema es la diferencia entre la absorción y pérdida de carbono a largo plazo en un área amplia. Ya que cada vez mayores fracciones del paisaje alpino se vuelven inhóspitas a medida que uno se mueve desde el límite arbóreo superior hacia los picos más altos, el almacenamiento promedio de carbono por unidad de área de terreno, es generalmente más pequeña comparado con elevaciones por debajo de la zona alpina.

La evidencia actual sugiere que las plantas alpinas no tienen limitaciones de carbono. Las dos mayores limitaciones para el crecimiento y producción de biomasa de la vegetación natural alpina son las bajas temperaturas nocturnas y la duración del periodo de crecimiento, las cuales limitan el crecimiento y la inversión en carbono.

El *crecimiento de las plantas*, el llenado de los sumideros de carbono, es mucho más que solo la adquisición de fotoasimilados (sustancias sintetizadas por las plantas a partir de CO₂ y de la energía solar). Significa desarrollar nuevos tejidos, nuevas células, paredes celulares y proteínas. Los procesos de crecimiento son muy sensibles a las bajas temperaturas y también requieren



recursos aparte de compuestos de carbono. El crecimiento es muy lento por debajo de los 6 °C.

La *limitación de nutrientes* es un tema universal, sin embargo con relevancia dudosa en ecología, a menos que se trate con cuidado. Además de luz, agua y dióxido de carbono, las plantas necesitan nutrientes para crecer, producir biomasa y ser alimento para animales y microbios. Los nutrientes caen dentro de dos categorías:

- 1) Nutrientes transportados por el viento, esencialmente compuestos solubles de nitrógeno (una fuente potencialmente infinita).
- 2) Nutrientes provenientes de la roca, llamados nutrientes minerales (P, K, Ca, Mg, etc.) originalmente liberados por erosión del material precursor (una fuente finita).

Sin embargo, no es la cantidad total de elementos nutritivos en el suelo la que determina el crecimiento de las plantas, sino su disponibilidad. Los nutrientes se hacen disponibles en gran parte debido a procesos biológicos en el suelo. La mayor parte de los nutrientes está almacenada en el humus recalcitrante (de descomposición lenta).

La posición de la vegetación arbórea superior depende también de una *regeneración natural*. La regeneración por semillas depende de una secuencia de acontecimientos favorables incluyendo la producción de cultivos de semillas buenas, camas adecuadas de semillas o micrositos y, finalmente, de las condiciones climáticas favorables durante la primera estación de crecimiento (Tranquillini, 1979).

Dependiendo de la especie, las semillas se dispersan en micrositos adecuados ya sea por los vientos o por animales. Algunas especies de árboles han desarrollado la capacidad de propagarse a través de capas en las zonas donde el clima no favorece la regeneración sexual y donde una vegetación densa



presenta una barrera formidable para el establecimiento de plántulas (Tranquillini, 1979). Dentro de la zona de estudio existe una regeneración limitada, sin embargo, es necesario el transporte de semillas para la generación de manchas de arbolado, siempre y cuando existan condiciones óptimas para su desarrollo.

Ciesla (1995) manifiesta que los cambios en la distribución de las especies de árboles, son importantes por múltiples razones. En primer lugar, hay que señalar que el clima podría cambiar más rápidamente que la capacidad de adaptación de algunas especies arbóreas; en segundo lugar las nuevas zonas podrían no ser edáficamente apropiadas para la migración y por último las zonas climáticas, que dan origen a ecosistemas forestales desplazados podrían no estar relacionadas con las actuales, ni con los modelos de utilización del suelo.

Los cambios en la distribución de las especies vegetales, puede ser en un primer momento por las necesidades individuales de las especies y no por las necesidades del ecosistema, ya que las especies pueden desplazarse cambiando la altitud o la latitud de su actual distribución, a medida que las temperaturas aumenten las especies se desplazarán hacia lugares de mayor altitud (Ciesla, 1995).

Generalmente, a un pequeño aumento de altitud corresponde un significativo cambio de latitud y dado que las cumbres de las montañas son más pequeñas que las bases, a medida que las especies se dirijan hacia zonas con mayores alturas debido al aumento de la temperatura, ocuparán menores superficies (figura 2), tendrán poblaciones más reducidas y podrían volverse más vulnerables a las presiones genéticas y medio ambientales (Peters *et al.*, 1990).

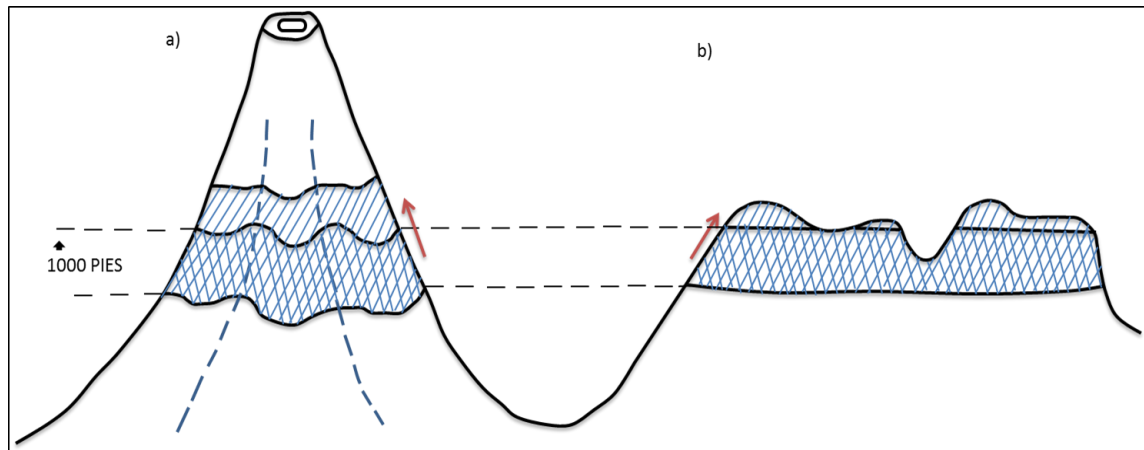


Figura 2. Redistribución de especies en las regiones de alta montaña. Fuente: propia con base en datos de Ciesla, 1995

En la figura 2 se puede observar lo que ocurre con un incremento medio anual de temperatura (2°C): a=causa en las montañas un incremento relativamente pequeño del área vegetal y b=causa en las tierras altas casi la desaparición de la zona vegetal en las grandes alturas.

Por lo anterior es lógico asumir que las especies vegetales que tienen una amplia distribución geográfica y grandes poblaciones serán las que probablemente sobrevivirán al cambio climático. Esto es cierto sobre todo para aquellas especies limitadas a las altitudes mayores, ya que en algún momento no podrán cambiar su distribución como respuesta a un clima más caliente (Ciesla, 1995).

Las condiciones atmosféricas se vuelven más extremas con el aumento de altitud al igual que el ángulo de inclinación y relieve. Además, las condiciones micro-climáticas también están fuertemente influidas por rodales dispersos de árboles, aspecto que ha sido poco considerado en la literatura arbórea hasta el momento (Holtmeier 2003).



2.3.4. Variables Climáticas

Se hace una breve descripción de los conceptos generales de las variables climáticas más relevantes para esta investigación. Se tratará específicamente:

a) temperatura y b) precipitación.

a) La temperatura

La temperatura es la magnitud física que expresa el grado o nivel de calor sensible a la atmósfera, de los cuerpos o del ambiente (Real Academia Española). La temperatura es uno de los factores climáticos que más influyen en la formación de los ecosistemas naturales. Cada especie animal o vegetal ha debido desarrollar lentamente sus propias adaptaciones al calor o al frío de acuerdo al lugar o región donde se asienta. Un cambio súbito en el régimen de temperatura, como el introducido por el cambio climático global, podría rebasar la tolerancia de algunos organismos o su capacidad de adaptación, e incluso poner en peligro su existencia (Rivera, 1995).

El gradiente térmico en función de la altitud varía de una región a otra como consecuencia de factores diversos, entre los cuales puede jugar un papel importante la pendiente, la altura relativa del macizo montañoso, la humedad, la latitud, etc. Rzedowsky (1978) determinó que este gradiente asume valores que oscilan entre 0.2 y 0.6°C por cada 100 m, incrementándose la magnitud del cociente con el aumento de la altitud. Sin embargo, estos valores varían respecto a la zona que se trate, por sus diferentes características físicas.

b) La precipitación

En meteorología la precipitación es el agua procedente de la atmósfera, y que en forma sólida o líquida se deposita sobre la superficie de la tierra (Real Academia Española). El cambio en la temperatura frecuentemente viene acompañado por cambios en la humedad atmosférica y, en consecuencia, en el



régimen de lluvias; entendiéndolo como humedad atmosférica, un elemento climático de gran interés ecológico que a menudo, juega un papel de importancia en la repartición de la vegetación (Rzedowsky, 1978).

La distribución de la lluvia a lo largo del año constituye un factor de suma importancia para la vida vegetal, sobre todo en lugares en que la humedad no es muy abundante, como es el caso de la mayor parte del territorio del país (Rzedowsky, 1978).

2.4. Sistemas de Información Geográfica

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) constituyen una importante herramienta de trabajo para la investigación y la planificación, no sólo en el campo académico sino también en el dominio técnico a diversos niveles de organización espacial y territorial, bien sea de carácter público, privado, científico o militar. Dada su gran capacidad para el almacenamiento y manipulación de grandes volúmenes de datos espaciales georeferenciables, los SIG facilitan el análisis y la toma de decisiones. No obstante, la calidad y exactitud de los SIG, dependen de la organización, equipamiento y personal responsable para su manejo y mantenimiento (Gómez, 2006).

Para el análisis y visualización de datos geográficos, las bases de datos son importantes para el sistema y consisten en dos elementos: una base de datos espaciales que describen la geografía (forma y posición) de las características de la superficie terrestre y una base de atributos, que describe las cualidades de éstas características (Eastman, 2012).

La mayoría de los SIG utilizan dos tipos de representación espacial: vectorial y raster. La representación vectorial, puede ser de tres tipos: puntos, líneas y polígonos. Los puntos son pares de coordenadas X, Y. Las líneas, se definen por la unión de puntos o serie de puntos y los polígonos tienen la característica



de que cierran con el inicio y el final de la serie. En los sistemas raster, la representación espacial es por medio de celdas, se identifican por columna y renglón; formando un área, que se divide en una fina red de celdas (llamas pixeles) en las que contiene la condición o atributo de la superficie terrestre en ese momento; a cada celda se le da un valor numérico, el cual representará un identificador, un atributo cualitativo o bien un valor cuantitativo (Eastman, 2012).

2.4.1. Modelación del Cambio Climático

Complejo como pocos, el sistema climático no sólo comprende numerosos procesos físicos, químicos y biológicos interrelacionados y en permanente cambio, sino que éstos se originan lo mismo en la atmósfera, los océanos, los continentes, la criosfera, la Tierra y el Sol, que en algunas actividades humanas (Rivera, 1995).

En estas condiciones, resulta difícil recabar e integrar información oportuna, suficiente, pertinente y confiable sobre el estado del clima en un periodo y lugar determinados. Para superar en parte estas limitaciones, la ciencia climatológica ha elaborado modelos climáticos, es decir, representaciones teóricas del sistema climático real, que permiten obtener respuestas aproximadas, a pesar de ello, ningún modelo climático puede formular predicciones ciento por ciento confiables acerca del cambio climático global (Rivera, 1995).

Para estudiar, representar y analizar lo más objetivamente posible el clima, se utilizan modelos climáticos, los cuales, se utilizan como herramienta de investigación para estudiar y simular el clima y para fines operacionales, en particular predicciones climáticas mensuales, estacionales e interanuales (IPCC, 2007).



Actualmente gracias a la disponibilidad de información meteorológica regional, es posible analizar la variabilidad climática e identificar las condiciones del clima, así como sus patrones de distribución espacial y temporal de una región (Díaz *et al.*, 2013).

El estudio del clima implica contar con información histórica relativa a variables como temperatura, precipitación, dirección y velocidad de los vientos, etc. Estos datos se recaban en las estaciones climatológicas convencionales y automáticas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), a través del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Hacia 1956 existían pocas estaciones climatológicas pero con el paso de los años, esta red de monitoreo se ha venido incrementando (Díaz *et al.*, 2013).

2.4.2. IDRISI y análisis de series de tiempo

Idrisi Taiga es una plataforma de SIG desarrollada por la Universidad de Clark, USA, con más de 300 módulos, para el análisis de superficies, modelación espacial, aplicación estadística y presentación de información digital. Desde su versión Taiga en 2009 incluyó la aplicación *Earth Trends Modeler* (ETM), diseñada para el análisis de series de tiempo (Eastman, 2012).

El ETM está diseñado para el análisis de datos, detección de tendencias, cambios e impactos en los recursos; con enfoque en el análisis y dinámica de fenómenos en series de tiempo. El objetivo es entender de manera dinámica los sistemas y mecanismos de la Tierra, orientado al estudio de cambio climático y análisis de tendencias. En el módulo se pueden realizar las siguientes acciones:

- Extraer y analizar tendencias globales a largo plazo,
- Examinar la relación entre series,
- Medir el impacto del cambio climático,



- Examinar las tendencias por estaciones,
- Aislar la variabilidad del medio ambiente normal,
- Descubrir y analizar los análisis de variabilidad a través de escaleras temporales,
- Examinar la tendencia de la estacionalidad, como cambios fenológicos en las plantas o algunas series que muestren una estación de acuerdo con las condiciones ambientales,
- Identificar los patrones característicos de la variabilidad espacio-tiempo, útiles para el desarrollo de sistemas de la Tierra,
- Examinar la relación entre series de tiempo usando regresión múltiple.

El módulo está organizado en tres secciones, las cuales son las más representativas del proceso:

1. Exploración (*Explore*)

En esta sección se crean proyectos (*Project*), se visualizan las series (*Explore Space / Time Dynamics*), además se representa la dinámica de la serie por medio de gráficas, donde se puede elegir una zona y se muestran los valores máximos, mínimos, la media, promedio y desviación estándar. Esta línea de tendencia se puede realizar mediante la media de Sen, su ecuación es la siguiente, la cual permite en series cortas eliminar el ruido.

$$Y = \alpha + X^T \beta \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\alpha = Y - \beta X \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\beta = \frac{Y_j - Y_i}{X_j - X_i} \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde:

β = pendiente entre X y Y

Y_j = media del tiempo j

Y_i = media del tiempo i

X = tiempo



2. Análisis (*Analysis*)

Esta sección está dedicada a los procedimientos para visualizar las series de tiempo en explorar (*Explore*). Permite examinar tendencias a largo plazo, con una variedad de técnicas para series de tiempo; incluidas las medias de linealidad monotónicas, tipos de tendencias y estimación; para reducir efectos atípicos y medir la importancia de los no-paramétricos.

Dentro de esta sección se encuentra *Series Trend Analysis*: para el análisis de tendencias espacio-temporales, a continuación se describen las tres secciones más representativas:

1. Linealidad (r^2): consiste en calcular el valor medio de cada pixel por cada periodo de tiempo, cuyo valor es sustraído de cada imagen.
2. Tendencia Monotónica (Mann-Kendall tau τ): es un indicador de correlación que mide el grado creciente o decreciente de tendencia; tiene un rango de -1 a +1; donde 1 indica que continuamente aumenta y nunca disminuye, lo contrario cuando el valor es -1. Un valor de 0 indica que no es consistente.

También se encuentra en análisis STA (*Seasonal Trend Analysis*) donde se calcula la tendencia estacional de la serie de tiempo. Por otro lado se encuentra la sección de *Linear Modeling*, la cual calcula la relación entre series (dependiente e independiente). Además de hacer la correlación múltiple parcial, también permite desfazar el periodo de análisis, de acuerdo a las unidades de serie, por medio de la opción *Lag*; es el tiempo de respuesta entre la variable independiente con la dependiente. Lag 0 se refiere a que no existe periodo de cambio entre las variables.

3. Preproceso (Preprocess): se proporcionan herramientas para probar la correlación de la serie; cuando hacen falta datos en la imagen (pixeles) o mala resolución, se pueden llenar esos espacios; mediante datos



interpolados como humedad, contaminación, desestacionalización o eliminación de ruido. La variabilidad en las series de tiempo ocasionadas por los ciclos anuales, impide una correcta comparación entre los valores, por esta razón se aplica una desestacionalización (*Deseason*) esta permite evidenciar el comportamiento estacional en una serie de tiempo, generando una nueva serie de la variable X; este proceso se realiza pixel por pixel de cada imagen de acuerdo a la ecuación 4, que se describe en el siguiente esquema:

$$\overline{X_1} = \frac{\sum_{j=0}^n x_{ij} + 1}{n} \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde:

X = variable

i= meses para temporalidad en la serie

j= año

n= total de imágenes

2.4.2.1. Prueba estadística no paramétrica de Mann-Kendall por series

Para la evaluación de la tendencia de una serie de datos a nivel temporal del comportamiento climático, la prueba no paramétrica de Mann-Kendall es ampliamente utilizada, en ciencias ambientales se usa para identificar tendencias en parámetros climáticos, ya que permite medir el grado de tendencia creciente o decreciente durante toda la serie de tiempo. Sus valores se expresan en un rango que va de -1 a +1. El valor 1 indica una tendencia que continuamente crece y nunca disminuye, al contrario cuando el valor tiende a -1. Un valor de 0 indica que la tendencia no expresa variación significativa (Eastman, 2012).

Su desarrollo se muestra en los siguientes pasos:



1. Se enlistan los valores de las variables (por ejemplo precipitación) de forma ordenada temporalmente (X_1, X_2, \dots, X_n)
2. Se obtiene el signo de la diferencia de cada par de valores al comparar sus magnitudes $X_j - X_k$ con $j > k$ de acuerdo con lo siguiente:

$$\text{Signo}(X_j - X_k) = \begin{cases} 1 \text{ si } & X_j - X_k > 0 \\ 0 \text{ si } & X_j - X_k = 0 \\ -1 \text{ si } & X_j - X_k < 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 5}$$

3. Se calcula el estadístico S de Mann-Kendall, mediante la siguiente ecuación:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{signo}(X_j - X_k) \quad \text{Ecuación 6}$$

En caso de que los valores se repitan se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{VAR}(S) = \frac{1}{8} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_{p+5}) \right] \quad \text{Ecuación 7}$$

Dónde:

n= total de valores

t_p = número de valores iguales

g= grupo de empates

Si S es positivo la tendencia es creciente, cuando S es negativo hay una tendencia decreciente. Por último se calcula el tau (T), que es una medida de correlación entre dos variables, de esta manera obtener el valor creciente o decreciente, en un rango de 1 a -1.

$$\tau = \frac{2S}{n(n-1)} \quad \text{Ecuación 8}$$

En la siguiente figura se esquematiza la manera en que se procesa una serie temporal de imágenes por el método de tendencia monotonica de Mann-Kendall en el SIG IDRISI, cabe resaltar que el proceso es pixel por pixel.

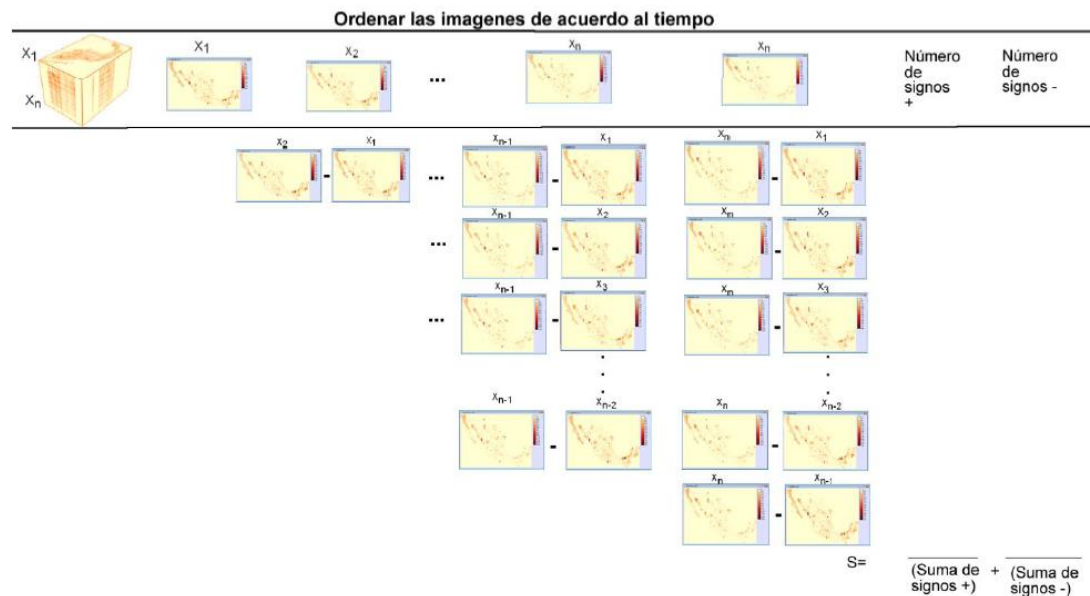


Figura 3. Representación del proceso para obtener una serie temporal en Mann-Kendall. Fuente: Nájera, 2011.

2.4.3. Métodos de Representación Cartográfica para la Vegetación

La modelación cartográfica es considerada una de las operaciones que más caracterizan a los modernos SIG ya que albergan potentes herramientas de análisis.

La cartografía de la vegetación es indispensable para la representación en los estudios referidos a este tema. Los sistemas de representación de las plantas son: por puntos, por manchas y mediante retícula, insistiendo en el último sistema, actualmente muy generalizado entre los botánicos y los geógrafos. La cartografía de la vegetación abarca aspectos técnicos y temáticos diversos y más complejos, debido a la propia riqueza del paisaje vegetal (Panareda, 1996).

La cartografía de la distribución de los seres vivos, tienen un gran interés en los estudios biogeográficos, sus principales cualidades son que a pesar de ser cartografía simple, aporta una gran cantidad de información, en donde se muestra áreas de distribución de especies, cronología de seres vivos, y que



servirá como documento base de comparación para futuras investigaciones (Panareda, 1996).

Existen diversos sistemas cartográficos utilizados en la representación de la distribución de las plantas. Hasta hace pocos años un área de distribución era representada mediante una mancha o un conjunto de puntos que indicaban la localización de una determinada especie, en relación a la escala. En la actualidad se ha generalizado el sistema de representación mediante una retícula (Panareda, 1996).

Sistema de puntos (utilizado en el presente trabajo): consiste en dibujar puntos en los sectores en donde un individuo de la especie correspondiente ha sido localizado. Este sistema permite representar con exactitud la distribución de una planta, pero tiene el inconveniente de que exige un enorme trabajo, si se quiere obtener un mapa sin excesivas lagunas, en especial en mapas a escalas grandes y medias. No así en los mapas a pequeña escala, por la gran simplificación que conlleva la escala.

