



Universidad Nacional Autónoma De México  
Programa De Maestría Y Doctorado En Geografía

# **Cambios de uso de suelo y de clima: Guatemala, un caso de estudio**

**T E S I S**

que para optar por el grado de

**MAESTRA EN GEOGRAFIA**

Presenta:

**Tania Pérez Sánchez**

Director De Tesis:

**Dr. Víctor Orlando Magaña Rueda**

Instituto De Geografía, UNAM

Ciudad Universitaria, Ciudad De México. Enero 2018.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## Contenido

Dedicatoria .....	8
Agradecimientos .....	9
Resumen .....	10
Introducción .....	11
Tiempo y clima .....	12
Relación Biósfera – Clima .....	13
Procesos.....	14
a) Albedo.....	14
b) Humedad del suelo.....	16
c) Rugosidad.....	16
Impactos de la deforestación .....	17
Deforestación en trópicos.....	19
Guatemala .....	21
El clima en Guatemala .....	22
Flujos de humedad: condiciones sinópticas .....	22
ZITC.....	22
Variabilidad: ENSO y AMO, PDO .....	23
Comunicaciones de Guatemala .....	24
Población.....	24
Datos de deforestación en Guatemala .....	25
Justificación.....	27
Guatemala: un problema social, económico y ambiental.....	27
Hipótesis.....	28
Objetivo General .....	28
Objetivos específicos .....	28

Datos y Metodología .....	29
Datos .....	29
Precipitación.....	29
Temperatura .....	29
Uso de suelo .....	29
NDVI.....	30
Metodología .....	32
Series de tiempo .....	32
Filtros .....	32
Análisis de tendencias Mann-Kendall.....	32
Función de densidad de probabilidad (histogramas) .....	33
Resultados: .....	34
Áreas representativas.....	35
Cambio de uso de suelo en Ciudad de Guatemala .....	36
NDVI en la Ciudad de Guatemala.....	37
Resultados de la evaluación Mann-Kendall .....	37
Precipitación en Ciudad de Guatemala .....	37
Temperatura en la Ciudad de Guatemala .....	38
Cambio de uso de suelo en el Petén .....	40
NDVI en el Petén .....	41
Resultados de la evaluación Mann-Kendall.....	41
Precipitación en el Petén .....	41
Temperatura en la región del Petén.....	42
Cambio de uso de suelo en el Parque Nacional Laguna del Tigre .....	44
NDVI en el Parque Nacional Laguna del Tigre .....	45
Resultados de la evaluación Mann-Kendall .....	45

Precipitación en el Parque Nacional Laguna del Tigre .....	45
Temperatura Parque Nacional Laguna del Tigre .....	47
Cambio de uso de suelo en la Reserva Maya .....	48
NDVI en la Reserva Maya .....	48
Resultados de la evaluación Mann-Kendall .....	48
Precipitación en la Reserva Maya .....	49
Temperatura de la Reserva Maya.....	49
Síntesis del contexto histórico de Guatemala.....	51
Discusión y conclusiones .....	54
Cambio global y cambio regional-local .....	55
Conclusiones .....	56
Trabajo futuro: México (breve descripción del caso del norte de Veracruz) .....	57
Diagnóstico general.....	57
Bibliografía .....	60
Anexos.....	65
Anexo 1. Biomas de Guatemala .....	65
Anexo 2. Dinámica forestal de Guatemala.....	68