Sistema de manchas (utilizado en el presente trabajo): consiste en delimitar el área de distribución de una especie, incluyendo pequeños espacios de los cuales se carece de información directa o la especie correspondiente no ha sido encontrada, pero que a la escala del mapa estos detalles carecen de importancia. Posteriormente el área delimitada es coloreada o tramada, según las opciones técnicas que el cartógrafo dispuso para la realización del mapa. El proceso de recogida de datos y de elaboración es mucho más rápido y económico que en el sistema de puntos, y la eficacia cartográfica es semejante, e incluso puede ser superior por la visión más completa y global de la distribución de una especie.

Uso de retículas para definir áreas de referencia mínimas o constantes ha dado un vuelco a la cartografía cronológica. La determinación de una unidad mínima



de referencia tiene la ventaja de agilizar el trabajo de campo y la recogida de datos, así como su elaboración cartográfica posterior. La retícula resultante tenía el grave inconveniente de estar constituida por unidades de superficie desigual, ya que los meridianos son convergentes hacia los polos. Este inconveniente se solucionó con el establecimiento y generalización del sistema de proyección UTM, esta retícula establece unidades que son cuadrados regulares, que a su vez pueden ser subdivididos en otros cuadrados, y así sucesivamente hasta la unidad que se desee.

Las dimensiones de la unidad mínima o de la unidad de referencia se establecen en relación a la superficie del territorio, a los objetivos del trabajo y a la escala de representación cartográfica (Panareda, 1996).

2.5. Conceptos relacionados

En este apartado se concentran las definiciones teóricas de las palabras clave del tema de investigación.

a) Área de distribución geográfica

Comprende en un principio su área de reproducción, siendo ésta la parte de su región de distribución en la que la especie puede reproducirse permanentemente (Estrada y Saenz, 1997).

b) Adaptación

Ajuste de los *sistemas humanos* o naturales frente a entornos nuevos o cambiantes. La adaptación al *cambio climático* se refiere a los ajustes en sistemas humanos o naturales como respuesta a *estímulos* climáticos proyectados o reales, o sus efectos, que pueden moderar el daño o aprovechar sus aspectos beneficiosos. Se pueden distinguir varios tipos de adaptación,



entre ellas la preventiva y la reactiva, la pública y privada, o la autónoma y la planificada (IPCC, 2001).

c) Cambio climático

Variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales, a forzamientos externos o a cambios antropogénicos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso de la tierra (IPCC, 2001).

d) Gradiente ambiental o geográfico

Es una cantidad más o menos incrementada o disminuida regularmente de un factor físico (temperatura, humedad, altitud y latitud), (Estrada y Saenz, 1997).

e) Patrones de distribución

De acuerdo a Humphries y Parenti, 1986; se refieren al conjunto de las causas de las distribuciones presentes de las plantas y animales, mismas que se dan por la variedad de fenómenos concurrentes: historia geológica, clima, extinción, dispersión individual e introducción. Dichos patrones deben de ser explicados grupo por grupo, esto es, no se deben buscar explicaciones generalizadas, ya que grupos diferentes tiene distintas habilidades de dispersión o son de edad diversa.

f) Regeneración

Renovación de grupos de árboles, ya sea de forma natural (en el mismo lugar o en lugares adyacentes, o por semillas depositadas por el viento, pájaros o animales) o de forma artificial (mediante plantación directa), (IPCC, 2001).



g) Sistema climático

Es un sistema muy complejo que consta de cinco componentes principales (atmósfera, hidrosfera, criosfera, superficie terrestre y biosfera) y de las interacciones entre ellos. El sistema climático evoluciona en el tiempo bajo la influencia de su propia dinámica interna y por efecto de forzamientos externos, como las erupciones volcánicas o las variaciones solares, y de forzamientos antropógenos, como el cambio de composición de la atmósfera o el cambio de uso de la tierra (IPCC, 2007)

El sistema climático está formado por los subsistemas Atmósfera, Océanos, Hielo y Biosfera. Aunque la energía nuclear presenta problemas para su uso en la Tierra, la energía para el movimiento de las partículas que forman los subsistemas climáticos, para el crecimiento de la vegetación y el metabolismo de los seres vivos la proporciona casi en su totalidad un reactor nuclear en modo de fusión que denominamos Sol. Una pequeña parte proviene de las reacciones nucleares que ocurren constantemente en el interior del planeta y que producen los movimientos tectónicos (Ruiz, 2001).

h) Variabilidad climática

El concepto de variabilidad climática denota las variaciones del estado medio y otras características estadísticas (desviación típica, sucesos extremos, etc.) del clima en todas las escalas espaciales y temporales más amplias que las de los fenómenos meteorológicos. La variabilidad puede deberse a procesos internos naturales del sistema climático (variabilidad interna) o a variaciones del forzamiento externo natural o antropógeno (variabilidad externa), (IPCC, 2007).

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1. Localización

El Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT) se localiza a 22 km al suroeste de la Ciudad de Toluca entre los 2, 102,398 y los 2, 134, 398 metros Norte; y los 399, 833 y los 432, 253 metros Este, en el sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM). Con una superficie aproximada de 51,000 ha, considerando como límite inferior la cota de los 3,000 msnm (INEGI, 2012). Sin embargo el área de estudio contempla aproximadamente 2,080 ha de superficie y se considera desde la cota 4,000 msnm (figura 4).

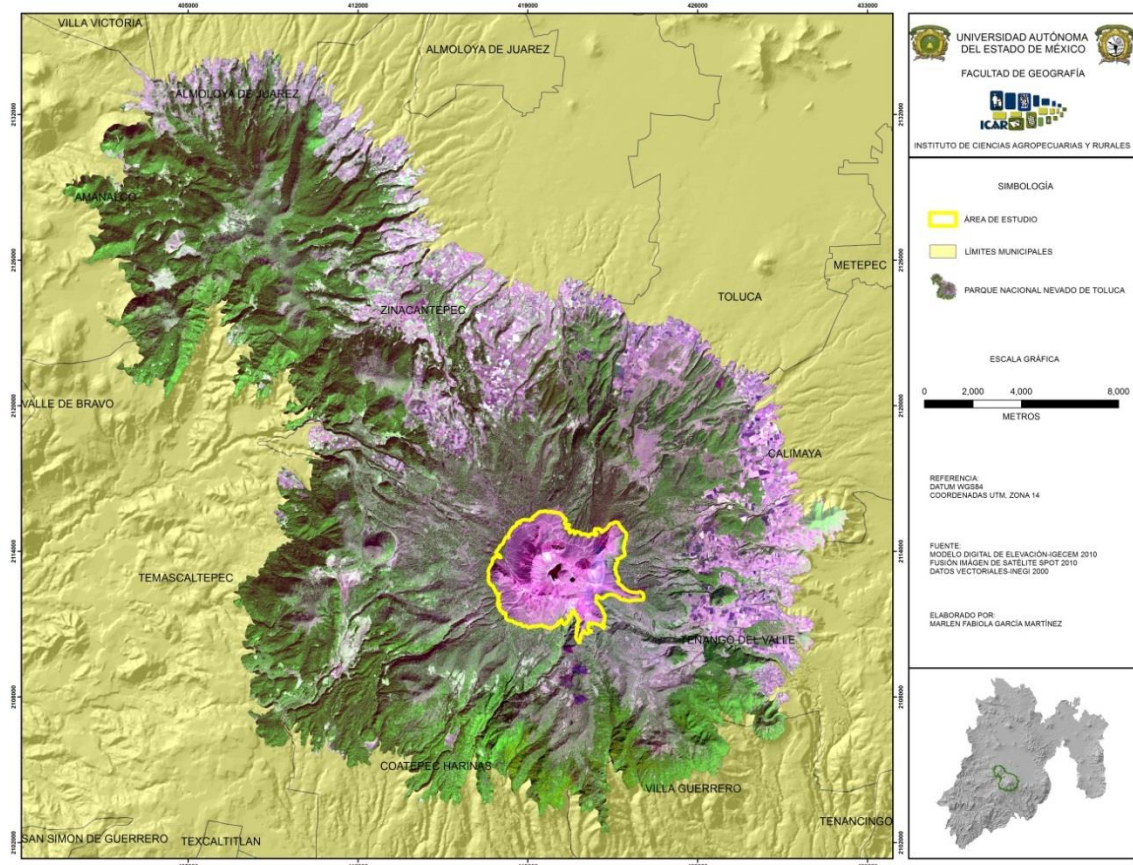


Figura 4. Mapa de localización del área de estudio en el PNNT. Fuente: propia con base en INEGI, 2000.

El Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT) se encuentra entre los municipios de Zinacantepec, Toluca, Almoloya de Juárez, Villa Victoria, Calimaya, Tenango del Valle, Villa Guerrero, Coatepec Harinas, Temascaltepec y Amanalco de Becerra. (Decreto del PNNT 1936 y 1937).

El PNNT puede considerarse el más importante de los diez parques nacionales del Estado de México en función de su extensión que es de 51,000 hectáreas y es el parteaguas de dos de las cuencas hidrológicas más importantes de México: las de los ríos Lerma y Balsas (SEMARNAT, 2003). Además sobre esta área se localiza el Volcán Xinantécatl, cuarta montaña más elevada del país (4,680 msnm), forma parte de la Sistema Volcánico Transversal (figura 5), mismo que cruza la República de oeste a este, abarcando una franja cercana a los 900 km de largo y un ancho que oscila entre 20 y 100 km (Lorenzo, 1964).



Figura 5. Ubicación del Sistema volcánico Transversal. Fuente: propia con base en INEGI, 2000.

3.2. Geomorfología

El PNNT es una zona muy accidentada asociada con cráteres erosivos (figura 6), coronada por la cumbre del volcán Nevado de Toluca cuya morfología se caracteriza por dos crestas elevadas: el Pico del Fraile (de 4,660 msnm) y el del Águila (de 4,550 msnm), (GEM, 1999).

La Geomorfología juega un papel fundamental en el establecimiento de la vegetación alpina, el cual está representado por pastos altos y campos de hierba, cabe mencionar que en la actualidad se observan manchas relativamente pequeñas de la especie *Pinus hartwegii* por encima del límite arbóreo superior (Alpandino, 2013).

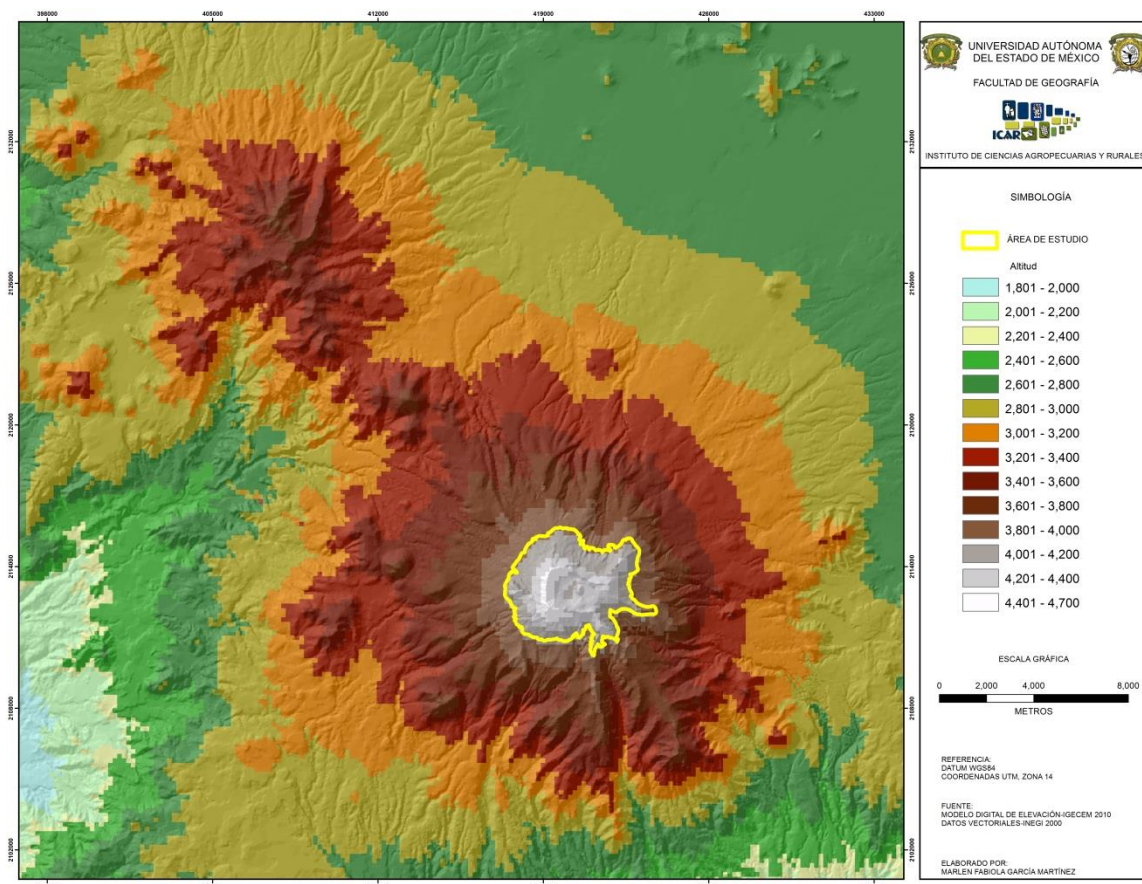


Figura 6. Mapa hipsométrico del área de estudio en el PNNT. Fuente: propia con base en INEGI, 2000.

3.3. Geología

Maass y Burrola (2010) mencionan que el Nevado de Toluca es un estrato-volcán formado hace aproximadamente 28,000 años. La última actividad del volcán registrada fue hace 11,000 años y formó el domo central del cráter tipo caldera, constituido por una serie de capas de lava de roca andesita, en cuyo centro se eleva un domo central denominado “El Ombligo” (figura 7).

La gran diversidad de materiales de origen volcánico, son la base para la pedogénesis en el ecotono del límite superior del bosque. El material parental es fundamental para el desarrollo del suelo, que está sometido a movimientos locales por la acción de las heladas, fluencia de pendiente y el movimiento de agua (Tranquillini, 1979).

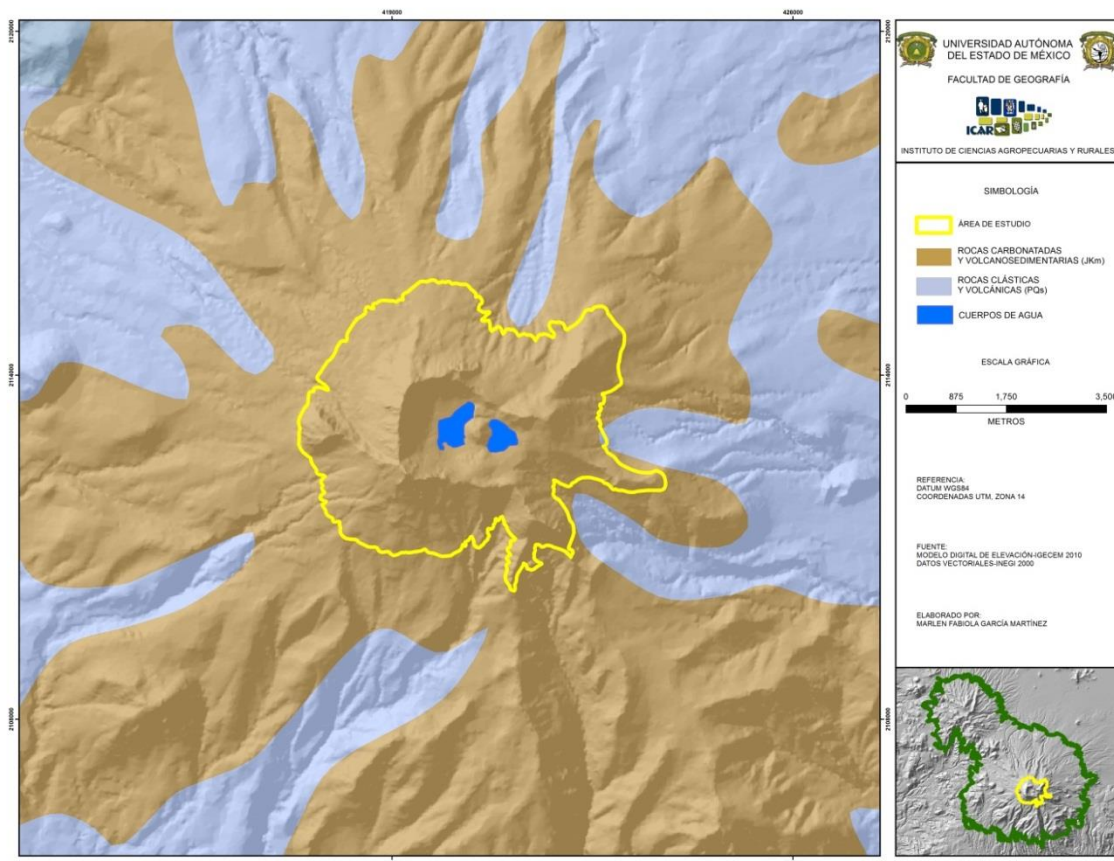


Figura 7. Mapa de geología del área de estudio dentro del PNNT. Fuente: propia con base en INEGI, 2000.



3.4. Edafología

El material parental, asociado a los factores del clima y del tiempo, dan lugar a la formación de diferentes tipos de suelos que, de acuerdo con la clasificación de FAO-UNESCO e identificados y cartografiados por INEGI (1998), para el área de estudio son: andosoles (húmicos, mólicos y ócricos) y regosoles (eútrico) (figura 8).

De acuerdo a CONANP (2009) se describen los tipos de suelos existentes en el área de estudio:

Los andosoles son la asociación más importante del PNNT, ocupan el 87% de la superficie, tienden a desarrollarse bajo un bosque de coníferas. Se caracterizan por derivarse de cenizas volcánicas recientes ricas en alófonos en un clima semi-frío subhúmedo; esta relación aunada a la precipitación, genera un pH ácido que permite tener una alta capacidad de intercambio catiónico y una baja saturación de bases, lo que facilita la retención de agua y nutrientes para el desarrollo de vegetación de pino-encino, que proporcionan a su vez abundante materia orgánica.

El regosol ocupa el 3.5% de la superficie, distribuyéndose en la estructura geomorfológica de montaña, formada por el cráter del volcán. Se caracteriza por formarse a partir de las cenizas volcánicas con un sólo horizonte de diagnóstico "A". Son suelos pobres en materia orgánica y en nutrimentos; se encuentran relacionados con los litosoles y andosoles en áreas con material suelto (arenoso, gravoso o pedregoso).

Debido a la alta precipitación y baja evapotranspiración, la humedad del suelo es un factor limitante para el crecimiento de los árboles en el límite superior (Tranquillini, 1979). En el complejo terreno alpino es difícil determinar, en qué medida, la vegetación es una consecuencia de las propiedades del suelo. Los

suelos con islas de árboles, muestran significativamente más bajas densidades aparentes, pero mayor concentración de carbono.

La formación del suelo es lenta y las pendientes pronunciadas son moldeadas por la erosión, especialmente si la estabilización de la vegetación es ausente, por lo que los suelos están en un constante proceso de rejuvenecimiento (Tranquillini, 1979).

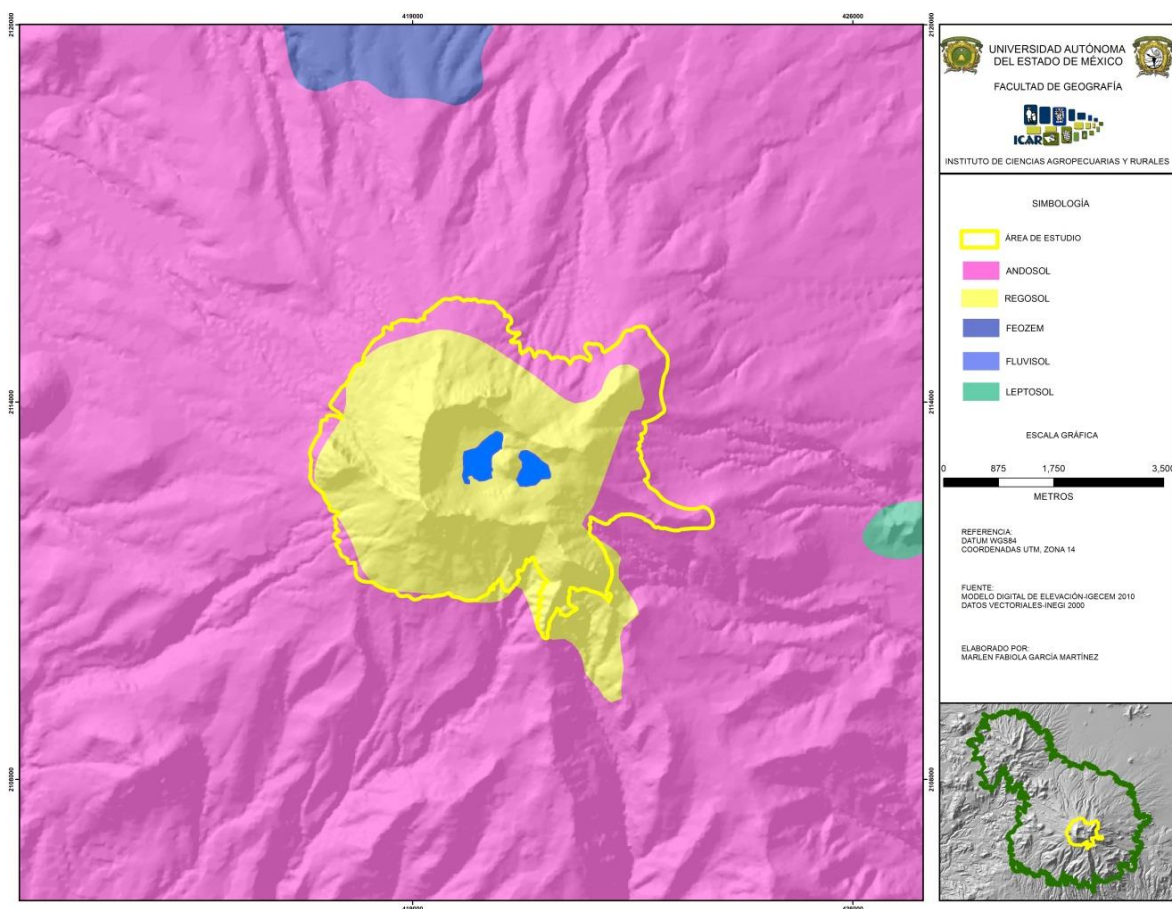


Figura 8. Mapa de edafología del área de estudio dentro del PNNT. Fuente: propia con base en INEGI, 2000.



3.5. Hidrología

En la cima del volcán Nevado de Toluca, el cráter conforma una cuenca cerrada, caracterizada por presentar laderas escarpadas y dos lagos permanentes: el del Sol y la Luna (CEPANAF, 2008). Se observan diversas corrientes de agua de tipo perene e intermitente dentro del área de estudio (figura 9).

Globalmente, las relaciones hídricas son secundarias en importancia después de la temperatura en el moldeado de la vegetación. Las relaciones hídricas en los ecosistemas alpinos están regidas por cuatro componentes: la duración de la temporada sin nieve, la proporción precipitación/evapotranspiración, la cobertura vegetal del suelo y la profundidad del suelo disponible para las plantas (Alpandino, 2013).