## Figuras

Figura 1 Intercambios importantes entre la atmósfera y los ecosistemas terrestres.....	14
Figura 2 Cambio en albedo .....	15
Figura 3 Cambio en humedad del suelo .....	16
Figura 4 Cambio en rugosidad .....	17
Figura 5 Efecto climático de la deforestación. Tomado de Foley.....	18
Figura 6 Deforestación. Fuente: FAO.....	19
Figura 7 Cambio en cobertura forestal en Centroamérica. Fuente: Global Forest Change.....	20
Figura 8 Localización de las Hot-Spot de deforestación. Fuente: Achard et al, 2008 .....	20
Figura 9 Departamentos de Guatemala .....	21
Figura 10 Patrón de lluvia mayo-octubre. Elaboración propia a partir de datos CMORPH .....	22
Figura 11 Escenario de cambio en precipitación.....	24
Figura 12 Escenario de cambio en temperatura .....	24
Figura 13 Pérdida de cobertura forestal.. Fuente: SIFGUA.....	25
Figura 14 Cobertura forestal datos FAO. Guatemala y Petén.....	26
Figura 15 Fuentes: USAID Country Environmental Profiles.....	27
Figura 16 Uso de suelo 2000.....	30
Figura 17 Uso de suelo 2010.....	30
Figura 18 NDVI abril 1980 .....	34
Figura 19 NDVI abril 2001 .....	34
Figura 20 NDVI abril 2016.....	34
Figura 21 NDVI abril quinquenio 1: 2001-2005.....	34
Figura 22 NDVI abril quinquenio 2: 2006-2010.....	34
Figura 23 NDVI abril quinquenio 3: 2011-2015.....	34
Figura 24 NDVI septiembre quinquenio 1: 2001-2005.....	35
Figura 25 NDVI septiembre quinquenio 2: 2006-2010.....	35

Figura 26 NDVI septiembre quinquenio 3: 2011-2015.....	35
Figura 27 Áreas representativas .....	35
Figura 28 Ciudad de Guatemala 1990.....	36
Figura 29 Ciudad de Guatemala 2000.....	36
Figura 30 Ciudad de Guatemala 2010.....	36
Figura 31 Ciudad de Guatemala 2016.....	36
Figura 32 NDVI suavizado en la Ciudad de Guatemala .....	37
Figura 33 Tendencia en precipitación mensual para la ciudad de Guatemala.....	38
Figura 34 Tendencia en temperatura media mensual para la Ciudad de Guatemala.....	38
Figura 35 Histograma de la temperatura en Ciudad de Guatemala.....	39
Figura 36 Petén 1990 .....	40
Figura 37 Petén 2000 .....	40
Figura 38 Petén 2010 .....	40
Figura 39 Petén 2016 .....	40
Figura 40 NDVI suavizado en el Petén.....	41
Figura 41 Tendencia en precipitación mensual para el Petén .....	42
Figura 42 Tendencia en temperatura media mensual para el Petén .....	42
Figura 43 Histograma de la temperatura en el Petén.....	43
Figura 44 Laguna del Tigre 1990.....	44
Figura 45 Laguna del Tigre 2000.....	44
Figura 46 Laguna del Tigre 2010.....	44
Figura 47 Laguna del Tigre 2016.....	44
Figura 48 NDVI suavizado en el Parque Nacional Laguna del Tigre.....	45
Figura 49 Tendencia en precipitación mensual para el Parque Nacional Laguna del Tigre .....	46
Figura 50 Cambio en precipitación media mensual .....	46
Figura 51 Tendencia en temperatura media mensual para el Parque Nacional Laguna del Tigre ....	47

Figura 52 Histograma de la temperatura en el Parque Nacional Laguna del Tigre.....	47
Figura 53 Reserva Maya 1970 .....	48
Figura 54 Reserva Maya 2010 .....	48
Figura 55 Reserva Maya 2016 .....	48
Figura 56 Tendencia en precipitación mensual para la Reserva Maya .....	49
Figura 57 Tendencia en temperatura media mensual para la Reserva Maya .....	50
Figura 58 Histograma de la temperatura en la Reserva Maya.....	50
Figura 59 Zonificación de la Reserva de la Biósfera Maya. Fuente: Estado de la RBM. <a href="https://goo.gl/UCzieK">https://goo.gl/UCzieK</a> .....	52
Figura 60 Deforestación en la RBM. Fuente: Estado de la RBM. <a href="https://goo.gl/UCzieK">https://goo.gl/UCzieK</a> .....	52
Figura 61 Área con cambios de uso de suelo .....	57
Figura 62 Patrón de precipitación para tres estaciones de Veracruz .....	58
Figura 63 Días con lluvia para estaciones en el norte de Veracruz.....	59
Figura 64 Dinámica forestal 2006.....	68
Figura 65 Dinámica forestal 2010.....	68
<b>Cuadros</b>	
Cuadro 1 Resumen de datos .....	31

## **Dedicatoria**

**A la memoria de los abuelos, Conchita y Palemón**

**A mis papás, María y Ernesto**

por su eterno apoyo, respaldo y comprensión en los caminos de la vida

**A Vale**

que siempre nos ilumina

**A Joaquín**

por su comprensión, cariño y eterna paciencia

A mi familia y amigos

## **Agradecimientos**

A la **Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)**, por la educación gratuita y de calidad

Al **Instituto de Geografía (Igg)** por ser el espacio de desarrollo de este trabajo de investigación

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por la beca para realizar mis estudios de maestría

Al proyecto **PAPIIT IN106815 Análisis de flujo de humedad y lluvia en el Valle de México**

y al proyecto **PAPIIT IN112717 Riesgo climático en ambientes urbanos** a través de los cuales se logró concluir este trabajo de investigación.

A mi asesor, el Dr. **Víctor Magaña**, por ser mi **maestro**, por enseñarme a pensar, a cuestionar, a ser crítica. Por su paciencia, su apoyo y compartir su conocimiento. En especial, gracias por su locura.

Al **Dr. Ojeda**, por ser siempre un oasis, gracias por su apoyo en este proceso de aprendizaje.

A la **Dra. Naxhelli**, por su apoyo en la revisión de esta tesis, por su amabilidad y contagiar su energía.

A la **Dra. Frances** por su comprensión y apoyo en la revisión de este trabajo de investigación.

Al **Dr. Delgadillo** por su apoyo en la revisión de esta investigación.

Al **Jefe** por su apoyo y enseñanzas

A mis compañeros de cubículo, por su ayuda en la realización de esta tesis, por haber compartido su conocimiento, en especial a **Luis Galván** (velho).

A **Nuria y Gaby**, por su apoyo, su enseñanza y en especial su amistad

## Resumen

La atmósfera y la biósfera interactúan a través los intercambios bidireccionales de energía, humedad y momento. Esta dinámica puede alterarse al modificar las características físicas de la superficie, como son la rugosidad, la humedad del suelo y el albedo. Las transformaciones en el uso de suelo modifican estos elementos. Los cambios en la cobertura y el uso de suelo impactan el clima, de forma comparable a la que generan los llamados gases de efecto invernadero (Kalnai y Cai, 2003, Zhao et al, 2001). Por tanto, el cambio de uso de suelo es un elemento fundamental cuando se habla de cambio climático, pues es otro forzante climático, capaz de producir peligros para los socioecosistemas.

En esta investigación se analizaron los impactos de la deforestación en el departamento del Petén, sobre el clima, evaluando la respuesta en la temperatura y la precipitación. Hasta mediados del siglo XX el departamento del Petén en Guatemala se había caracterizado por la extensión del bosque tropical. Las migraciones hacia este departamento, iniciadas en la década de 1960 modificaron el paisaje, alterando los patrones climáticos.

En los resultados se mostró que el uso de suelo modula la magnitud del impacto en el clima. Regionalmente existe un aumento de la temperatura, sin embargo, en la zona en la Reserva Maya que no ha sido alterada, el aumento es considerablemente menor, en comparación con la Laguna del Tigre, o con la ciudad de Guatemala, que responde al proceso de urbanización. Este cambio de uso de suelo, ha mostrado los mayores impactos sobre el clima, al aumentar la temperatura.

Por otro lado, la atribución del cambio climático, al uso de suelo fue posible por la coherencia espacial y temporal del cambio en las tendencias de las variables, puesto que no respondió a un modelo exponencial; representan diferentes estados climáticos.

Finalmente, se incluye un capítulo con una síntesis histórico-social que explica las migraciones hacia el norte del país, que posteriormente provocaron la deforestación del Petén. El problema ambiental, delimitado inicialmente, se acerca a la totalidad del problema, al comprender que la deforestación, era respuesta la necesidad de tierras para uso agrícola.

Como conclusión, se enfatiza que el uso de suelo tiene un rol modulador en el cambio del clima de origen antrópico. La deforestación puede provocar una disminución en la precipitación y aumento de la temperatura. El enfoque geográfico (g. física y social), permite una aproximación a la totalidad de la problemática, y a sus posibles soluciones.