Que los ecosistemas alpinos a latitudes más altas sufran o no por la escasez periódica de agua, es, en esencia, una cuestión del almacenamiento de agua en el suelo, por lo tanto de la profundidad y calidad del suelo. Los tres impulsores para el almacenamiento de humedad en los suelos son: la profundidad (determina el volumen potencial de almacenamiento de agua), las piedras (reducen el volumen potencial del suelo) y el volumen de los poros (determina el volumen máximo de agua almacenada por unidad de volumen de sustrato fino), (Alpandino, 2013).

La escasez de agua rara vez afecta a las plantas alpinas directamente, incluso en regiones con muy poca vegetación. Sin embargo, esto no significa que el agotamiento periódico de la humedad del suelo sea insignificante.

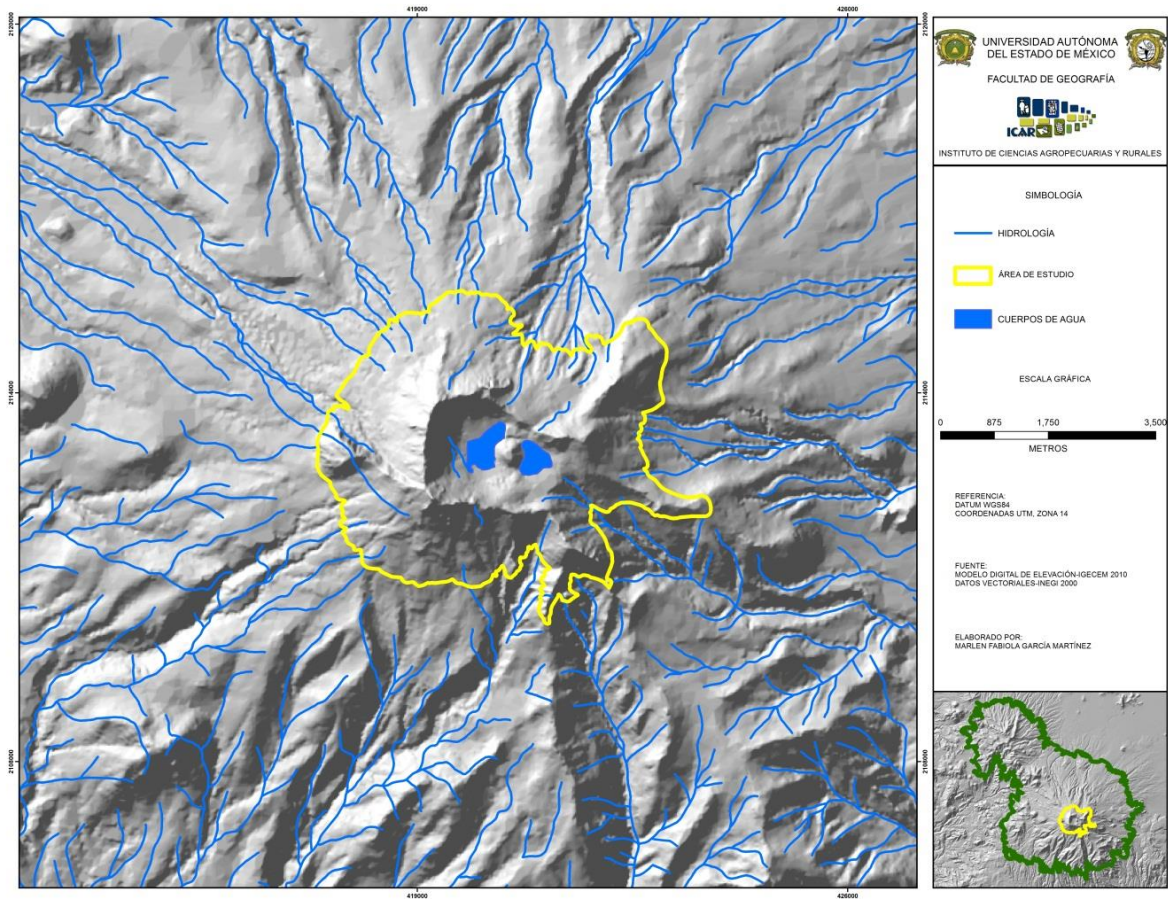


Figura 9. Mapa de hidrología del área de estudio dentro del PNNT. Fuente: propia con base en INEGI, 2000.

3.6. Clima

En el Parque Nacional Nevado de Toluca, la altura con la subsecuente diferencia de climas, se manifiesta en diferentes ecosistemas; así, mientras en las faldas del volcán se presenta uno templado y lluvioso; en la cumbre, el clima es frío en verano y polar de alta montaña en invierno (figura 10), (Ceballos, 2011).

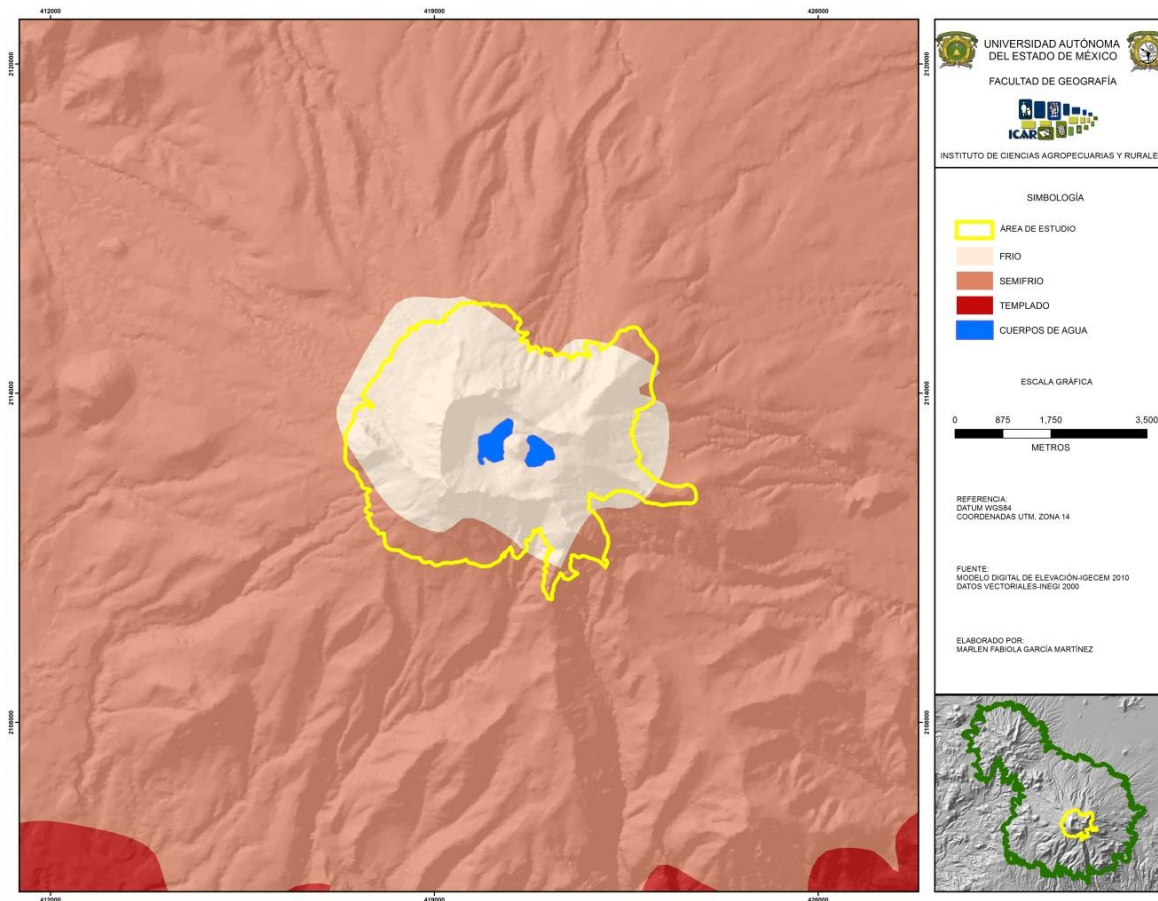


Figura 10. Mapa de clima del área de estudio dentro del PNNT. Fuente: propia con base en INEGI, 2000.

Asimismo, los grandes contrastes de altitud (casi dos kilómetros verticales) y temperatura generan fenómenos meteorológicos locales e influyen en la dinámica de los vientos regionales, de tal forma que con base en la clasificación climática de Köppen modificada por Enriqueta García (1988), en el área de estudio se encuentra el clima frío de altura con temperatura media anual entre -2°C y 5°C , con temperatura del mes más frío inferior a 0°C y la temperatura del mes más cálido, entre 0°C y 6.5°C , el régimen de lluvias es de verano aunque pueden caer nevadas en invierno, todo lo mencionado ocurre sobre los 3,700 msnm.



3.6.1. Distribución espacial del clima

Con respecto a las temperaturas medias, mensual y anual, éstas son el resultado de la ubicación latitudinal, la altitud sobre el nivel medio del mar y la topografía regional. Conforme aumenta la altitud descienden los valores promedio de temperatura siguiendo la configuración horizontal del relieve, de forma que se presentan las mayores temperaturas en las partes bajas del terreno y disminuyen conforme se incrementa la elevación, llegando a estar por debajo de los 0°C en las cumbres de las mayores elevaciones como los volcanes (Díaz *et al.*, 2013).

Los valores de precipitación tienden a variar entre las zonas altas y bajas del territorio. Las precipitaciones pueden presentarse en cualquier época del año, pero las mayores abarcan de mayo a octubre, siendo julio el mes más lluvioso, aunque puede variar. El peligro por fuertes precipitaciones está latente en verano, y la vulnerabilidad cada vez es más alta por el crecimiento de la población, la tala del bosque, la erosión y el aumento de las parcelas dedicadas a la agricultura. El número de heladas en las laderas del Nevado es de 130/año, mientras que en las partes altas asciende hasta 295/año (Ceballos, 2011).

La precipitación en las montañas generalmente aumenta con la altitud. Mientras que la distribución a micro-escala es bastante uniforme en el área de bosques cerrados subalpinos, la variación se multiplica en el límite superior de la vegetación, donde las islas de árboles, las crestas y los valles pequeños son influenciados por el viento (Tranquillini, 1979).

3.7. Características biológicas

Hasta hace relativamente poco, se consideraba que el PNNT tenía una diversidad biológica relativamente baja, característica de los bosques del centro del país, con algunas especies endémicas y en peligro de extinción, sin que tuviera gran relevancia en este contexto a nivel nacional. Sin embargo, estudios recientes



sobre la importancia relativa de las áreas protegidas de México, basados en algoritmos de complementariedad, han demostrado que el PNNT es una de las 20 reservas más importantes de México (Ceballos, 2011).

La conjunción de las regiones neártica y la neotropical donde se encuentra ubicada esta área hace que sus características climáticas y de vegetación favorezcan la diversidad de la fauna, de la cual sobresalen los grupos de mamíferos, aves, reptiles y anfibios, coexistiendo así especies consideradas neárticas y tropicales (Vaca *et al.*, 2007 tomado de Ceballos 2011). Tal es el caso de las truchas que sobreviven dentro de las lagunas.

El PNNT es una región prioritaria para la conservación debido a su diversidad de ecosistemas derivada del gradiente altitudinal, en la que predomina como tipos de vegetación el bosque de pino, oyamel, encino y sus mezclas, pradera y bosque mesófilo de alta montaña (figura 11), (CONANP, 2009).

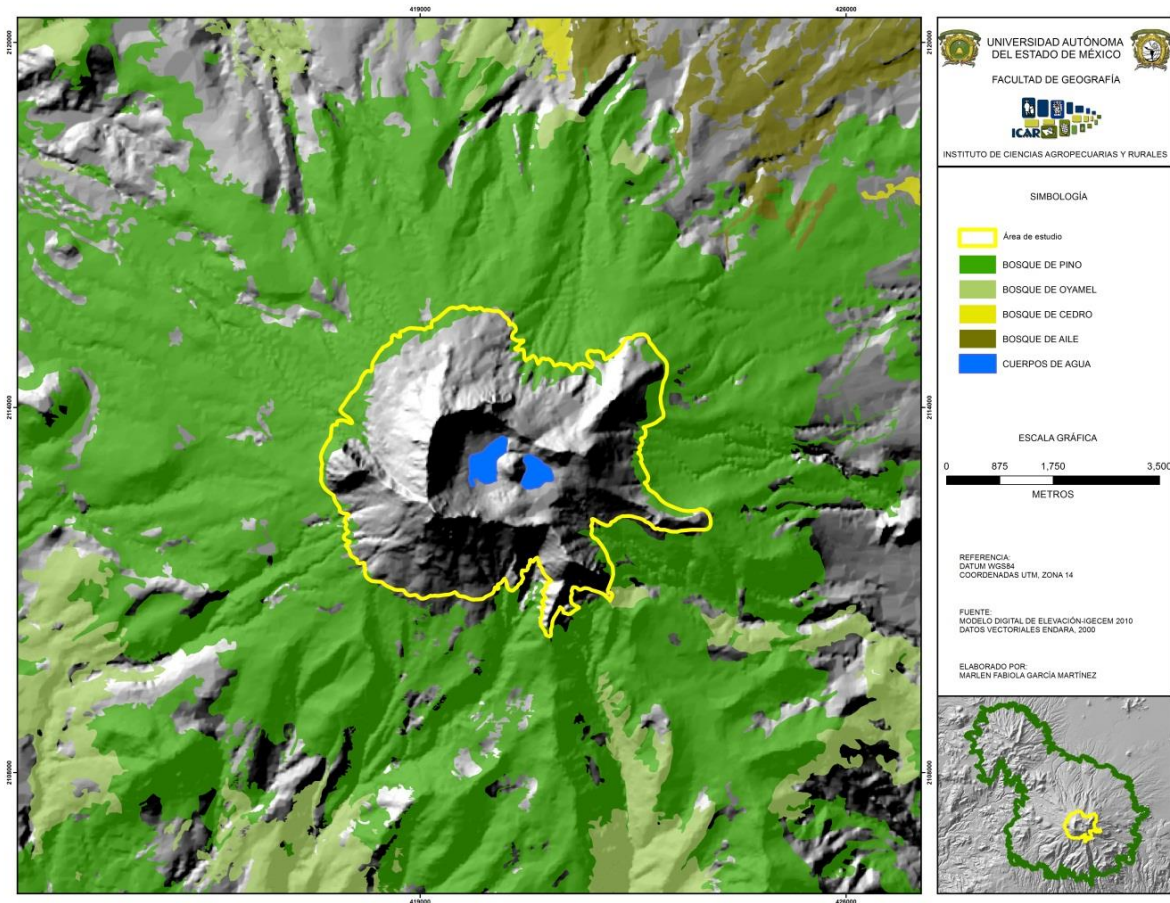


Figura 11. Mapa de ocupación de suelo del área de estudio dentro del PNNT. Fuente: propia con base en Franco *et al.*, 2006; INEGI, 2000.

3.7.1. Los principales tipos de vegetación para el área de estudio son los siguientes:

Pastizal Alpino: De los 4,000 a los 4,200 msnm se observa pastizal alto y denso. A partir de los 4,200 msnm el zacatonal se vuelve más bajo y disperso (figura 12).

Pastizales o Zacatonales Alpinos: son un tipo de vegetación donde predominan pastos amacollados de aproximadamente un metro de altura. En los pastizales alpinos, existen muchas especies de plantas herbáceas y rastreras que se desarrollan por lo general al pie de los macollos de pasto. En el Nevado de Toluca estos zacatonales se extienden a partir de los 4,000 msnm en todas las laderas,

llegando hasta los 4,400 msnm, sus especies dominantes son básicamente pastos amacollados.



Figura 12. Zacatonal alpino en el cráter del PNNT. Fuente: Endara, 2012.

Páramo de altura: En otras zonas donde predominan los materiales rocosos de las partes más altas e inaccesibles del volcán, existe una amplia variedad de líquenes crustáceos y musgos de diferentes especies, con diversas formas y coloraciones. Ese también es el caso de algunas comunidades azonales fuera del cráter, que poseen especies características de las crestas y picos, mismas que se pueden observar a altitudes menores sobre los ríos de rocas en las laderas NE y S del Nevado, como parte de los procesos de colonización y estabilización de estas grandes corrientes de rocas. A partir de los 4,400 hasta los 4,500 msnm o más, en los picos y crestas que coronan la cima del volcán, existen comunidades formadas principalmente por líquenes foliosos (figura 13).



Figura 13. Páramo de altura en el PNNT. Fuente: Endara, 2012.

Bosque de pino monoespecífico de Pinus hartwegii. Se encuentra en todos los flancos a partir de los 3,500 msnm y hasta el límite superior de la vegetación alpina. Es el bosque con mayor población de pinos a mayor altitud del mundo, con árboles de entre 20 y 30 m de largo. El bosque de *Pinus hartwegii* se desarrolla como piso altitudinal bien definido dentro del parque entre los 3,500 y los 4,000 msnm en colindancia con los pastizales alpinos, al igual de lo que sucede en las grandes sierras y estratovolcanes del centro de México, en donde esta vegetación representa el límite de la vegetación arbórea (figura 14).

Este tipo de bosque adaptado a condiciones de mayor altitud y menor temperatura, fisonómicamente es una comunidad abierta y baja con árboles espaciados entre sí, cuyo estrato arbóreo está dominado por *Pinus hartwegii*, el cual muestra una disminución en su altura y fuste conforme se acerca a su límite superior, influyendo en las variaciones de talla además de la temperatura o precipitación, las condiciones de pedregosidad del suelo o la exposición de las laderas, pues su densidad aumenta al interior de las cañadas y barrancas de los principales arroyos y disminuye gradualmente en las zonas expuestas al sol o a la acción de los vientos dominantes.



Figura 14. Bosques monoespecíficos de *Pinus hartwegii* en el PNNT. Fuente: Franco, 2007.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

La metodología propuesta en este trabajo consta de dos etapas (figura 15):

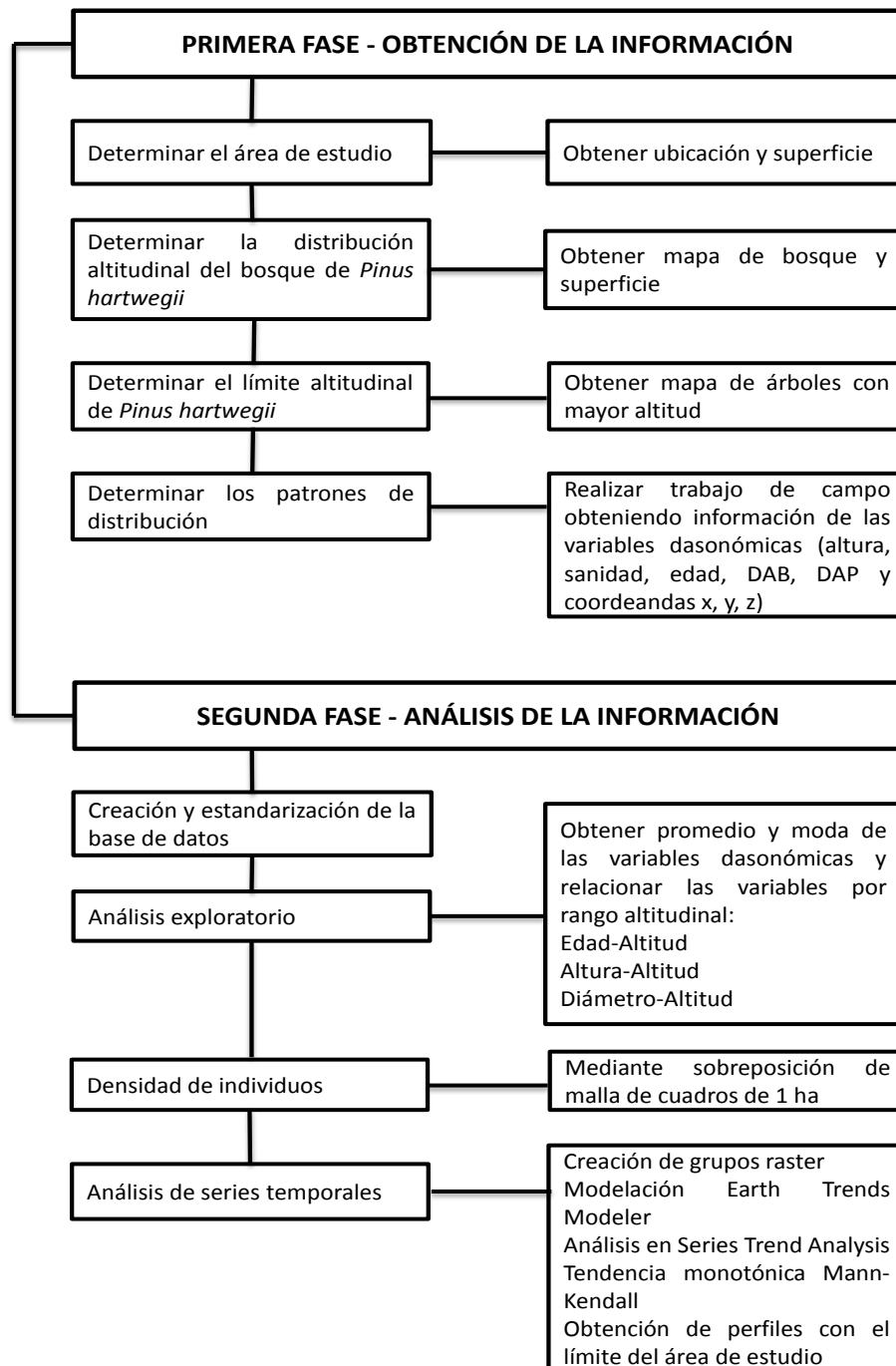


Figura 15. Metodología.

4.1. Área de estudio

El área de estudio está constituida por árboles de *Pinus hartwegii* que se encuentran delimitados por las cotas 4,000 y 4,400 msnm en el Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT), que abarca una superficie aproximada de 2,080 ha, con el fin de cumplir con los objetivos del presente trabajo de investigación se desarrolló trabajo de gabinete fortalecido con el trabajo de campo (figura 16).



Figura 16. Área de estudio. Fuente: Endara, 2012.

4.2. Distribución altitudinal del bosque de *Pinus hartwegii* (> 4,000 msnm)

Para la determinación del límite altitudinal del bosque de *Pinus hartwegii* (figura 17) en primera instancia de Endara (2012) se adquirió la fusión de una imagen de satélite, la cual comprende dos imágenes del sensor SPOT 5 del año 2010, con una resolución espacial de 10 y 5 m respectivamente; con lo cual se procedió a realizar el análisis visual de la misma.



Figura 17. Bosques ubicados por encima de la cota 4,000 msnm en el PNNT. Fuente: Endara, 2012.