## Introducción

Los seres humanos han alterado el paisaje desde su aparición, pero lo han hecho de forma más intensa en épocas recientes, al transformar los ecosistemas naturales en áreas manejadas antropicamente. Este proceso, denominado cambio de uso de suelo, se debe esencialmente al crecimiento de la población humana y a una creciente demanda de bienes y servicios. Los nuevos ambientes, resultado de estas transformaciones, son denominados socioecosistemas. Hoy resulta claro que un ecosistema influye sobre el sistema social y viceversa, pues las actividades humanas afectan a los sistemas ecológicos (Scholz, 2011). Las transformaciones en el uso de suelo cambian las características físicas de la superficie, como la rugosidad, el albedo y la función hidrológica del suelo, elementos a través de los cuales la cobertura de la tierra modula el clima. El clima a su vez, produce cambios en dichos elementos en diversas escalas de tiempo. Por tanto, los cambios en la cobertura y el uso de suelo impactan el clima, de forma comparable a la que generan los llamados gases de efecto invernadero (Kalnai y Cai, 2003, Zhao et al, 2001). En consecuencia, el cambio de uso de suelo es un elemento fundamental cuando se habla de cambio climático, pues es otro forzante climático, capaz de producir peligros para los socioecosistemas.

El estudio de los ecosistemas terrestres y sus afectaciones por actividades humanas ha adquirido gran importancia en las ciencias del clima, al buscar mecanismos que expliquen las tendencias climáticas observadas a escala regional y local, es decir, forman parte de los ejercicios de atribución al cambio climático. Existen diversos estudios observacionales y con modelos que demuestran que cambios en el clima parecen coincidir espacial y temporalmente con cambios en la condición del paisaje. Por ejemplo, Sampaio et al., (2007) demostró que en la cuenca del Amazonas se observa un acelerado decremento de la lluvia al parecer relacionado con la deforestación de la zona. Así, la pérdida de árboles de vegetaciones general es uno de los cambios de uso de suelo que resulta más alarmante debido a la tasa con la que ocurre, especialmente en países tropicales en vías de desarrollo. Las principales actividades que inducen la deforestación son la expansión agrícola, la explotación forestal y la urbanización. Son cada vez más frecuentes los estudios, en donde se relaciona el nivel de vegetación con la precipitación y el ciclo hidrológico de las cuencas (eg, Sud et al., 1996).

Un ejemplo de cómo los cambios en el paisaje, relacionados a la deforestación inducen cambios en el clima se ubica en la región de Centro América, particularmente en Guatemala. La provincia de Petén, ubicada el norte de Guatemala, está esencialmente formada por bosque húmedo subtropical cálido y bosque muy húmedo subtropical cálido. En principio, se trata de un área protegida desde los años 1990, cuando se desarrolló bajo el modelo de reserva de la biosfera, implementado por la UNESCO, con el fin de proteger el bosque tropical, el cual cubre un 30% de la parte septentrional del

departamento. En esta zona son abundantes las lluvias, lo que la hace un ejemplo característico de zona tropical con lluvias intensas. Sin embargo, en décadas recientes comenzó un importante proceso de deforestación en Centroamérica (eg, Hayes, Sader, & Schwartz, 2002), incluyendo la zona del Petén. Luego del año 2000, la deforestación en la reserva de Petén se incrementa lo que parece haber impactado al clima, aumentando la temperatura ((Manoharan, Welch, & Lawton, 2009), (Aguilar et al., 2005)).

### **Tiempo y clima**

De manera tradicional, el tiempo meteorológico se define como la condición atmosférica presente o esperada en un lugar en un momento dado o en periodos de uno, dos o tres días. El clima, por otra parte, se asocia con la condición promedio de muchos estados de tiempo, en un lapso alrededor de treinta años. Sin embargo, tales conceptos están incompletos, porque el clima depende de un gran número de factores que interactúan de manera compleja (Rosálva Landa, Víctor O. Magaña Rueda, & Carolina Neri, 2008). Por ejemplo, el tiempo debe contemplar las inestabilidades en la atmósfera que puede generar una condición meteorológica adversa, por lo que su definición debe llevar a contemplar con especial interés, los casos de cambios rápidos. Por otra parte, el clima debe considerar valores medios, pero también la variabilidad y la actividad de eventos extremos en diversas escalas de tiempo. Para el mejor entendimiento del clima, éste debe ser representado por todas sus estadísticas, es decir por una función de distribución de probabilidad (Magaña, 2014).

La diferencia entre el valor de un parámetro meteorológico como la precipitación o la temperatura, con respecto de un valor promedio constituye lo que se llama una anomalía climática. Las desviaciones del clima con respecto al valor promedio son ocasionadas por forzamientos o forzantes climáticos internos y externos. Los primeros resultan de procesos como los relacionados con inestabilidades en la atmósfera y/o el océano (eg, El Niño); el forzamiento externo, está relacionado, por ejemplo, con cambios en la intensidad de la radiación solar recibida, o cambios en la composición de la atmósfera como los de las concentraciones de gases de efecto invernadero o los cambios en el uso de suelo resultado de la actividad humana.

El IPCC define al cambio climático como los cambios en el estado del clima que pueden ser identificados por cambios en el promedio y/o la variabilidad de sus propiedades y que persisten por un periodo de tiempo extendido, sean décadas o periodos más prolongados. Pero no basta con identificar cambios en el clima, por ejemplo, a través de cambios en la función de densidad de probabilidades de un parámetro, en lo que se conoce como **detección**. Es necesario entender las causas que originan ese cambio, para poder hacer una **atribución**. El cambio climático puede deberse a procesos naturales internos o forzantes externos naturales o de origen antrópico. Aunque existe

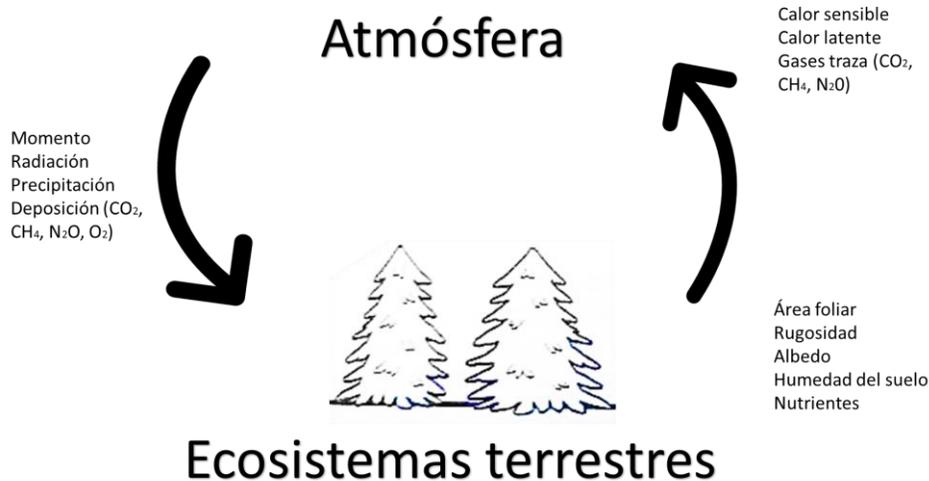
distinción entre los cambios por variabilidad natural y de origen antrópico, las atribuciones para estos dos procesos, no es sencilla.

Los estudios de atribución del cambio climático están enfocados en su mayoría al forzante radiativo incrementado por fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero. Dicho proceso genera calentamiento atmosférico cerca de la superficie. Sin embargo, aunado al proceso de calentamiento global ocurren cambios en el clima inducidos por otros factores. Por ejemplo, el cambio de uso de suelo, además de ser una fuente de emisión de partículas y de GEI, tiene impactos directos en el clima, debido al cambio en las propiedades físicas que determinan los intercambios de flujo de energía, humedad y momento entre la superficie y la atmósfera. Por ello, los análisis de detección de cambios en el clima deben ir de escalas locales a globales, diferenciando, los forzantes que inducen cada una, en un ejercicio de atribución.