Entendiendo una imagen de satélite como la representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial (INEGI, 2011). El satélite Spot, tiene a bordo el sensor ARV (Alta Resolución Visible) que tiene dos modos de funcionamiento en el espectro visible e infrarrojo cercano: un modo pancromático (en blanco y negro, con una resolución espacial de 10 metros) correspondiente a una observación sobre una amplia banda espectral y un modo multibanda (en color, con una resolución espacial de 20 metros) correspondiente a una observación sobre tres bandas espectrales más anchas.

El uso de imágenes de satélite tiene muchas aplicaciones en diversas disciplinas como: Geografía, geología, ecología, forestal, hidrología, etc. Se les suele utilizar en temas agrícolas, forestales, medio ambiente y recursos naturales, entre otros (INEGI, 2011).

Tradicionalmente se ha dividido el análisis de imágenes de satélite en dos fases, un análisis visual y un análisis digital, para la presente investigación se consideran las técnicas de análisis visual, que se caracterizan por suponer tan solo una modificación de la paleta de colores sin alterar la matriz de datos; aunque existen otros tipos de técnicas como el filtrado en las que existe una modificación de la imagen (FII s/f).

La interpretación de imágenes se realiza mediante un conjunto de técnicas destinadas a detectar, delinear e identificar objetos y/o fenómenos en una imagen



e interpretar su significado. El análisis visual de imágenes implica un conocimiento previo de la zona existente en la imagen (Fernández-Copper y Herrero s/f).

Dado que el color natural ofrece poco contraste, se puede utilizar el falso color compuesto.

Combinación en color natural RGB-321, bandas-321: constituye la combinación más próxima a la percepción de la tierra con nuestros ojos desde el espacio, de ahí el nombre de color verdadero donde: el azul oscuro indica aguas profundas, el azul claro indica aguas de media profundidad, la vegetación se muestra en tonalidades verdes, el suelo aparece con tonos marrones y tostados, el suelo desnudo y la roca aparecen en tonos amarillentos y plateados.

Combinación en falso color: se puede utilizar cualquier otra información entre bandas dependiendo el tipo de estudio, este conocimiento previo implica la ubicación de la imagen en cierto contexto influenciado por el tipo de análisis que se pretende realizar. El conocimiento previo se realiza mediante el trabajo de campo “*inspección in situ*” ya que se considera la mejor manera de conocer la zona de estudio, que consiste en el recorrido de la zona por presencia directa en el territorio considerado (Fernández-Copper y Herrero s/f).

Para realizar una nueva combinación de colores en ARCGIS 10 procedemos de la siguiente forma: damos clic derecho sobre la composición y elegimos *Properties*, (figura 18).

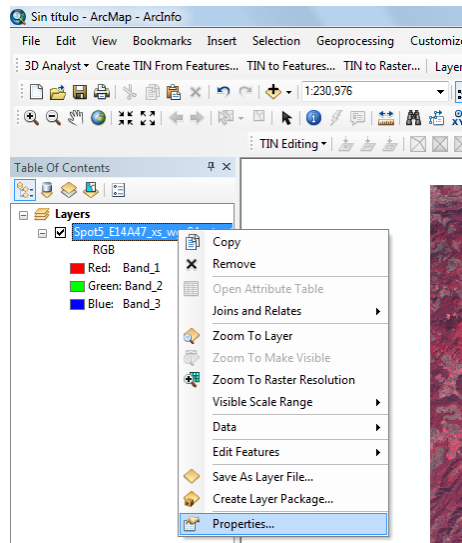


Figura 18. Procedimiento composición RGB.

Por defecto aparece la composición RGB 123 (figura 19):

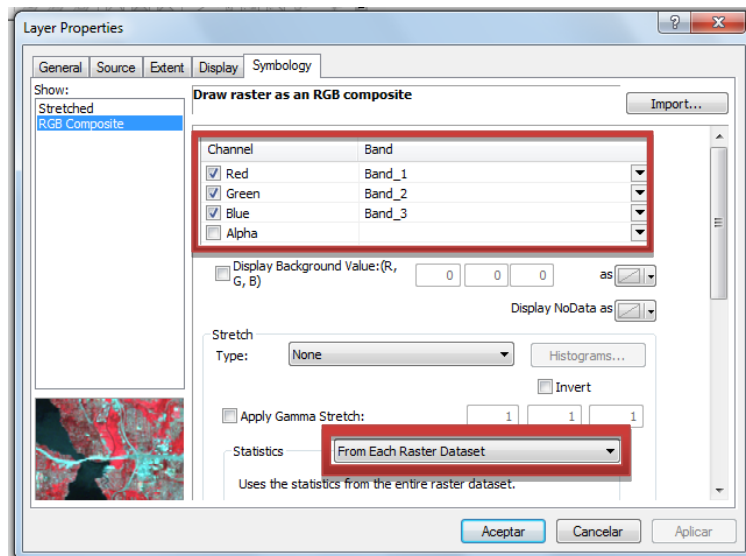


Figura 19. Procedimiento de la composición RGB.

Debemos cuadrar algunas propiedades para apreciar con mayor claridad el contraste de la composición realizada, como por ejemplo en este caso, en el campo *Statistics* se seleccionó la opción *From Each Raster Dataset* para establecer el balance de color. Si queremos realizar una nueva combinación, simplemente damos clic en las pestañas resaltadas.

Dado que la extensión del área de estudio es relativamente pequeña, las dos combinaciones son óptimas para la identificación de la vegetación, por lo que se procedió a utilizar la combinación natural 213 y la combinación en falso color 321 y 342 utilizadas para formaciones forestales donde predominan las especies de coníferas, (figura 20).

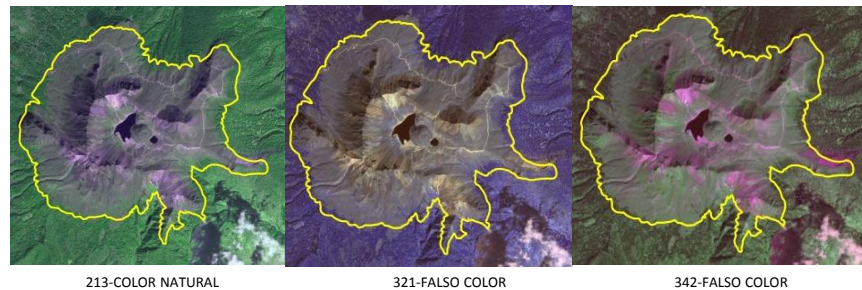


Figura 20. Combinaciones RGB.

Finalmente para determinar las zonas altitudinales de la especie se digitalizaron las áreas de *pinus hartwegii* establecidas por encima de la cota 4,000 lo que permitió calcular la superficie en hectáreas.

4.3. Determinación del límite altitudinal de *Pinus hartwegii*

Una vez realizada la inspección “*in situ*” del área de estudio, se procedió a realizar muestreos dirigidos a las manchas de arbolado juvenil (anexo N° 1) ubicados por encima de los límites del bosque monoespecífico determinado anteriormente, los datos de altitud se registraron en GPS para cada árbol, con lo cual se determinó el límite altitudinal de la especie, es decir, las mayores altitudes en las que se encontró establecido el *pinus hartwegii* (figura 21).



Figura 21. Manchas de arbolado juvenil por encima de los 4,000 msnm en el PNNT. Fuente: Endara, 2012.

4.4. Determinación de los patrones de distribución del arbolado juvenil establecido en altitudes mayores a 4,000 msnm.

Una vez identificadas las zonas de interés sobre la imagen de satélite, se procedió a levantar la información en campo, a través de un muestreo no probabilístico “muestreo dirigido” que consiste en seleccionar las unidades de población según el juicio de los investigadores, dado que las unidades seleccionadas gozan de representatividad (Mostacedo y Fredericksen, 2000).

Estos muestreos dirigidos fueron en las poblaciones de *P. hartwegii* ubicadas por encima de la cota establecida (figura 22) y, que estuvieran representadas por pequeñas manchas de arbolado juvenil; donde se levantó un inventario para todos los individuos clasificándolos en: plántulas (< 30 cm de altura), brinzales (\geq 30 cm < a 1.5 m altura), latizales (\geq 1.5 m de altura < 2.5 cm de DAP) y fustales (\geq 2.5 cm de DAP).



Figura 22. Trabajo de campo-Inventario. Fuente: Trabajo de campo, 2012.

Las variables dasonómicas a medir fueron: altura, sanidad y edad para plántulas y brinzales; DAP (diámetro medido a la altura de pecho 1.3 m sobre la base del árbol), altura, sanidad y edad para latizales y fustales. Cabe mencionar que la edad fue estimada por el número de verticilos que presentaba el fuste (figura 23), considerando un periodo de emergencia de cinco años para el primer verticilo.



Figura 23. Estimación de la edad del arbolado mediante conteo de verticilos. Fuente: Trabajo de campo, 2012.

La altura de individuos mayores a tres metros, se obtuvo con la ayuda de un clinómetro (figura 24), utilizando el teorema de Pitágoras como ecuación de cálculo:

$$H = D(\tan \alpha) + A \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde:

H= altura del árbol

D= distancia entre el observador y la base del árbol

α = ángulo en grados

A= Altura del observador

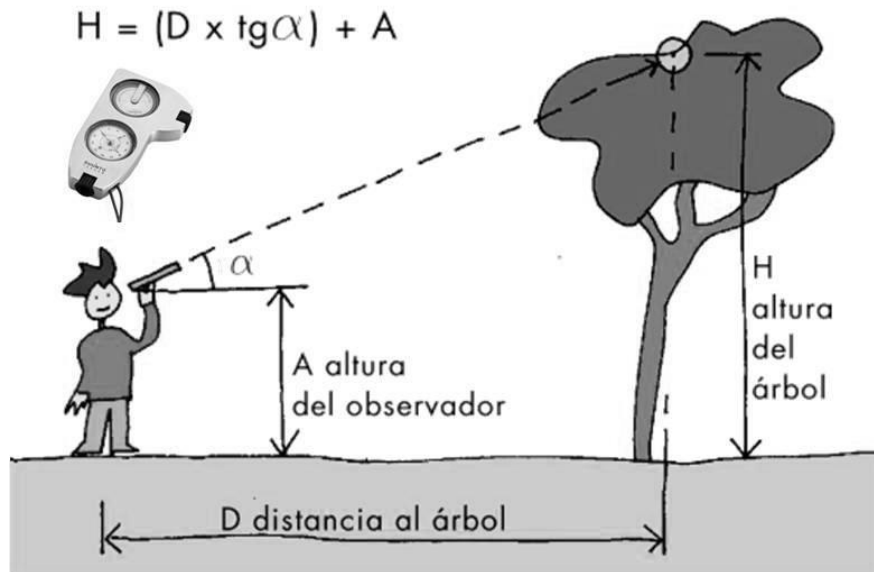


Figura 24. Cálculo de altura con clinómetro.

La sanidad se determinó mediante la observación directa, registrando daños por ataque de muérdago (*Arceuthobium globosum*, *A. vaginatum*) o descortezador (*Dendroctonus adjunctus*). Además se registraron daños por quema, rayos y ocoteo (figura 25).



Figura 25. Presencia de muérdago, descortezador e incendios. Fuente: Trabajo de campo, 2012.



Para cada individuo se registraron sus coordenadas geográficas así como su altitud sobre el nivel del mar (x, y, z), mediante el uso de un GPS GARMIN. El DAP para latizales y fustales o diámetro medido desde la base total (DBT) para las plántulas y brinzales se realizó con una cinta métrica. El formulario de colección de datos se muestra el anexo N° 2.

4.5. Análisis de la información

4.5.1. Creación y estandarización de la base de datos

En esta fase de la metodología se elaboró la base de datos correspondiente a la información obtenida en campo, en la cual se realizó el proceso de estandarización. Con el fin de relacionar cada una de las variables evaluadas se procedió a realizar el análisis exploratorio de las características de la población de *P. hartwegii*.

4.5.2. Análisis exploratorio

En el análisis exploratorio de la base de datos se obtuvo el promedio de las variables: altura, diámetro y edad, del arbolado establecido, además en la edad se obtuvo también la moda por rango altitudinal, para después relacionarlo con los datos de temperatura y precipitación históricos de la zona y así, poder evidenciar los nuevos patrones de distribución altitudinal como respuesta (estrategia de adaptación) al cambio climático global.

4.5.2.1. Edad-Altitud

En la base de datos se adapta la información de edad por rango altitudinal con el fin de obtener la edad que más se repite y el promedio por cada 100m, desde los 4,000 hasta los 4,400 msnm por medio de una gráfica y de ésta manera comprobar si existe la relación a mayor altitud menor edad.



4.5.2.2. Altura-Altitud

Dentro de esta relación se adapta la información de altura por rango altitudinal con el fin de obtener la altura que más se repite y el promedio por cada 100m, desde los 4,000 hasta los 4,400 msnm por medio de una gráfica y de ésta manera comprobar si existe la relación a mayor altitud menor altura.

4.5.2.3. Diámetro-Altitud

En esta relación se adapta la información de diámetro por rango altitudinal con el fin de obtener el diámetro que más se repite y el promedio por cada 100m, desde los 4,000 hasta los 4,400 msnm por medio de una gráfica y de ésta manera comprobar si existe la relación a mayor altitud menor diámetro.

4.5.3. Densidad de individuos

Para poder evaluar la densidad de una superficie irregular, se estableció una cuadrícula mediante la extensión de cuadros en Arc View, dicha extensión permite calibrar el tamaño de la cuadrícula de acuerdo a los requerimientos.

La densidad de los individuos se evaluó a partir de una malla de cuadros de una hectárea, en la cual se sobrepone al mapa de puntos de individuos georreferenciados y se estableció la relación de individuos por ha.

4.6. Análisis de series temporales

La base fundamental del presente trabajo de investigación es el análisis de las variaciones climáticas y los datos obtenidos en campo de *Pinus hartwegii*. En esta fase de la metodología se presenta el proceso que lleva a obtener los perfiles de series de tiempo en el SIG IDRISI.

4.6.1. Creación de grupos raster

Para la construcción de grupos raster de las variables climáticas (temperatura máxima, mínima y precipitación) para el periodo comprendido entre 1960-2010, se utilizó la información generada a partir del proyecto “Efectos de la variabilidad climática en el cultivo de maíz de temporal: análisis exploratorio en la cuenca alta del río Lerma (1960-2009)” de Díaz *et al.*, (2013).

4.6.2. Exploración de series de tiempo dentro del *Earth Trends Modeler*

Con todos los datos preprocesados de las variables temperatura y precipitación se continuó con la creación de series de tiempo, utilizando la *Earth Trends Modeler* (ETM) del Sistema de Información Geográfica Idrisi, en el cual se crearon los grupos raster (*.rgf) de cada variable, posteriormente dentro del módulo (*create / edit series time*) (figura 26), se transforman en archivos (*.tsf).

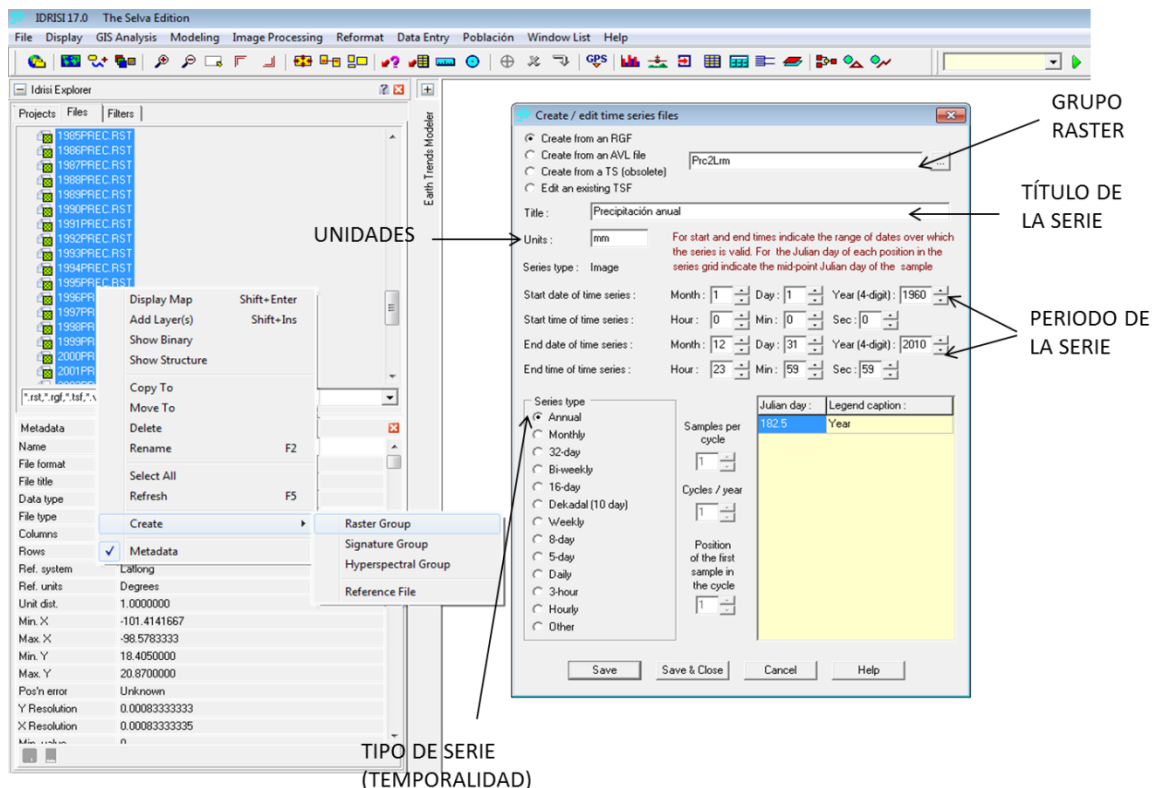


Figura 26. Módulo create / edit time series files. Fuente: propia, 2012.

Posteriormente se continuó con la visualización de las series de tiempo por medio de los cubos (figura 27), en los cuales se representa el espacio y el tiempo de las series.

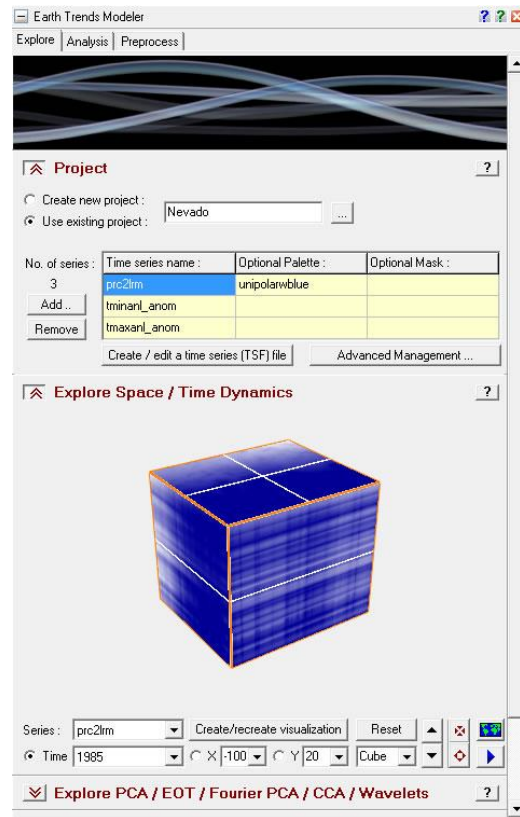


Figura 27. Earth Trends Modeler. Fuente: propia, 2012.

4.6.3. Análisis de series de tiempo en *Series Trend Analysis*

En este apartado se analizaron las series de las variables temperatura máxima y mínima y precipitación por separado, con el módulo de análisis de series de tendencias (*Series Trend Analysis*) (figura 28), donde se utilizó el método de tendencia monótonica (MK) que indica el grado creciente o decreciente de la serie y en donde se ordenan las imágenes de acuerdo al tiempo.



Figura 28. Earth Trends Modeler. Fuente: propia, 2012.

Para el análisis de resultados obtenidos se consideró la escala propuesta por Nájera (2011), que permite cuantificar la intensidad de relación que existe entre dos variables, en donde el parámetro oscila de -1 a +1 (ver tabla 1).

CATEGORÍA	ESCALA
AUMENTO SIGNIFICATIVO	1.0 a 0.6
AUMENTO MODERADO	0.6 a 0.2
ESTABLE	0.2 a -0.2
DECREMENTO MODERADO	-0.2 a -0.6
DECREMENTO SIGNIFICATIVO	-0.6 a -1.0

Tabla 1. Escala de análisis. Fuente: propia, 2011.

4.6.4. Obtención de perfiles con el límite del área de estudio

Finalmente se utilizó la exploración de perfiles (*Explore Temporal Profiles*) (figura 29), en este módulo se eligió la serie a analizar y la imagen vector del polígono de la cota 4,000 msnm, de esta manera se despliega la gráfica que permite observar el comportamiento de las variables utilizadas en todo el periodo, además de la línea de tendencia aplicando la técnica *Theil-Sen trend*.

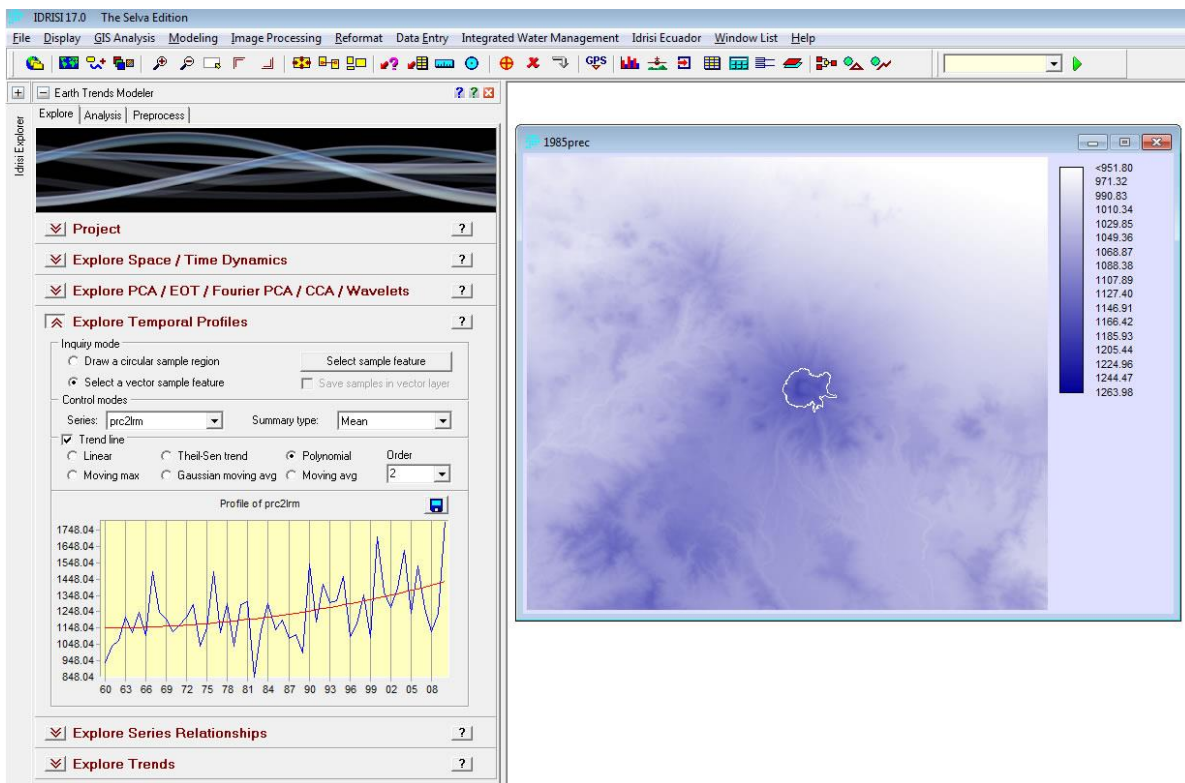


Figura 29. Explore *temporal profiles*. Fuente: propia, 2012.