### **Relación Biósfera – Clima**

Las interacciones entre la atmósfera y la biósfera, ocurren a través de retroalimentaciones en diversas escalas de tiempo, preferentemente largas (décadas). El clima afecta y determina el tipo de vegetación que puede existir en un determinado ecosistema (Dickinson, 1995), pero los cambios en las coberturas y usos de suelo, derivados de las actividades humanas, modifican el clima a través de las alteraciones en los intercambios de calor, humedad, gases residuales, aerosoles y momento (Pielke et al., 1998). Los efectos pueden evaluarse a través de cambios en procesos físicos (e.g., balance de agua, energía y momento) y bioquímicos (e.g, cambios en la proporción de gases traza).

John D. Aber (1995) propuso un modelo para entender los flujos de la superficie a la atmósfera, como los de calor sensible, latente o de gases traza. Estos dependen de las características de la rugosidad, la humedad del suelo, los nutrientes, el albedo y el área foliar. Al modificar alguna de estas características, puede existir un impacto en las aportaciones hacia la atmósfera y hacia la superficie, como la precipitación, la radiación, momento y deposición de gases. Al modificar alguna de estas partes, los procesos que ocurren entre todos los componentes, pueden verse alterados.



*Figura 1 Intercambios importantes entre la atmósfera y los ecosistemas terrestres.*

*(Tomado de J. D. Aber, 2005)*

Cuando existe una perturbación en la superficie terrestre, producida por ejemplo por cambios en la cobertura vegetal, se altera el balance de radiación (). Pero la dirección del proceso no es única, pues puede tratarse de un proceso no lineal en donde pueden producirse alteraciones en más de una dirección (Dickinson, 1995). Cambios en el clima inducen cambios en la condición de superficie que pueden considerarse afectaciones al paisaje (Figura 1). Así, los cambios en la superficie afectan el clima, y un clima alterado afecta el clima, en un proceso de retroalimentación con diversas escalas de tiempo, dependientes de la resiliencia del ecosistema.

### **Procesos**

Los mecanismos a través de los cuales, los cambios en la cobertura del suelo afectan el clima, incluyen los efectos de los cambios en el albedo, la rugosidad y la hidrología del suelo. Los esquemas explican las posibles consecuencias bajo dos escenarios, de retroalimentación positiva (+), y negativa (-), reforzando la perturbación inicial. Los cambios en los parámetros asociados con la deforestación son disminución de la rugosidad y la humedad del suelo disponible e incremento en albedo.

#### **a) Albedo**

El trabajo de atribuir un cambio en el clima a un forzante particular requiere analizar los procesos involucrados, en una secuencia plausible de condiciones subsecuentes. Cuando la deforestación reduce la rugosidad, es de esperarse que los vientos circulen con menor fricción y con ello, se registren mayores velocidades. Por otro lado, el albedo puede verse incrementado, lo cual puede registrarse mediante imágenes por satélite. Otra consecuencia de la deforestación puede ser que la infiltración

disminuya, llevando a escurrimientos incrementados que reducen la humedad que queda en el suelo, parámetro que puede medirse. En cada uno de los casos anteriores, el cambio en estos parámetros induce cambios en flujos de energía y masa que eventualmente se reflejan en algún aspecto del clima. Por ejemplo, al deforestar aumenta el albedo, y con ello decrece el calor latente y sensible, lo que puede provocar menor convergencia de humedad, menor nubosidad y disminución de la precipitación. Pero también es posible que al disminuir la insolación se incremente la radiación neta en superficie y con ello disminuya la estabilidad atmosférica, lo cual podría inducir mayor convergencia de humedad y con ello se regrese a precipitaciones intensas (Figura 2). En pocas palabras, en términos de cambios en el albedo, la deforestación podría inducir aumentos o disminuciones en la precipitación. Charney (1969), propuso en cierta ocasión que, asfaltando grandes superficies, el cambio en el albedo haría menos estable a la superficie y con ello se podría producir movimientos ascendentes que generaran convección y lluvia.

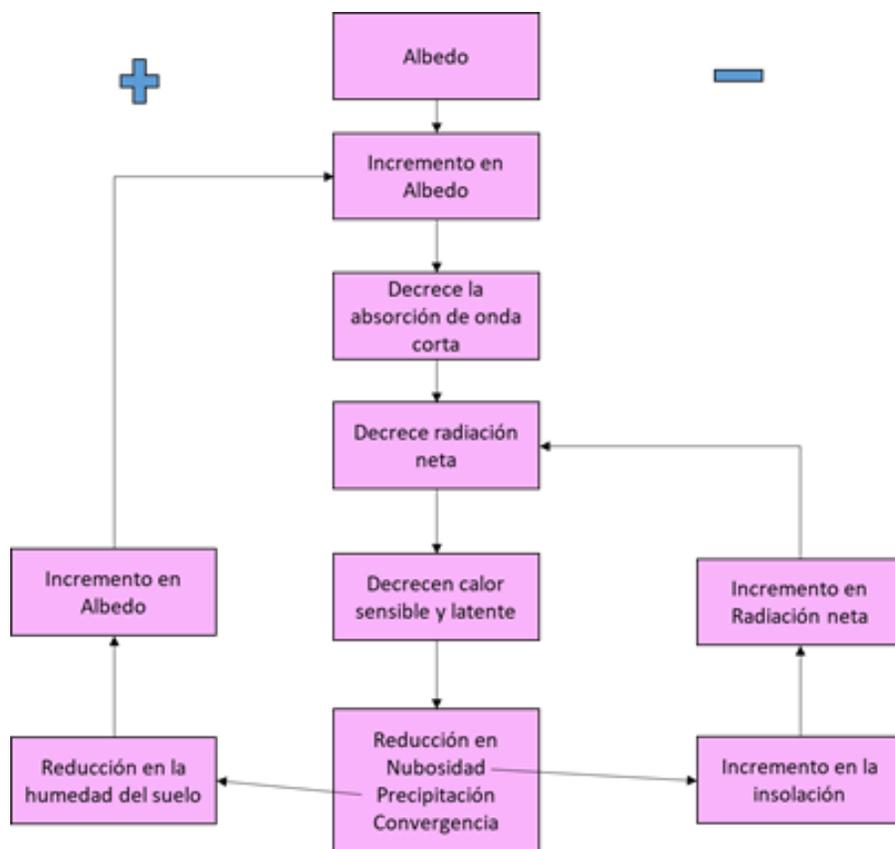


Figura 2 Cambio en albedo

## b) Humedad del suelo

La deforestación hace que la humedad del suelo disminuya (Figura 3) y con ello el flujo de calor latente, por lo que la radiación solar se aprovecha esencialmente para calentar la superficie y generar calor sensible, y en menor medida en evaporar. Al disminuir esta aportación de humedad a la atmósfera, disminuye la convergencia, la nubosidad y la precipitación. La radiación neta también disminuye la estabilidad, y permite mayor convergencia de humedad, lo que podría llevar a mayor nubosidad y precipitación.