La línea de tendencia *Theil-Sen trend* es recomendable para evaluar la tasa de cambio en una corta o ruidosa serie. Se calcula mediante la determinación de la pendiente entre todas las combinaciones de pares y luego se encuentra el valor de la mediana de acuerdo a la ecuación 1.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5.1. Distribución altitudinal del bosque de *Pinus hartwegii* (> 4,000 msnm)

El estudio identificó 167.5 ha (que representan el 0.84% de la superficie total del área de estudio) de bosque conformado por encima de los 4,000 msnm, distribuidos en torno al cráter (figura 30); por tanto, el bosque continuo encuentra su límite altitudinal: al norte (4,100), al sur (4,060), al este (4,080) y al oeste (4,100 msnm). Dicha distribución se atribuye a las zonas de barlovento y sotavento de una montaña; entendiendo como barlovento a la vertiente que está orientada en el sentido de los vientos dominantes y que por tanto, está expuesta a condiciones de mayor humedad, siendo el norte y oeste la zona de barlovento ya que existe mayor cantidad de vegetación; el sotavento por lo tanto, se considera una zona con menor humedad y en este caso representada al sur y al este.

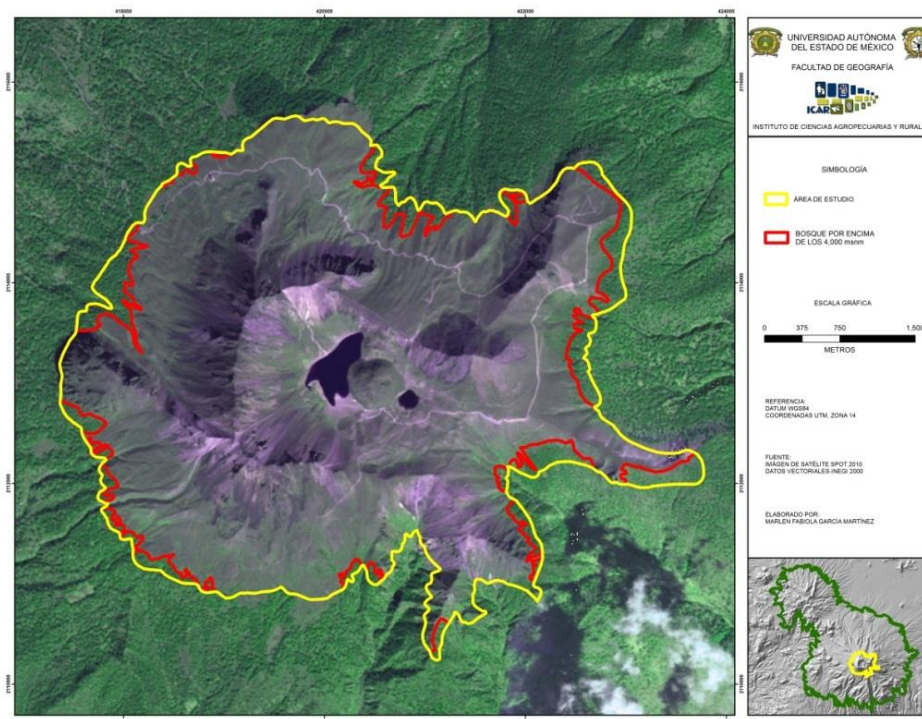


Figura 30. Bosques continuos en el PNNT. Fuente: propia con base en INEGI, 2000.

5.2. Límite altitudinal de *Pinus hartwegii*

Los muestreos dirigidos a manchas de arbolado juvenil ascendieron a 17.4 ha (figura 31), equivalentes al 17% del total de manchas ubicadas en gabinete (anexo N° 3).

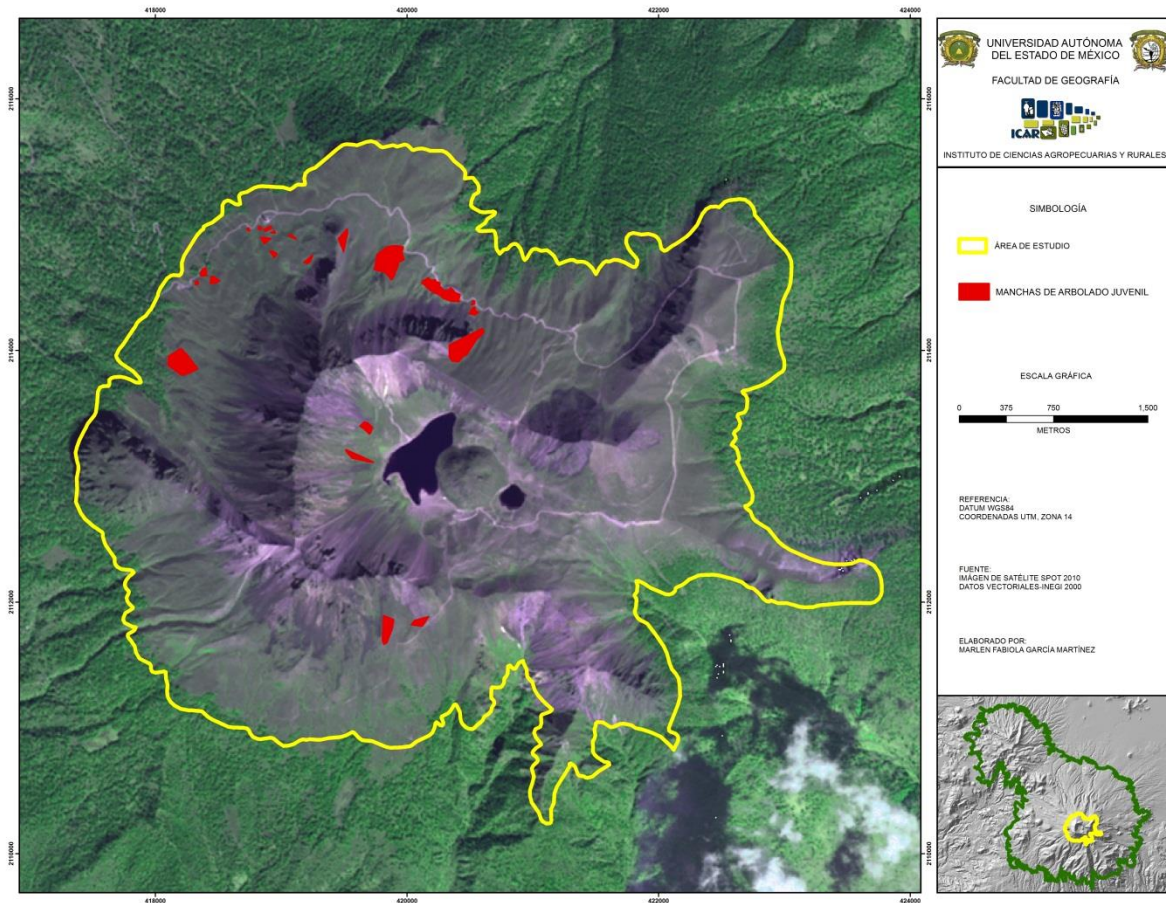


Figura 31. Sitios de muestro por encima de los 4,000 msnm en el PNNT. Fuente: propia con base en INEGI, 2000.

El muestreo realizado en las manchas de arbolado juvenil permitió identificar los árboles ubicados a mayor altitud en el PNNT, el primero se encuentra en la cara oeste de la Laguna del Sol a los 4,390 msnm, con una edad de 23 años, una altura de 1.5 m, diámetro de 4 cm y de categoría fustal; el segundo se ubica al norte del cráter a los 4,387 msnm, con una edad de 14 años, una altura de 1.2 m, diámetro de 6 cm y de categoría brinzal (figura 32).

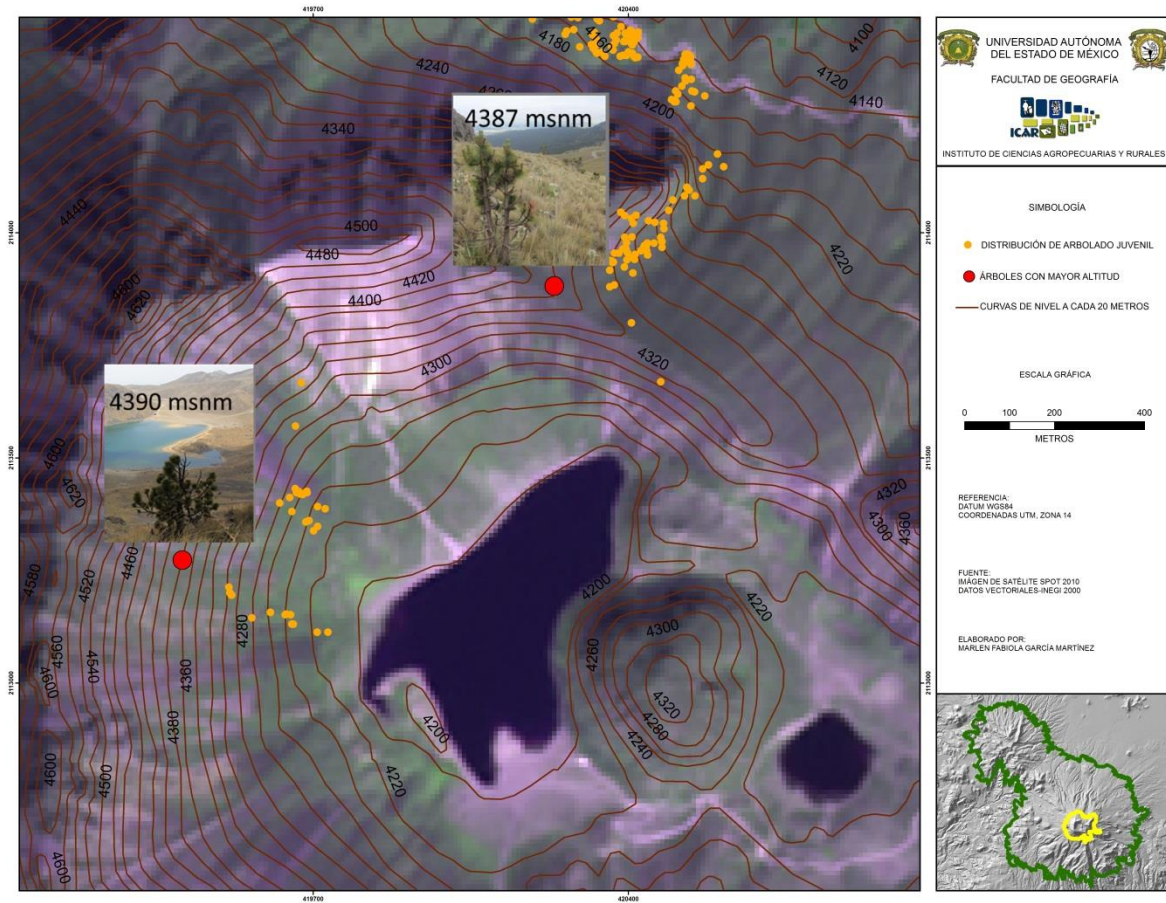


Figura 32. Árboles ubicados a mayor altitud en el PNNT. Fuente: propia con base en INEGI, 2000.

5.3. Patrones de distribución del arbolado juvenil

Obedeciendo la distribución de los bosques continuos establecidos por encima de los 4,000 msnm, las manchas de arbolado juvenil se concentran en su mayor parte en las caras norte y oeste del cráter (figura 33), distribuidas entre los 4,100 y 4,387 msnm. Esto sugiere que los individuos provienen de árboles semilleros ubicados en los límites de la vegetación arbórea.



Figura 33. Arbolado juvenil en la cara Norte y Oeste del cráter. Fuente: Trabajo de campo, 2012.

5.3.1. Condiciones geográficas que determinan los patrones de distribución

Como menciona Aulitzky (1963, 1984) las condiciones climáticas son de especial importancia en el entorno de la vegetación arbórea, ya que determinan en gran medida la distribución de la especie de árboles y otros tipos de vegetación de baja estatura; aunado a ello, existen otras condiciones que se deben considerar para el desarrollo de la especie de *Pinus hartwegii* por encima del límite de la vegetación como la altitud, la pendiente, la temperatura máxima y mínima, la precipitación, el tipo de suelo, la erosión y la ocupación del suelo.

Además se agregan restricciones ambientales como el frío, la sequía, baja disponibilidad de nutrientes, vientos tempestuosos, estrés climático, alta radiación solar, mayor presión atmosférica; las cuales cambian gradualmente con el aumento de altitud; a pesar de ello, la especie muestra una elevada tolerancia a



las condiciones extremas, ya que se han desarrollado por encima del límite vegetal sin mayores complicaciones.

Actualmente la especie de *Pinus hartwegii* se encuentra establecida en promedio entre los 3,500 y los 4,085 msnm, sin embargo el límite altitudinal se encuentra distribuido entre los 4,060 (al sur) y los 4,100 msnm (al norte) y, considerando el aumento de la temperatura dentro del área de estudio y las condiciones geográficas antes mencionadas, se supone un aumento de 40 metros en el límite de la vegetación arbórea.

Sin embargo, como menciona Peters *et al.*, (1990) dado que las cumbres de las montañas son más pequeñas que las bases, a medida que las especies se dirijan hacia zonas con mayores altitudes, debido al aumento de la temperatura, ocuparán menores superficies. Tal es el caso en el PNNT, en donde considerando un aumento de temperatura y del límite altitudinal en 40 m, se supone una disminución de la masa forestal hasta en un 8.76% ya que, la superficie cambiaría de los 3,500-4,080 a los 3,540-4120 msnm.

El cambio climático causará un cambio en la distribución de los ecosistemas y las especies. Estudios biogeográficos que predicen cambios en la distribución de las zonas de vida permiten evaluar impactos potenciales de cambio climático sobre los ecosistemas. Sin embargo, los estudios de vulnerabilidad deben ser asociados con estimaciones de la capacidad adaptativa de los ecosistemas (Locatelli and Imbach, 2008).

Los impactos del cambio climático sobre los ecosistemas van a tener consecuencias sobre la biodiversidad; por ejemplo, en los bosques de alta montaña del Parque Nacional Nevado de Toluca, un porcentaje considerable respecto de su superficie de las especies podría desaparecer, de acuerdo con Locatelli (2008) los cambios además tendrán consecuencias sobre el secuestro de carbono en los ecosistemas, esa perspectiva es tema de mucha preocupación,



debido a que la degradación de ecosistemas y la emisión de carbono a la atmósfera refuerzan al cambio climático.

Locatelli *et al.*, 2008 proponen las medidas técnicas para adaptación de ecosistemas:

-Medidas que buscan amortiguar las perturbaciones, aumentando la resistencia y la resiliencia del ecosistema frente a los cambios:

Prevenir incendios (corta fuegos)

Manejo de especies invasivas y plagas (remoción de invasivas, prevención de migración de invasivas).

Manejar y restaurar el ecosistema después de una perturbación (revegetación, restauración).

Monitoreo, conservación *ex situ*.

-Medidas para facilitar la evolución del ecosistema hacia un nuevo estado:

Aumentar la conectividad del paisaje (corredores, zonas de amortiguamiento)

Conservar zonas de alta biodiversidad y ecosistemas en un gradiente de condiciones ambientales.

Conservar la diversidad genética en ecosistemas naturales.

Modificar el manejo de ecosistemas plantados o aprovechados: aprovechamiento selectivo, selección de especies y genotipos, diversidad especies plantadas y cosechas.

Mantenimiento de regímenes naturales de perturbación.

Facilitar la migración.

La migración de las especies es una respuesta potencial por parte de los ecosistemas frente al cambio climático. La capacidad de migración depende de las características de las especies y del nivel de fragmentación de los paisajes a través de los cuales, tendrán que dispersarse. La implementación de corredores biológicos entre áreas naturales protegidas puede facilitar la adaptación de éstas áreas al cambio climático (Locatelli and Imbach, 2008). Cabe mencionar que la distribución futura de los ecosistemas depende en parte de la capacidad de migración de las especies.

Por lo anterior, es lógico asumir que la especie de *Pinus hartwegii* reducirá su superficie debido a la migración natural (proceso lento), sin embargo, no se menciona el tiempo para que esto suceda, asimismo se puede ayudar a la especie a través de la migración asistida para una aclimatación más rápida.

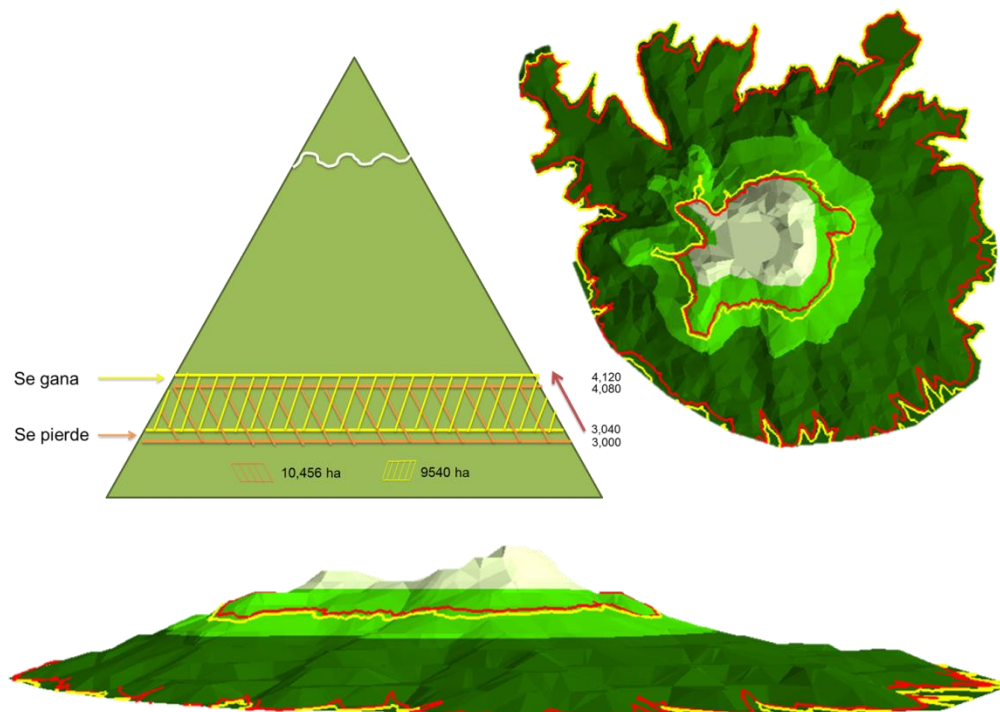


Figura 34. Redistribución de especies en el PNNT. Fuente: propia con base en INEGI, 2000.



5.4. Análisis exploratorio: relación de variables dasonómicas con respecto a la distribución altitudinal

El análisis de los resultados muestra que la edad promedio de las manchas de arbolado es de 20 años, siendo la edad que más se repite 13 años. En la variable altura tanto el promedio como la moda fueron de 3 m., finalmente para el diámetro el promedio es de 9.8 cm y la moda de 5 cm.

Agrupando a los individuos por rango altitudinal se obtuvieron los siguientes resultados:

RANGO (msnm)	EDAD (años)	
	PROMEDIO	MODA
4,000-4,100	20	6
4,100-4,200	19	9
4,200-4,300	19	13
< 4,300	21	14

Tabla 2. Edad por rango altitudinal. Fuente: con base en datos de campo, 2012.

5.4.1. EDAD-ALTITUD

Siendo los árboles los seres vivos que puede vivir mayor cantidad de años, resultó necesario identificar las edades por rango altitudinal, ya que, el conocimiento de la edad biológica de un árbol nos ayuda a percibir mejor sus necesidades. La edad varía en relación a la altitud en la que están distribuidos los individuos (figuras 35 y 36), ya que, las edades para el área de estudio están representadas en promedio entre los 19 y 21 años, cabe mencionar que la edad mínima para los individuos muestreados fue de 5 años y la máxima fue aproximadamente de 60 años, los

árboles con mayor edad se ubican cerca del bosque continuo; marcando una clara diferencia con respecto a la edad promedio del bosque establecido por debajo del límite de la vegetación que sin duda es mucho mayor.

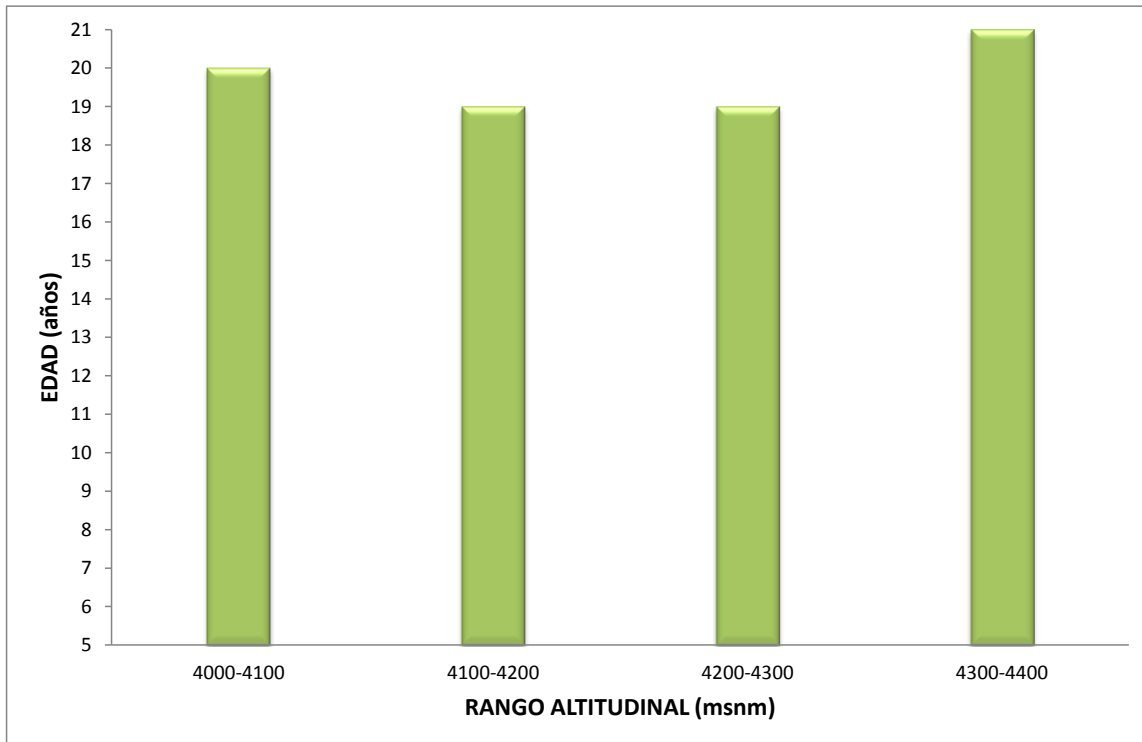


Figura 35. Distribución del promedio de edades por rango altitudinal. Fuente: propia con base en datos de campo, 2012.



Figura 36. Relación edad-altitud. Fuente: Trabajo de campo, 2012.



5.4.2. ALTURA-ALTITUD

La altura de los árboles también varía de acuerdo a la altitud en la que se desarrollan los individuos, en este caso; la relación altura-altitud es negativa (figuras 37 y 38), es decir, a mayor altitud menor altura de los árboles, como se observa en el gráfico la altura va en decremento con respecto a la altitud y, cabe mencionar que por encima de los 4,300 msnm la altura máxima registrada para los fustales fue de 4.5 metros.

A excepción de situaciones extremas que pueden ocurrir a cualquier altitud, las bajas temperaturas, la estación de crecimiento más corta, además de los fuertes vientos a los que están sometidos son los mayores factores limitantes para el crecimiento de los árboles.

En esta zona se pueden encontrar árboles de baja estatura con un gran número de años a diferencia del bosque continuo, en donde normalmente los árboles de mayor altura son los que tienen más edad, por ejemplo, dentro del área de estudio existen árboles que miden 2.40 m y tienen 32 años.

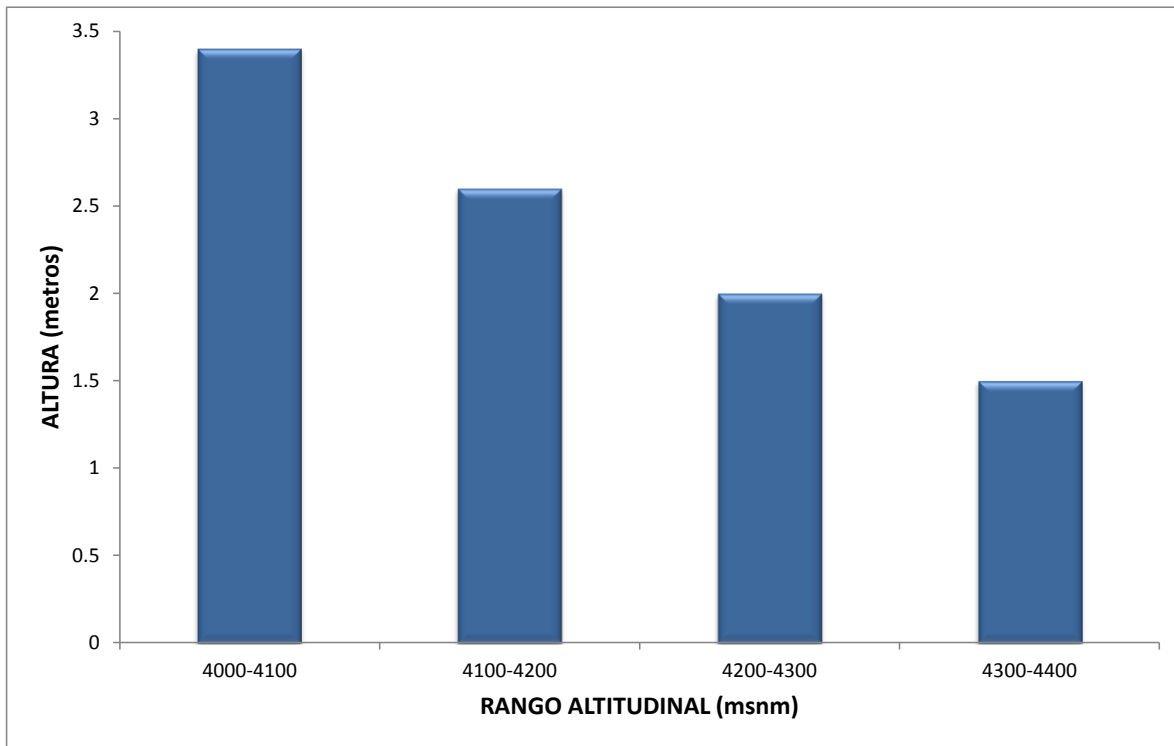


Figura 37. Distribución de alturas por rango altitudinal. Fuente: propia con base en datos de campo, 2012.



Figura 38. Relación altura-altitud. Fuente: Trabajo de campo, 2012.

5.4.3. DIÁMETRO-ALTITUD

Al igual que la altura, la relación diámetro altitud es negativa (figura 39), con lo que se puede demostrar que a mayor altitud los ritmos de crecimiento de los árboles se reducen considerablemente, retomando al árbol que mide 2.40 m, se registró

con un diámetro de 12 cm, lo cual indica que, a mayores altitudes existen individuos que pueden tener poca altura, gran número de años y un diámetro muy ancho o muy pequeño (figura 40) en comparación con los individuos establecidos por debajo del límite vegetal (figura 41), con lo que se evidencia que en la zona de estudio los factores antes mencionados si influyen en el crecimiento, desarrollo y distribución de los árboles a mayores altitudes, los cuales presentan estas estrategias de adaptación (figura 42).

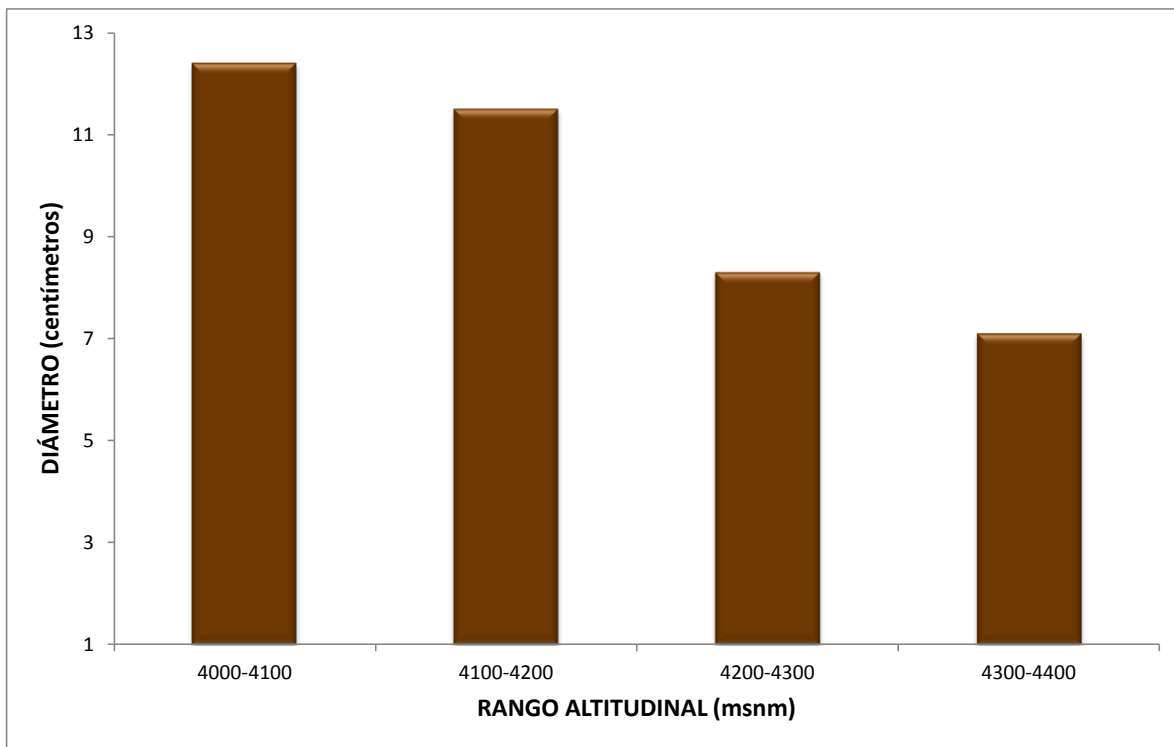


Figura 39. Distribución de diámetros por rango altitudinal. Fuente: propia con base en datos de campo, 2012.



Figura 40. Adaptación del *Pinus hartwegii*. Fuente: Trabajo de campo, 2012.



Figura 41. Establecimiento por debajo del límite vegetal. Fuente: Trabajo de campo, 2012.



Figura 42. Estrategias de adaptación. Fuente: Trabajo de campo, 2012.

5.4.4. Densidad de individuos

Mediante la malla de cuadros sobrepuesta en el mapa de distribución de individuos de *Pinus hartwegii* (figura 43) se obtuvo la densidad de individuos (8.1 por ha), (figura 44).



Figura 43. Distribución de *Pinus hartwegii*. Fuente: Trabajo de campo, 2012.

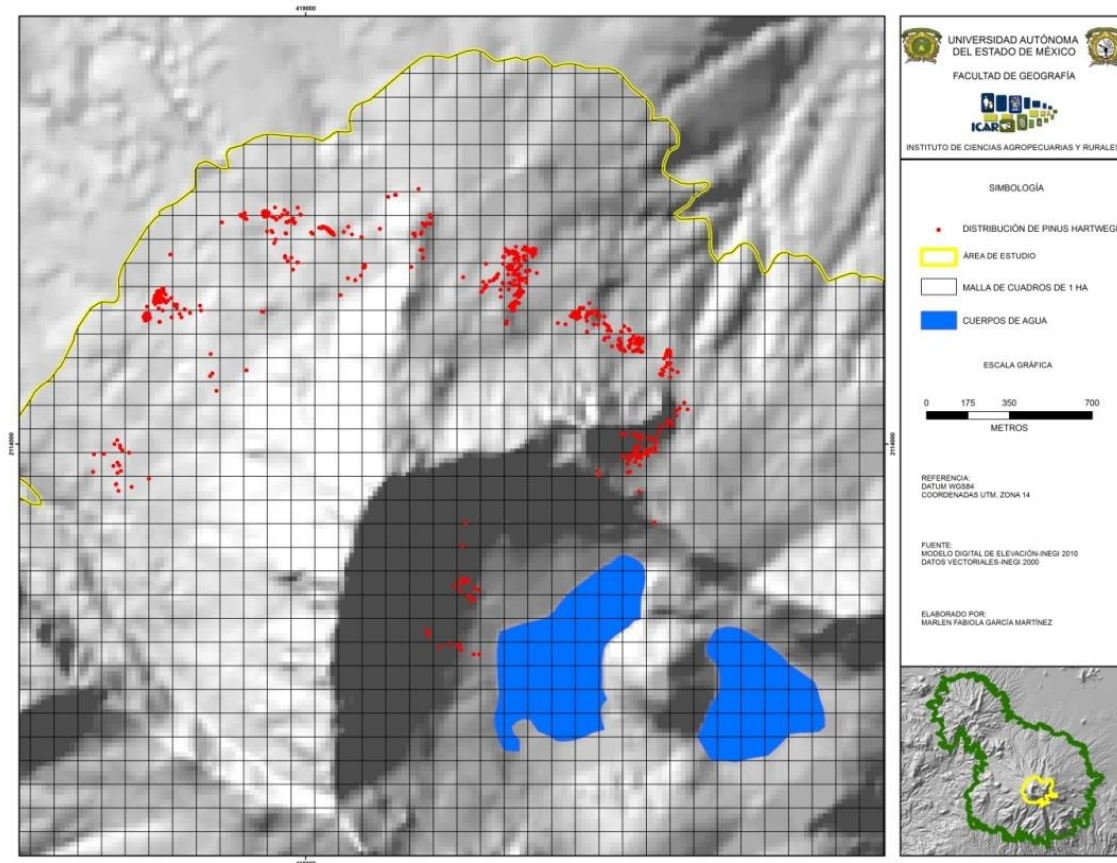


Figura 44. Densidad de individuos de *Pinus hartwegii*. Fuente: propia con base en INEGI, 2000.

5.4.5. Comportamiento histórico de las variables climáticas

Es fundamental analizar las variaciones anuales de las variables climáticas así como los datos obtenidos en campo; para lo cual se utilizaron los datos de la temperatura máxima y mínima y, precipitación de los últimos 50 años dentro del área de estudio; y se obtuvieron los promedios anuales.

En la figura 45 se muestra el comportamiento histórico anual de la precipitación, donde se observa un aumento para el área de estudio de acuerdo a la línea de tendencia polinomial de 2º grado, que va de 1109 a 1520 mm, es decir, durante el periodo comprendido entre 1960-2010, la precipitación ha incrementado en el orden de 411 mm, que a su vez, representa una tasa de incremento anual de 8.05 mm para los últimos 50 años.

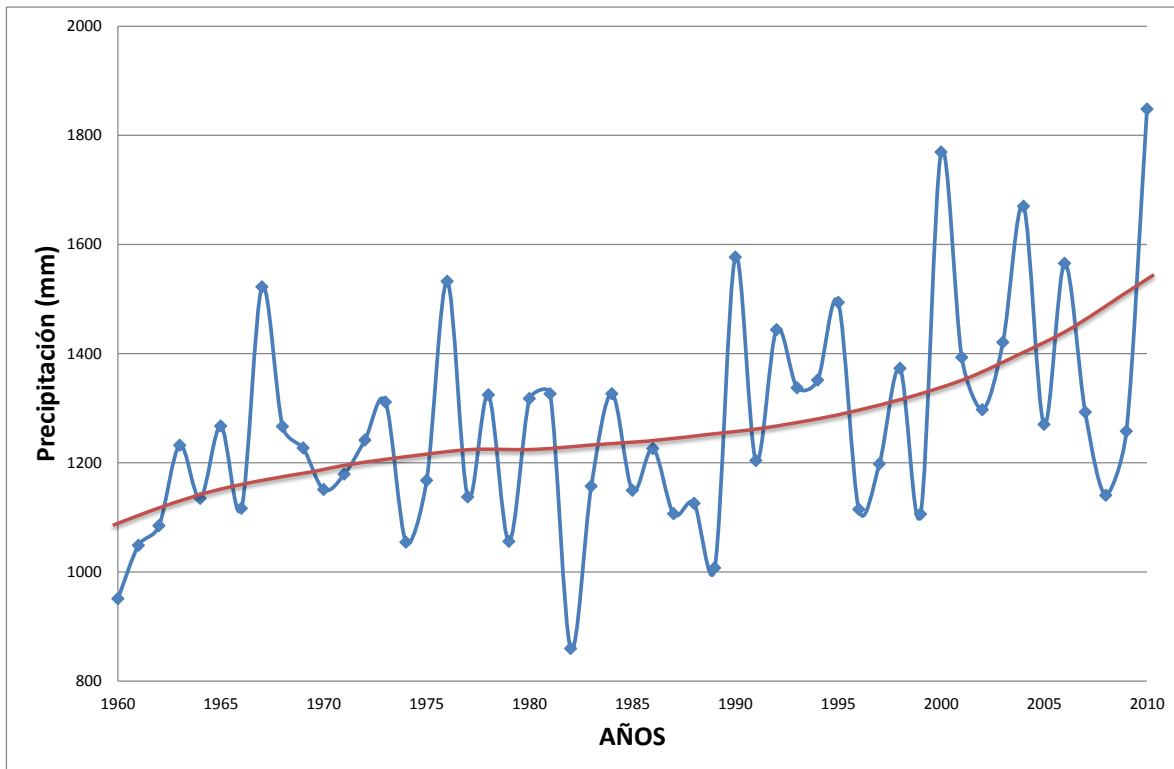


Figura 45. Precipitación promedio anual 1960-2010. Fuente: propia con base en Díaz *et al.*, 2013.

En la figura 46 se muestra el comportamiento histórico anual de la temperatura máxima, donde se observa un aumento para el área de estudio de acuerdo a la línea de tendencia polinomial de 2º grado, que va de 12°C a 13.5°C, es decir, para el periodo comprendido entre 1960-2010 la temperatura ha incrementado 1.5°C, que a su vez representa una tasa de incremento anual de 0.02°C para los últimos 50 años.

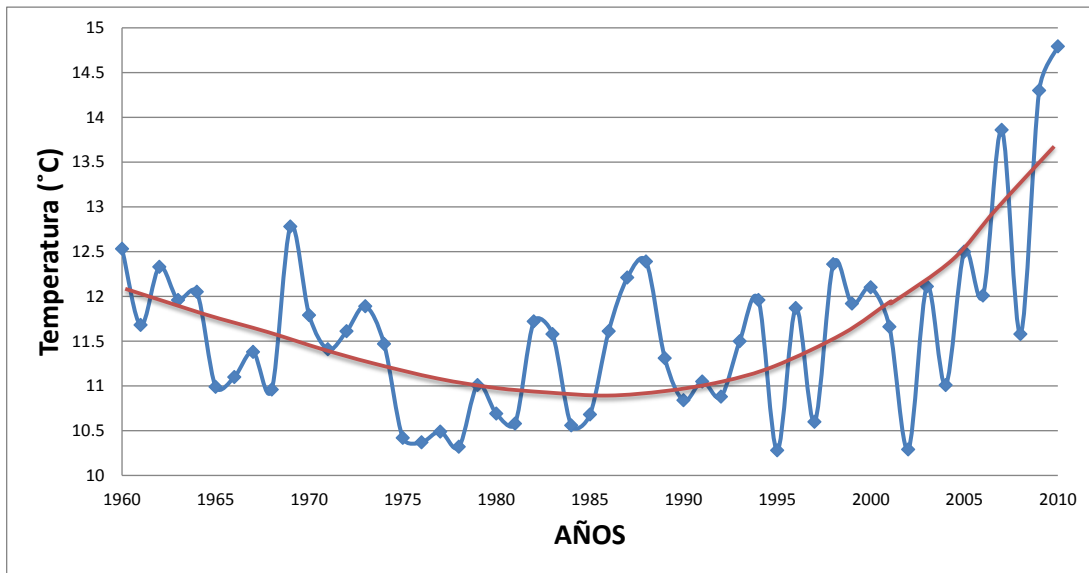


Figura 46. Temperatura máxima promedio anual 1960-2010. Fuente: propia con base en Díaz *et al.*, 2013.

En la figura 47 se muestra el comportamiento histórico anual de la temperatura mínima, donde se observa un aumento para el área de estudio de acuerdo a la línea de tendencia polinomial de 2º grado, que va de -2.3°C a 0.52°C , es decir, para el periodo comprendido entre 1960-2010 la temperatura ha incrementado 1.8°C , que a su vez representa una tasa de incremento anual de 0.04°C para los últimos 50 años.

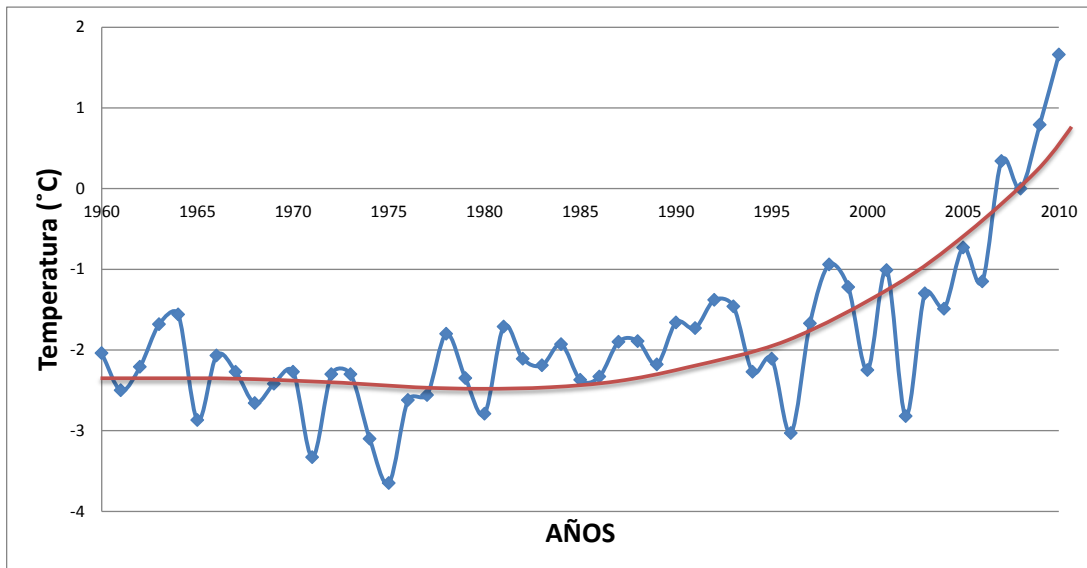


Figura 47. Temperatura mínima promedio anual 1960-2010. Fuente: propia con base en Díaz *et al.*, 2013.

5.5. Análisis de perfiles de las variables climáticas

5.5.1. Comportamiento climático histórico y el establecimiento de arbolado juvenil

De un total de 744 individuos ubicados en un eje de coordenadas (x,y) y altitud, se pudo evidenciar que el 60% de éstos, se estableció a partir de 1992, año en el que la precipitación ascendió a 1443 mm y donde la curva de tendencia polinomial muestra que el incremento de la precipitación es más pronunciada, lo que sugiere cierta adaptación positiva de la especie al nuevo comportamiento de esta variable climática (figura 48).

Lo anterior implica que las tendencias de las precipitaciones medias anuales incrementaron de 1109 mm/año en 1960 a 1520 mm/año en 2010, a razón de 8.05 mm/año. Esto indica que en los bosques de alta montaña del Parque Nacional Nevado de Toluca hay cada vez más humedad, lo que no concuerda con las zonas de alta montaña de Monte Tláloc, ya que la precipitación en los últimos 50 años representa una tendencia decreciente (Gómez *et al.*, 2012). Esto sugiere que la variable de precipitación es mucho menos predecible, bajo un escenario de



cambio climático global, las temperaturas se están incrementando, pero las variaciones de las medias anuales de precipitación parecen obedecer a fenómenos locales.

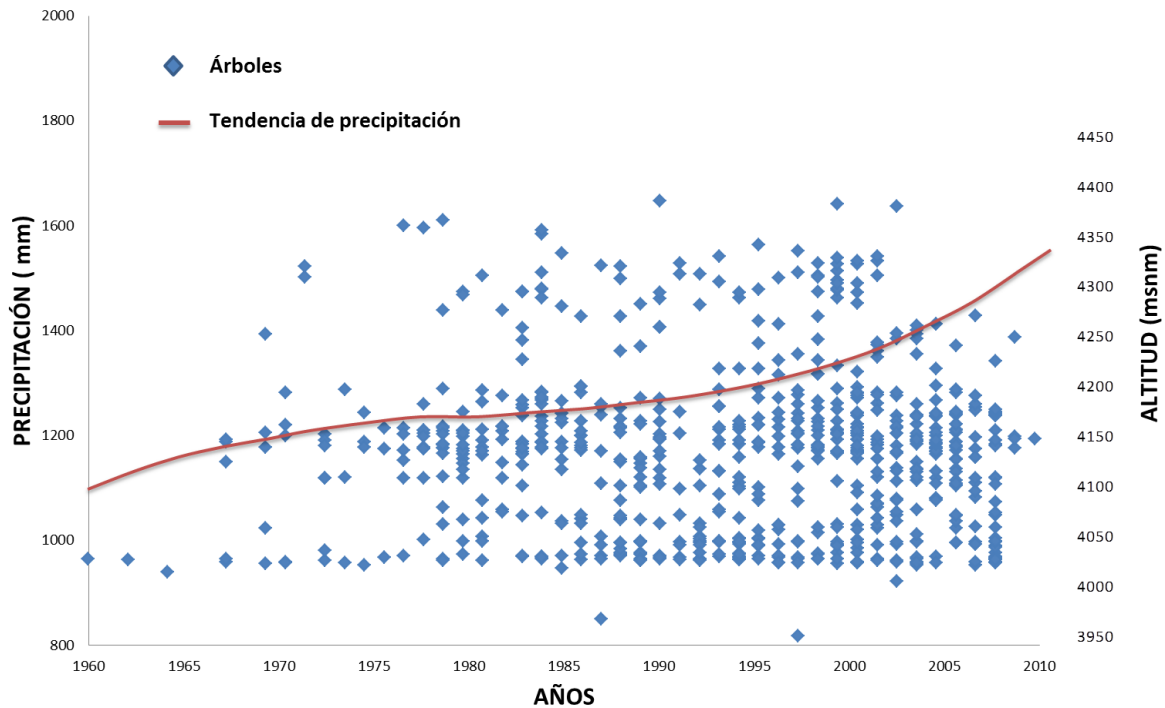


Figura 48. Establecimiento de arbolado y el incremento histórico de la precipitación. Fuente: propia con base en datos de campo, 2012.

De la misma manera, la T^0 ha sufrido un incremento considerable en el área de estudio, tanto en promedios anuales de máximas y mínimas. Con respecto a la tendencia de la temperatura máxima (figura 49) se observa un incremento en la media anual de $0.2\text{ }^{\circ}\text{C/año}$ y, considerando que la variable temperatura es el factor de mayor importancia en cuanto al establecimiento de la vegetación, es innegable que influye en el establecimiento de los individuos de *Pinus hartwegii* a partir del año 1995.

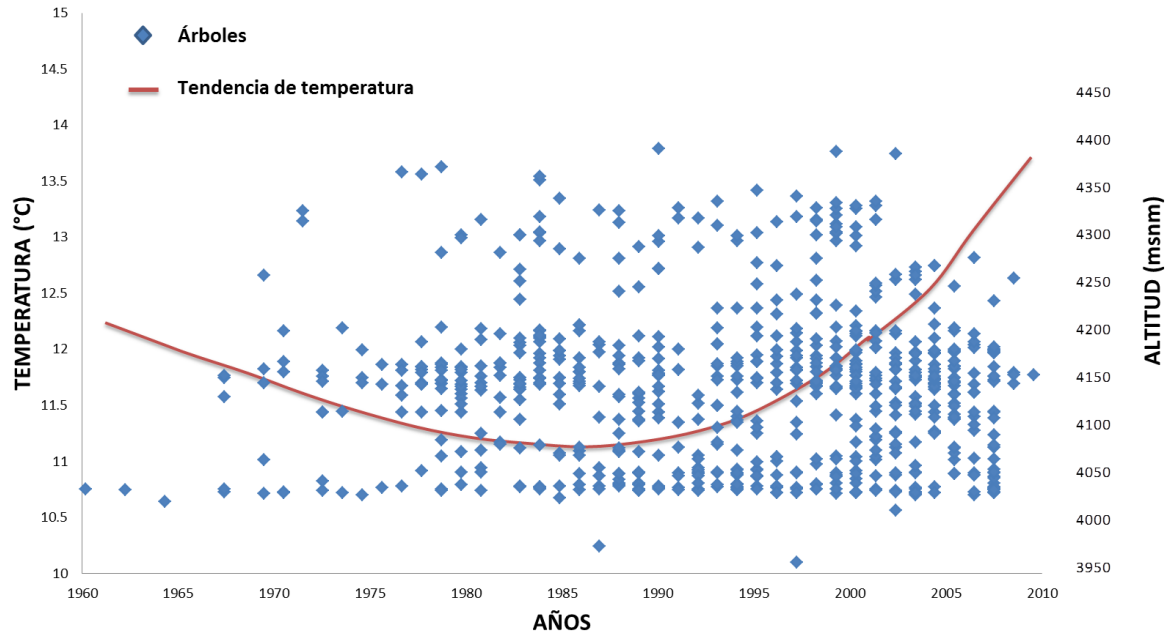


Figura 49. Establecimiento de arbolado y el incremento histórico de la temperatura máxima. Fuente: propia con base en datos de campo 2012.

En cuanto a la tendencia de la temperatura mínima (figura 50) se observa un mayor incremento que con respecto a la máxima, con un $0.04\text{ }^{\circ}\text{C/año}$ y, considerando que la variable temperatura es el factor de mayor importancia en cuanto al establecimiento de la vegetación, es innegable que influye en el establecimiento de los individuos de *pinus hartwegii* a partir del año 1995, en dónde se observa la línea en aumento.

De acuerdo al año de establecimiento de los árboles por rango altitudinal (promedio y moda), se deben considerar los años de 1989 ($-2.28\text{ }^{\circ}\text{C}$), 1990 ($-2.24\text{ }^{\circ}\text{C}$), 1991 ($-2.19\text{ }^{\circ}\text{C}$), en los cuales la línea de tendencia indica que empieza el aumento de la temperatura mínima para el área de estudio; 1996 ($-1.83\text{ }^{\circ}\text{C}$), 1997 ($-1.73\text{ }^{\circ}\text{C}$), se observa el incremento aún más pronunciado; 2001 ($-1.25\text{ }^{\circ}\text{C}$) y 2004 ($-0.77\text{ }^{\circ}\text{C}$), sin duda marcan el aumento más representativo de la tendencia; algunos datos coinciden con los años más cálidos por término medio que se han registrado en todo el mundo durante los decenios de 1980, 1990 y 2000, siendo este último con los 10 años, (a excepción de 1998) el más caluroso desde 1880, (IPCC, 1992; NOAA, 2012).

De acuerdo al promedio y moda de la edad de las manchas de arbolado de *Pinus hartwegii* se deduce que, en las últimas dos décadas las condiciones del clima en términos de temperatura y precipitación han favorecido el establecimiento de estos individuos.

Bajo este escenario global de cambio climático, los bosques de alta montaña sufrirán una reducción considerable de sus superficies, debido a que son desplazados en sus límites inferiores por otras especies de rápido crecimiento (como el aile) y adaptadas a condiciones de calor y, por tanto, se establecen en zonas con mayor altitud y con características climáticas aptas para su establecimiento, pero con las condiciones de suelo adecuadas (Arriaga y Gómez, 2004). Pese al establecimiento de nuevos bosques en zonas altas, este proceso implica un tiempo de adaptación que, comparado con los tiempos en los que se están produciendo los cambios climáticos, son muy lentos, lo que hace a estas poblaciones forestales altamente vulnerables al fenómeno de cambio climático global (Peters, 1990; Pauli *et al.*, 1990).

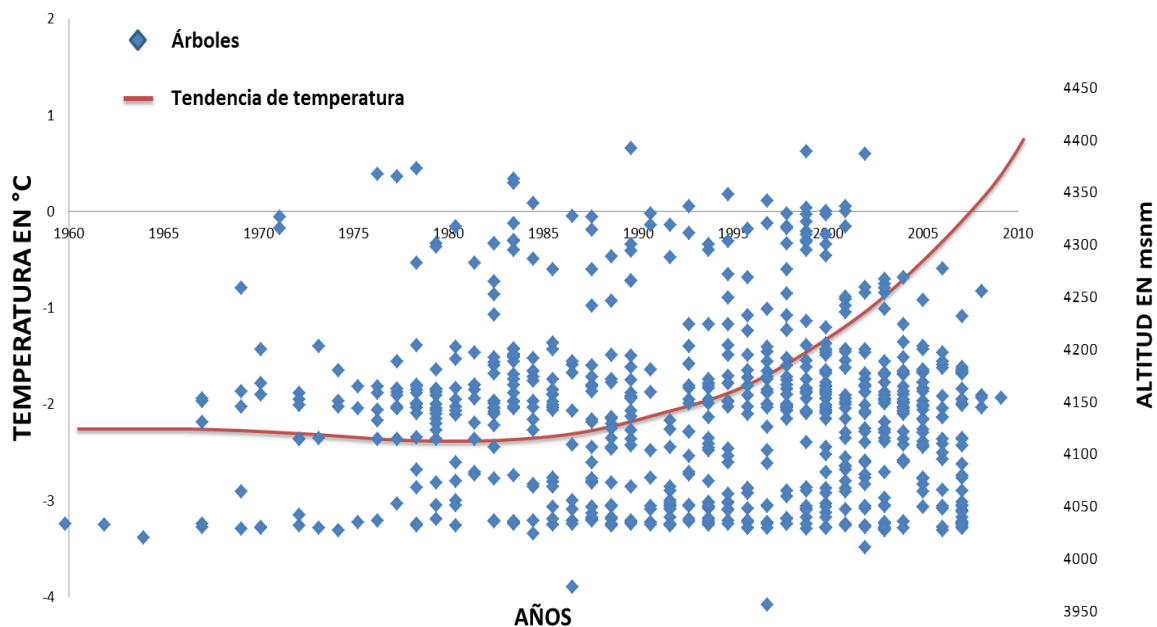


Figura 50: Establecimiento de arbolado y el incremento histórico de la temperatura mínima. Fuente: propia con base en datos de campo 2012.



La mayoría de los estudios sobre cambio climático y ecosistemas consideran una capacidad ilimitada de migración o no migración (Pearson, 2006). Suponiendo que las zonas de vida se definen por las condiciones climáticas en que se desarrolla un ecosistema, en el primer caso cuando la zona de vida se desplaza en el escenario futuro, también lo hace directamente el ecosistema (Mendoza, *et al.*, 2001). En el segundo caso, si la zona de vida de un lugar se modifica con el cambio climático, el ecosistema desaparece. La dificultad en considerar escenarios más realísticos de migración viene de las incertidumbres sobre los procesos de migración y la velocidad de migración de plantas (Locatelli and Imbach, 2008).

Sin embargo, la migración de los ecosistemas depende de la configuración del paisaje en donde las especies pueden moverse. La fragmentación del paisaje puede reducir la capacidad de migración, modificando las tasas de dispersión de semillas o reduciendo los hábitats adecuados para una colonización exitosa. En este contexto los corredores biológicos propuestos para conectar parches de vegetación (en particular las áreas protegidas) juegan un papel importante en la adaptación de los ecosistemas al cambio climático y pueden considerarse como medidas de adaptación planeada (Locatelli and Imbach, 2008).

Todo lo anterior se apoya en los resultados obtenidos de la prueba estadística no-paramétrica de Mann-Kendall (IDRISI) que permite medir el grado de tendencia creciente o decreciente de la precipitación y temperatura para el área de estudio y durante toda la serie de tiempo (50 años) mencionada anteriormente. Además se muestran los resultados a nivel espacial del comportamiento de la tendencia de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima.

Al aplicar la prueba de Mann-Kendall a los datos de precipitación, es posible observar la tendencia positiva o el incremento en las lluvias que ocurre en la zona del PNNT. En este sentido el área de estudio ubicada por encima de los 4,000 msnm se ubica dentro de la franja considerada con aumento de precipitación,

resalta el hecho de que esta franja es la de mayor superficie y por lo tanto implica que el régimen interanual de la precipitación en incremento es la tendencia dominante, ya que se observa un tanto alejada de la franja considerada como estable. La franja considerada con aumento se observa casi en la totalidad del PNNT, mientras que la de estable ocupa una menor superficie. En el acercamiento de la imagen se puede apreciar de manera más detallada dicho aumento dentro del área de estudio.

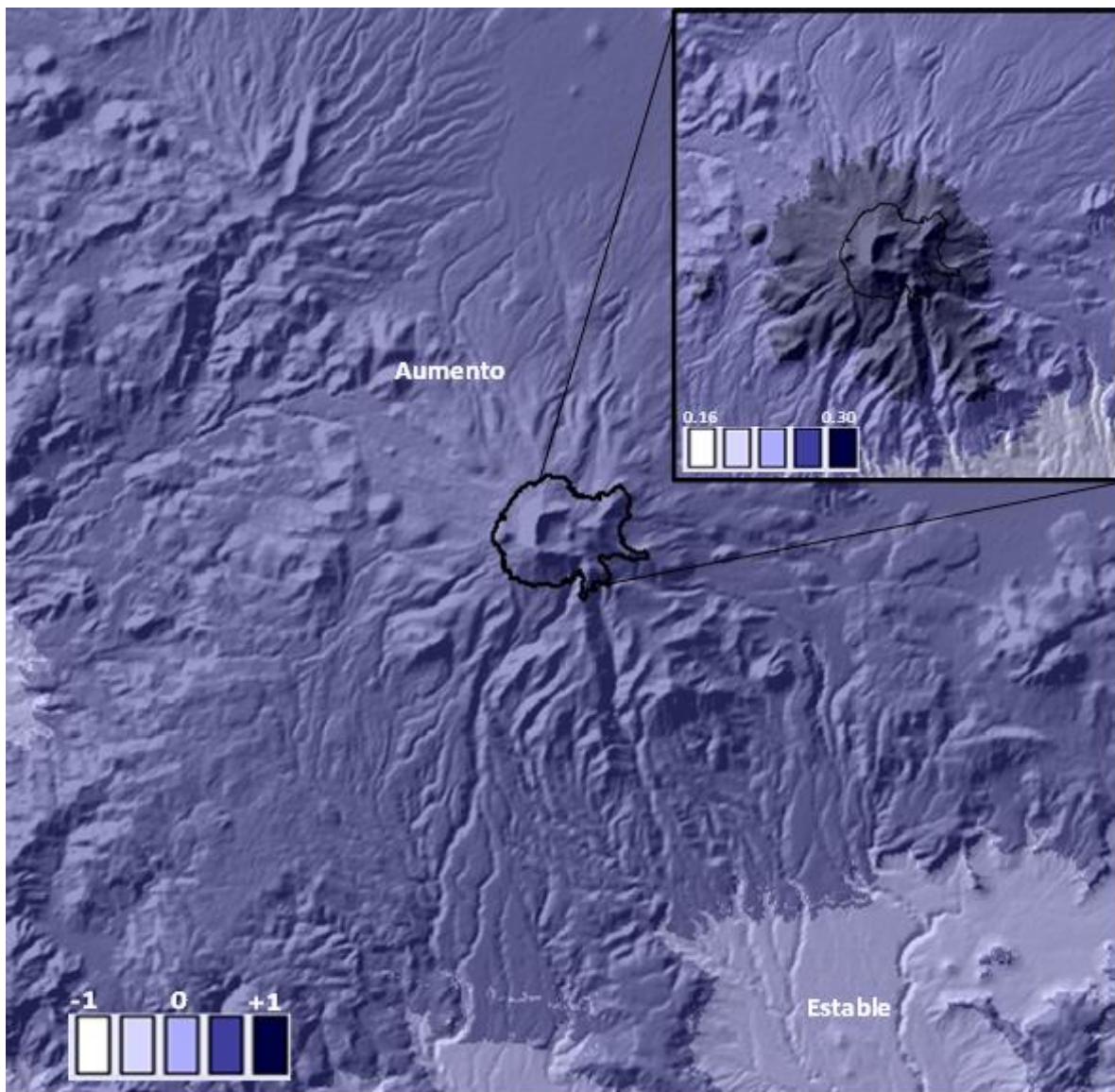


Figura 51. Mapa de tendencia del comportamiento de la precipitación en el PNNT. Fuente: propia con base en Díaz *et al.*, 2013.

Al aplicar la prueba de Mann-Kendall a los datos de temperatura máxima, es posible observar la tendencia considerada como estable que ocurre en la zona del PNNT. En este sentido el área de estudio ubicada por encima de los 4,000 msnm se ubica dentro de la franja considerada como estable, sin embargo esta franja se encuentra completamente rodeada por la franja considerada con aumento y la cual tiene mayor superficie, por lo tanto el régimen interanual de la temperatura máxima es dominado por las tendencias de estable y en aumento.

La franja considerada con aumento se observa casi en la totalidad del PNNT, mientras que la de estable ocupa una menor superficie. En el acercamiento de la imagen se puede apreciar de manera más detallada dicho régimen de estable o en aumento dentro del área de estudio.

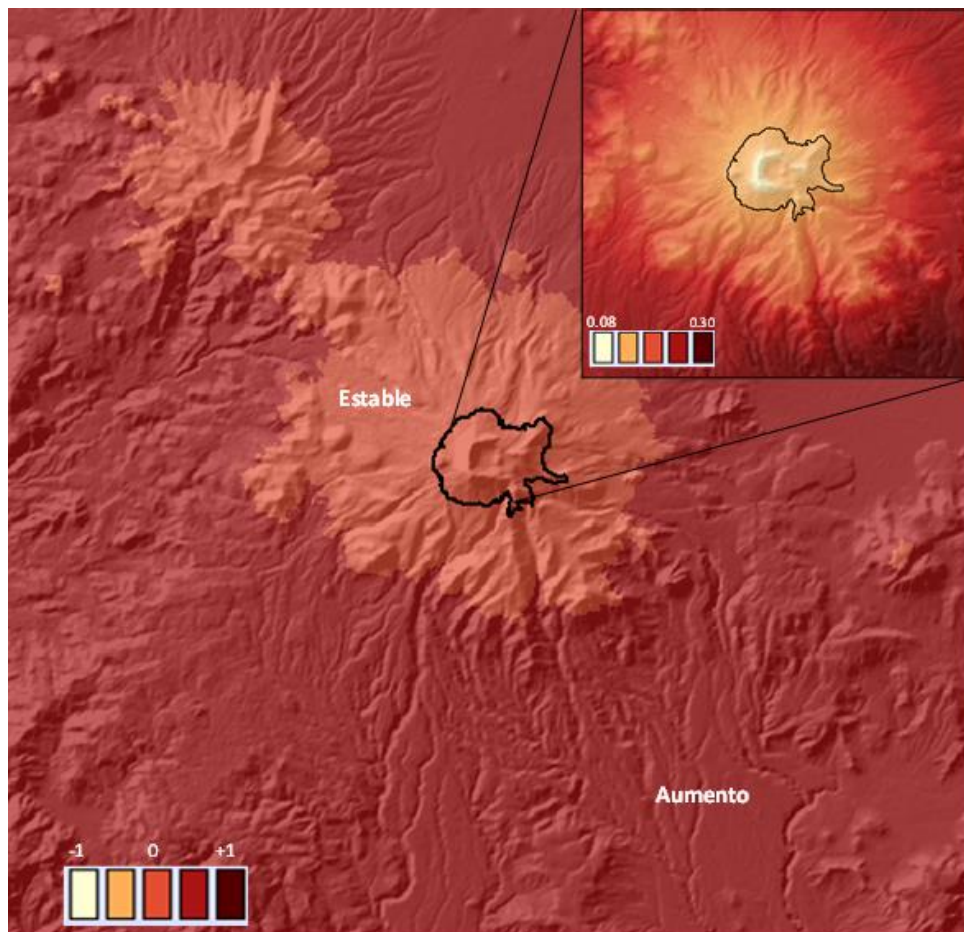


Figura 52. Mapa de tendencia del comportamiento de la temperatura máxima. Fuente: propia con base en Díaz *et al.*, 2013.



El resultado de la prueba estadística de Mann-Kendall indica que los valores tienden a 1, lo que significa que en el área de estudio ubicada por encima de los 4,000 msnm se presenta un aumento significativo. En cuanto al comportamiento espacial esta franja ocupa menor superficie con respecto a la franja considerada como aumento y estable.

El régimen interanual de temperatura mínima es dominado por las tendencias de aumento significativo y aumento, lo que explica un comportamiento a siempre aumentar y no disminuir de esta variable; en el acercamiento de la imagen se puede apreciar de manera más detallada dicho régimen de aumento significativo y en aumento dentro del área de estudio, lo que parece está propiciando las características adecuadas para el establecimiento del arbolado juvenil, y cabe mencionar que el aumento en la variable de temperatura puede estar relacionado a la cercanía con las ciudades en donde sin duda se presentan islas de calor.

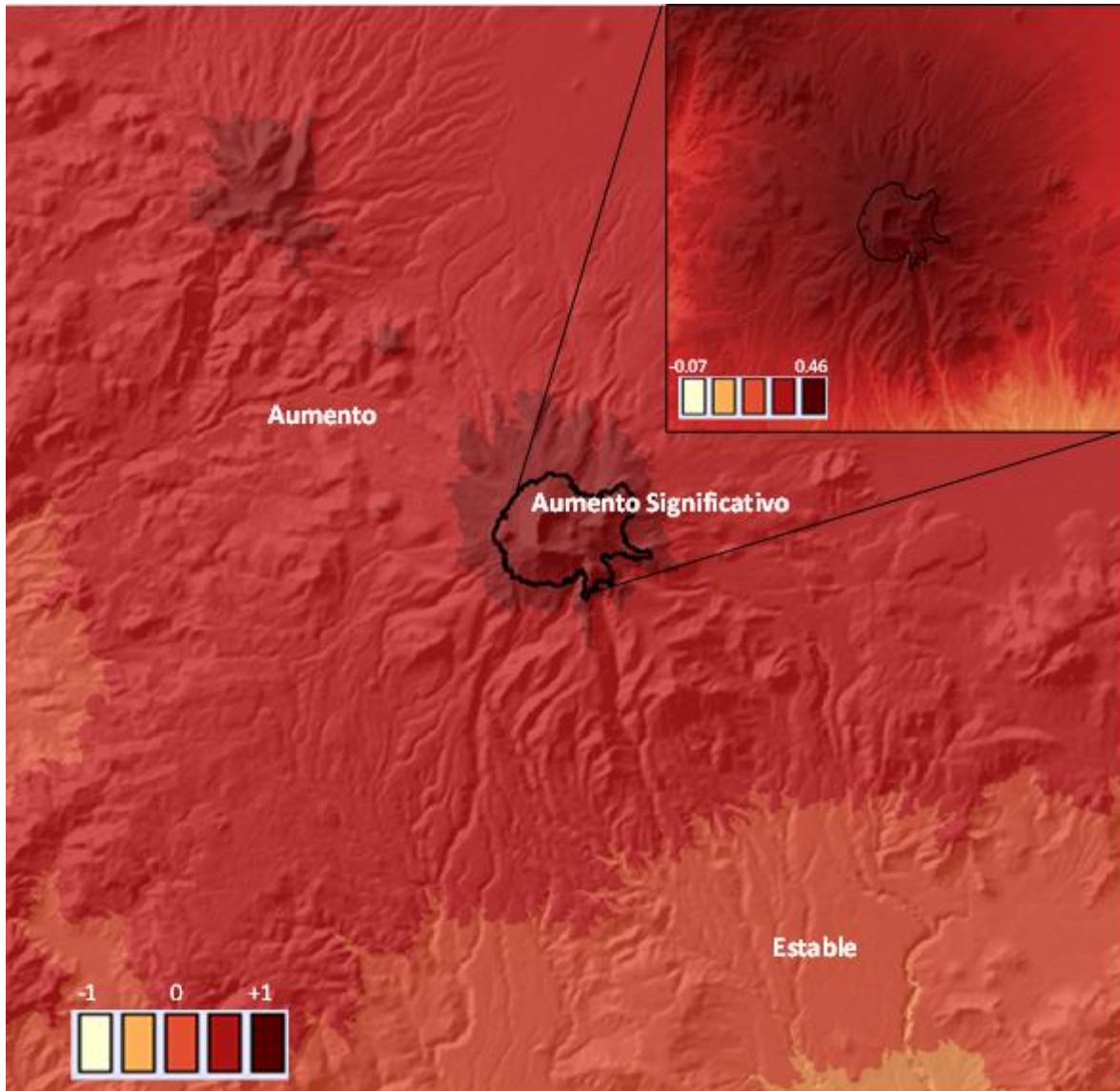


Figura 53. Mapa de tendencia del comportamiento de la temperatura mínima. Fuente: propia con base en Díaz *et al.*, 2013.



CONCLUSIONES

El estudio permitió evidenciar de manera concluyente los procesos de adaptación del bosque de *Pinus hartwegii* al comportamiento actual de las variables climáticas (temperatura y precipitación).

El límite de la vegetación arbórea de los bosques *Pinus hartwegii* asciende al Norte (4,100 msnm), al Sur (4,060), al Este (4,080) y al Oeste (4,100), de éstas, las laderas norte y oeste son las que presentan las mayores altitudes, con superficies pequeñas; por el contrario, las laderas sur y este presentan mayores superficies por encima de los 4,000 msnm. En todos los casos, estos bosques parecen ser las zonas con arbolado semillero de las manchas de arbolado juvenil ubicadas hasta en altitudes de 4,390 msnm.

Las manchas de arbolado juvenil presentan un promedio de edad de 20 años, aunque se identificaron años específicos en los cuales estas poblaciones podrían haberse establecido, obedeciendo al comportamiento climático histórico; por ejemplo, la edad que más se repite en todas las manchas es de 13 años. Lo anterior sugiere que, a partir de la década dos 90's los promedios de temperatura y precipitación se han incrementado de manera tal, que han permitido el establecimiento de árboles en altitudes jamás reportadas anteriormente (4,390 y 4,387), árboles ubicados a mayor altitud en la cara norte y oeste del PNNT.

Estos árboles presentan una relación negativa de diámetro-altitud y altura-altitud, esto obedece a las condiciones extremas de estas zonas (temperaturas bajas y vientos fuertes); por ejemplo, la altura promedio de los fustales ubicados por encima de los 4,000 msnm es de 4.5 m, con diámetros de 16 cm y edades de 25 años. Esto confirma que a mayor altitud los ritmos de crecimiento son más lentos, haciendo vulnerables estos bosques a fenómenos antrópicos como los incendios forestales, muy comunes en la zona de estudio.



El 60% del arbolado ubicado por encima de los 4,000 msnm se estableció a partir de la década de los 90's, donde la curva de la tendencia del incremento de la precipitación y temperaturas (máximas y mínimas) es más pronunciada. Por lo anterior, es inevitable inferir que existe un proceso de adaptación de la especie a las nuevas condiciones de clima, como estrategia para su supervivencia.

El área de estudio ha experimentado en los últimos años cambios en su clima, se reporta para el periodo de 1960 a 2010 una tendencia de aumento en los promedios anuales de temperatura máxima y mínima; la temperatura máxima se incrementó en 1.5 °C y, con la misma tendencia, la temperatura mínima en 2.8 °C., combinado con un incremento en 411 mm en la precipitación.

Bajo un escenario de cambio climático, los bosques de *Pinus hartwegii* en el PNNT verán reducidas sus poblaciones, debido a que, sus superficies están siendo desplazadas hacia zonas con mayor altitud, siendo invadidas en sus límites inferiores por especies de rápido crecimiento adaptadas a condiciones de calor y, por el contrario viéndose obligadas a establecerse en zonas con mayor altitud, donde las superficies son mucho menores debido a la cercanía con los picos de los edificios volcánicos.

A mediano plazo, los bosques de pino del PNNT, serán desplazados hacia las cumbres de las montañas y considerando un desplazamiento de 40 m, reducirán sus superficies en un 8.76%.

Los altos índices de crecimiento, que han sido pronosticados por algunos científicos debido al aumento de temperaturas podrían permitir a los bosques resistir los daños causados por las enfermedades y plagas.

Algunos ejemplos de factores que determinan el establecimiento de *pinus hartwegii* por encima del límite vegetal son: la variabilidad climática (aumentos de temperatura, cambios en precipitación, cambios en los patrones de las temporadas), altitud, pendiente, tipo de suelo, etc.



Aun si se desconoce la capacidad adaptativa de muchos ecosistemas, se anticipa que esa capacidad podría ser insuficiente para enfrentar los cambios climáticos previstos, ya que dependen del factor tiempo.

Los resultados muestran que las áreas protegidas más expuestas y sensibles al cambio climático se encuentran en las montañas altas y los corredores biológicos (migración asistida) juegan un papel importante para facilitar la migración de especies entre áreas protegidas bajo escenarios de cambio climático.

La adaptación de los ecosistemas y la variabilidad de los eventos climáticos extremos pueden verse como acciones a tomar para preservar la resiliencia, disminuir la vulnerabilidad y aumentar la capacidad adaptativa. Asimismo, debe reconocerse que la capacidad adaptativa no es estática; se construye o se deteriora, puede ser reactiva o anticipatoria y espontánea o planeada.

Los patrones de distribución muestran que la especie de *Pinus hartwegii* por encima de la cota 4,000 msnm como respuesta al cambio climático ha desarrollado diversas estrategias de adaptación para su supervivencia; en primer lugar, estableciéndose en zonas con mayor altitud y que no habían sido reportadas como arboladas, en segundo lugar se establecen sobre pendientes pronunciadas y expuestas a eventos extremos como vientos tempestuosos, baja disponibilidad de nutrientes, stress climático, mayor presión atmosférica y un crecimiento lento que les obliga a adaptar alturas pequeñas, fustes que no son rectos, ramas dirigidas hacia un mismo lugar y diámetros anchos.



RECOMENDACIONES

Debido al laborioso y pesado trabajo de campo se recomienda ampliamente realizar más estudios relacionados a las zonas de alta montaña y efectuar la búsqueda de los individuos faltantes para darles un seguimiento que permita conformar una base de datos enriquecida con la información que cubra mayor porcentaje de los individuos, en donde se pueda hacer el monitoreo de esta especie debido a que los cambios en la temperatura o las precipitaciones, aun a pequeña escala, pueden impactar fuertemente estos bosques ubicados en zonas con condiciones especiales y gradientes fuertes de clima y, así como observar su comportamiento y los patrones de distribución relacionados al cambio climático.

La adaptación es necesaria para los ecosistemas vulnerables al cambio climático por qué en ella se necesita implementar medidas para reducir los impactos, se recomienda proponer las medidas que busquen facilitar la evolución o la transición del ecosistema no intentando resistirse al cambio y que tenga una perspectiva a largo plazo, como los corredores biológicos. En todos los casos, la capacidad adaptativa del ecosistema es un parámetro clave, no necesariamente para conservar al ecosistema en su estado inicial, sino para facilitar su evolución hacia un estado aceptable para los actores o la sociedad.



BIBLIOGRAFÍA

Alpandino, 2011 (Version 1.1) Alpandino by the Institute of Botany (Section Plant Ecology), University of Basel is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial-No Derivative Works 2.5 Switzerland License.

Arriaga, L. y Gómez, L., 2004. Posibles efectos del cambio climático en algunos componentes de la biodiversidad de México. 255-265 pp. En: J. Martínez y A. Fernández (Compiladores.) INE/SEMARNAT. México, D.F.

Aspectos geográficos de México. Consultado el 11 de Noviembre de 2012, INEGI, página web de información geográfica: http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/edomex/ubic_geo.cfm?c=1203&e=15&CFID=163202&CFTOKEN=92860098

Aulitzky, H., 1961. Die Bodentemperaturverhältnisse in der Kampfzone oberhalb der Waldgrenze und im subalpinen Zirben-Lächenwald. Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Mariabrunn 59: 153-208.

Brown, S., Sathaye, J., Cannell, M., Kauppi, P.E., 1996. Mitigation of carbon emissions to the atmosphere by forest management. Journal of Commonwealth Forestry Review, 80-91, 109, 111-112 pp.

Caballero, M., 1967. Estudio Comparativo de *Pinus rudis* y *Pinus hartwegii*. Tesis profesional. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Chapingo. México.

Campos, J.L., 1993. Claves para la determinación de los pinos mexicanos. Universidad Autónoma Chapingo, México 22: 70 pp.

Carpio C., Ramírez O., 2001. Estudios económicos sobre el uso de los bosques latinoamericanos para mitigar el cambio climático. Revista Asturiana de Economía (RAE) Volúmen 21, 73-99 pp.

Castañeda, M. y López J., 2010. Tesis de licenciatura: "Análisis de cambio de la ocupación del suelo en el Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT) durante el periodo 2000 – 2008". Universidad Autónoma del Estado de México. México.

Ciesla, W.M., 1995. Cambio climático, bosques y ordenación forestal: una visión de conjunto. FAO. Roma. ISBN 9253036648. 146 pp.



Ceballos, G., 2011. Propuesta de Re-categorización y Edecreto del Parque Nacional Nevado de Toluca. Secretaría del Medio Ambiente. Gobierno del Estado de México. México.

CEPANAF, 2008. Consultado enero 2010 en: <http://www.edomexico.gob.mx/cepanaf/htm/cepanaf.htm>

García, E., 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen . 3a edición. 252 pp.

CONANP, 2009. Consultado julio 2012 en: <http://www.conanp.gob.mx/>

Davis, M., 1989. Lags in vegetation response to greenhouse warming. Department of Ecology and Behavioral Biology, University of Minnesota, Minneapolis. U.S.A.

Däniker, A., 1923) Biologische Studien über Baum- und Waldgrenzen, insbesondere über die klimatischen Ursachen und deren Zusammenhänge. Vierteljahres-schrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich 68: 1-102 pp.

De Alba, E., 2004. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. En J. Martínez, y A. Fernández-Bremauntz (Comps.), Cambio climático: una visión desde México (pp. 143-153). México: Instituto Nacional de Ecología/Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Díaz, C., Gómez, M.A., Becerril, R., Mastachi, C.A., Romero, A. T., 2013. Efectos de la variabilidad climática en el cultivo de maíz de temporal: análisis exploratorio en la cuenca alta del río Lerma (1960-2009). En avances de Ciencias del Agua. Plaza y Valdéz editores. En impresión.

Eastman, R., 2012. Idrisi Taiga, Guide to GIS and image processing Manual, Version 17 Clark Labs University. 321 pp.

Eguiluz, T., 1978. Ensayo del Clima y distribución del género *Pinus hartwegii* en México. Tesis profesional. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. México. 12 pp.

Endara, A., 2007. Tesis de maestría: Estructura forestal de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Nevado de Toluca. Universidad Autónoma del Estado de México. Estado de México.

Endara, A., 2010. Tesis de doctorado: Análisis de los procesos de recuperación en el bosque templado del Parque Nacional Nevado de Toluca. Universidad autónoma del Estado de México. Estado de México.



Estrada, A., y Saenz, M., 1997. Tesis de licenciatura: Diccionario de biogeografía. Universidad Autónoma del Estado de México. México.

Eriksson, G., G. Namkoong y J. H. Roberds, 1993. Dynamic geneconservation for uncertain futures. *Forest Ecology and Management* 62: 15-37.

FAO, 2007. Consultado agosto 2012 en: http://www.fao.org/index_en.htm

FAO, 2012. El estado de los bosques del mundo. Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura. Roma, 50 pp. Consultado 6 de febrero de 2013 desde <http://www.fao.org/docrep/016/i3010s/i3010s00.htm>

Franco-Maass, S., Burrola, C., 2010. Los hongos comestibles del nevado de Toluca. Universidad Autónoma del Estado de México. ISBN 607422089. 147 pp.

Garduño, R., 2004. ¿Qué es el efecto invernadero? En J. Martínez, y A. Fernández-Bremauntz (Comps.), Cambio climático: una visión desde México (pp. 29-39). México: Instituto Nacional de Ecología/Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Gobierno del estado de México, 1999. Decreto del PNNT 1936 y 1937.

Gómez, H., 2006. Sistemas de Información Geográfica, uso, técnicas y múltiples aplicaciones. Universidad de los Andes. Venezuela.

Grabherr, G., Dullinger, S., Dirnbo, T., 1994. A regional impact assessment of climate and land use change on alpine vegetation. *Journal of Ecology. Conservation Biology*, University of Vienna, Vienna, Austria.

Gyampoh, B.A., Amisah, S., Idinoba, M., Nkem, J., 2009. Aplicando los conocimientos tradicionales para afrontar el cambio climático en las zonas rurales de Ghana. FAO.

Guariguata, M.R., 2009. El manejo forestal en el contexto de la adaptación al cambio climático. *Revista de Estudios Sociales* No. 32. ISSN 0123-885X. Bogotá, Pp.98-113.

Holtmeier, F-K., 2003. Mountain timberlines, Ecology, patchines, and dynamics. *Advances in Global Change Research*, Vol. 14. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London.

Iglesias, L., y Tivo, Y., 2006. Caracterización morfométrica de la población de *Pinus hartwegii* Lind. del Cofre del Perote, Veracruz, Universidad Autónoma Indígena de México. México.



INEGI, 2012. <http://www.inegi.org.mx/default.aspx?>

IPCC, 1992. Informe suplementario del Primer informe de Evaluación. Contribución del Grupo I de trabajo. IPCC, Ginebra, Suiza, 14 pp.

IPCC, 1995. Segunda Evaluación-Cambio climático 1995. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III. M.U.F. Kirschbaum, I.R. Noble; H. Gitay, M. Beniston, M.G. Öquist, Suecia; B.H. Svensson, B. Allen-Diaz, *et al.*, IPCC, Ginebra, Suiza, 71 pp.

IPCC, 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 pp.

Lorenzo, J.L., 1964. Los glaciares de México. 2ª Edición. Monografías del Instituto de Geofísica, UNAM, México, D.F.

Maass, F., y Burrola, c., 2008. Hongos comestibles en el PNNT. Universidad Autónoma del estado de México. México.

Madrigal, U.D., 1992. Ubicación y características generales del Estado de México en: Atlas Estado de México. Gobierno del Estado de México. Toluca, México. 85 pp.

Madrigal, D. y González, A., 2004. Distribución del impacto ambiental en los bosques de *Pinus hartwegii* del Nevado de Toluca. Universidad Autónoma del Estado de México. México.

Montero, G.I.A., 2004. Atlas arqueológico de la alta montaña mexicana. Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional Forestal, México. 174 pp.

Morrone, J., Luna, I., Contreras, R., 1996:2001. Conceptos Biogeográficos. México.

Fredericksen, T.S., Mostacedo, B., 2000. Regeneration of timber species following selection logging in a Bolivian tropical dry forest. *Forest Ecology and Management* 131: 47-55 pp.

NOAA National Climatic Data Center, estado del clima: Informe Climático Global 2012, publicado en línea el diciembre de 2012, consultado el 6 de febrero de 2013 desde <http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/national/2012/13> .



NOAA National Climatic Data Center, estado del clima: Análisis Global Anual para 2012, publicado en línea el diciembre de 2012, consultado el 6 de febrero de 2013 desde <http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/2012/13> .

Panadera, 1996. Cartografía de la vegetación. Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional: Universidad de Barcelona. Barcelona.

Patiño, F., de la Garza, P., Villagómez, Y., Talavera, Y., Camacho, F., 1983. Guía para la Recolección y Manejo de Semillas de Especies Forestales. Boletín Divulgativo No. 63. INIF – SF-SARH. México, D.F.

Perry, Jr. J.P. 1991. The Pines of Mexico and Central America. Timber Press Inc., Portland, Oregon, USA. 231 pp.

Peters, R. L., 1990. Effects of global warming on forests. Journal Forest Ecology and Managment. Conservation of Diversity in Forest Ecosystem. U.S.A.

Real Academia Española, consultado enero, 2013 en <http://www.rae.es/rae.html>

Rivera, M. A., 1995. El Cambio Climático. Consejo Nacional para la Cultura y las artes. México.

Ruiz, A., 2001. Clima y cambio climático. Departamento de Física, Universidad de Alcalá. Consultado 9 de febrero de 2013 desde <http://www.um.es/gtiweb/adrico/medioambiente/clima%20y%20cambio.htm>

Ruiz, V., 2007. Regiones Naturales y Biogeográfica de México. México.

Rzedowski, J., 2006. Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 504 pp. Consultado 6 de febrero de 2013 desde http://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf

Sánchez, L., Pineda, M. 2009. Distribución de la vegetación y cambio climático como proceso de selección natural. Revista de Divulgación Científica y Tecnológica de la Universidad Veracruzana. De: <http://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol22num3/articulos/vegetacion/index.html>

SEMARNAT, 2003. Consultado diciembre 2012 en: <http://www.semarnat.gob.mx/Pages/Inicio.aspx>

SIAASE, 2008. Adaptación al cambio climático y servicios ecosistémicos en America Latina. Libro de actas del seminario internacional sobre adaptación al



cambio climático: el rol de los servicios ecosistémicos. Editores Celia Martínez Alonso, Bruno Locatelli, Raffaele Vignola y Pablo Imbach. Serie técnica, manual técnico no. 99. Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza (CATIE) 2010.

Slatyer, R.O., Noble, I.R., 1992. Dynamics of treelines. In: Hansen A, DiCasteri F (eds) Landscape boundaries: consequences for biotic diversity and ecological flows. Ecological Studies, Vol. 92. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, pp. 346-359.

Smith, J., Ragland, G., Pitts, G., 1996. A process for evaluating anticipatory adaptation measures for climate change. Hagler Bailly Consulting, Inc., P.O. Drawer O, Boulder, CO 80306, U.S.A.

Tranquillini, W., and Turner H., 1961. Untersuchungen über die Pflanzentemperaturen in der subalpiner Stufe mit besonderer Berücksichtigung der Nadeltemperatur der Zirbe. Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Mariabrunn 59: 127-151 pp.

Tranquillini, W., 1979. Physiological ecology of the alpine timberline. Tree existence at high altitudes with special reference to the European Alps. Ecological Studies, Vol. 31. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 473-491 pp.

Villers, L., Trejo, I., 2004. Evaluación de la vulnerabilidad en los ecosistemas forestales. En J. Martínez, y A. Fernández-Bremauntz (Comps.), Cambio climático: una visión desde México (pp. 240-254). México: Instituto Nacional de Ecología/Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Villers, L., Trejo, I., 1997. Assessment of the vulnerability of forest ecosystems to climate change in Mexico. Climate Research Vol. 9: 87-93.

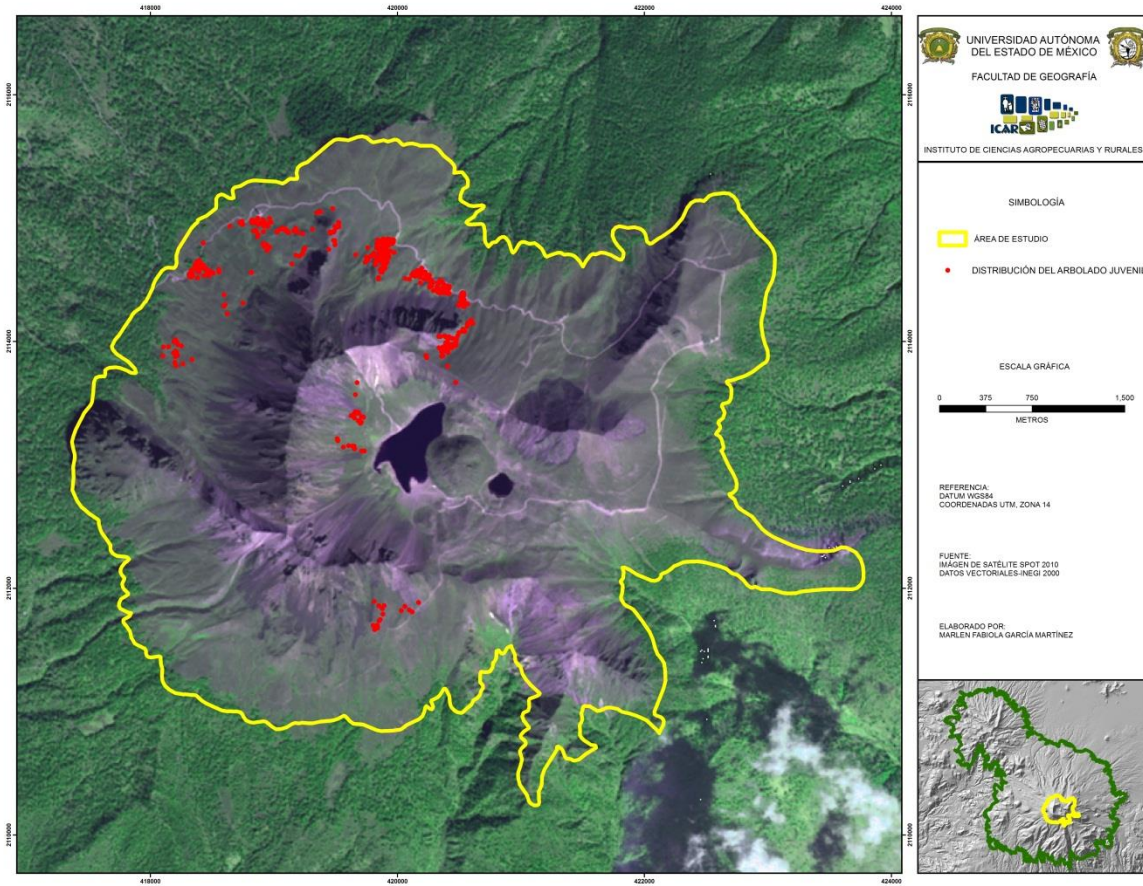
Wardle, P., 1974. Alpine timberlines. In: Ives JD, Barry R (eds) Arctic and alpine environments. Methuen Publishing, London, pp 371-423.

Wieser, G., and Tausz, M., 2007. Trees at their Upper Limit. Treeline Limitation at the Alpine Timberline. Plant Ecophysiology Vol. 5, Springer, Netherlands, 223 pp.

Yáñez, L. 2004. Las principales familias de árboles en México, Universidad Autónoma Chapingo – División de Ciencias Forestales. Chapingo Estado de México. México. 37 pp.

ANEXOS

Anexo 1. Distribución del arbolado juvenil





Anexo 2. Formato de campo

MUESTRA	ALTURA	ESTADO	X	Y	Z	MARCA GPS	EDAD	PIÁNTULAS	BRINZALES	LATIZALES	FUSTALES	SALIDA

Anexo 3. Manchas de arbolado ubicadas en gabinete.