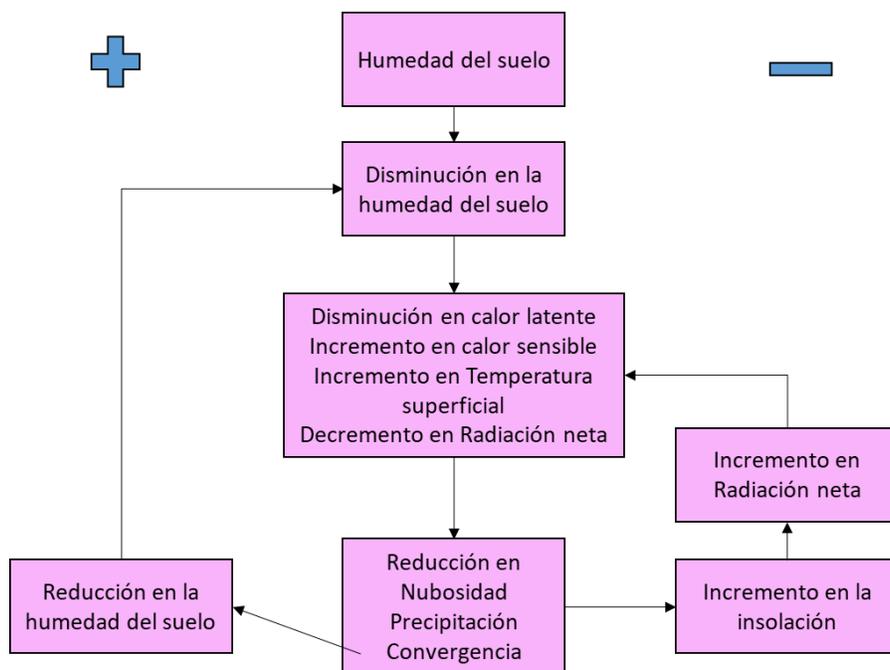


Figura 3 Cambio en humedad del suelo

## c) Rugosidad

Al cambiar la rugosidad de la superficie, puede decrecer la convergencia y la precipitación, al haber disminuido la fricción, provocando procesos de desertificación. Los flujos de humedad pueden ir a otras regiones al no encontrar la fricción que induzca convergencia y con ello puede producirse una disminución en las lluvias. Pero menos nubosidad podría eventualmente inducir mayor insolación y calentamiento que reduzca la estabilidad atmosférica y con ello favorecer la formación de nubes nuevamente. Así, si aumenta la temperatura cerca de la superficie, podría incrementarse la convergencia y la precipitación (Figura 4). Anthes, (1984) analiza cómo los procesos de deforestación en el mundo pueden llevar a disminución en las lluvias. Pero también muestra que existen formas de

incrementar la actividad convectiva en zonas áridas, mediante la reforestación con patrones espaciales particulares, que aumenten la fricción, la generación de circulaciones turbulentas y los desarrollos convectivos profundos, que lleven a más precipitación.

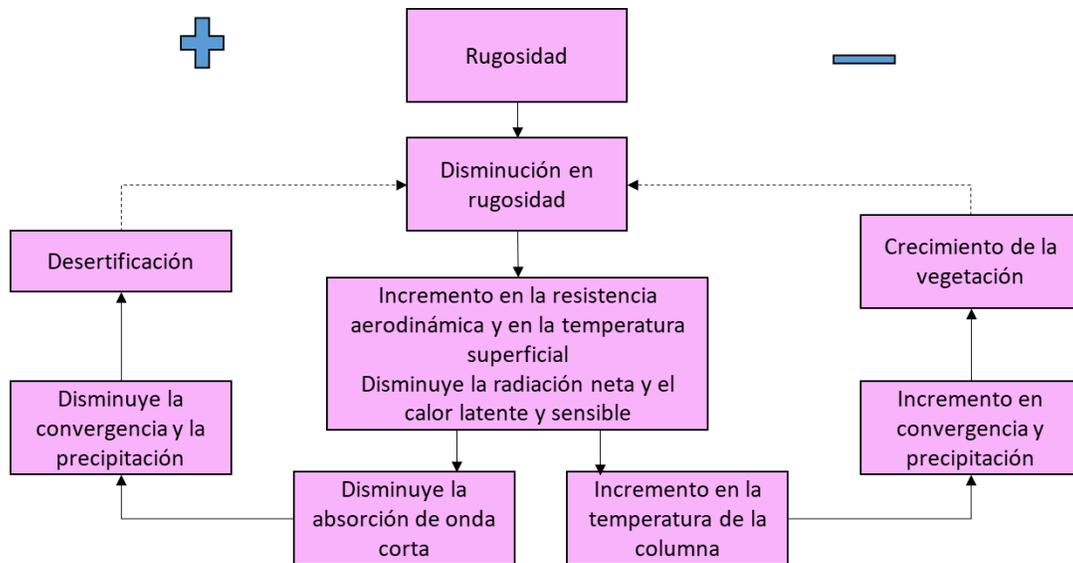


Figura 4 Cambio en rugosidad

La dinámica del clima con la vegetación no responde de una manera lineal. Pueden presentarse diferentes resultados y escenario como respuesta a los cambios en el uso de suelo. Por ello, entender los cambios locales es tan importante. Los cambios a escala global no pueden ser controlados o modulados, como aquellos a escala local. Lo anterior sugiere que las condiciones de superficie son fundamentales en el clima local, es incluso regional. El uso de casos de estudio ha sido práctica común en climatología para desarrollar ejercicios de detección y atribución de cambios en el clima.

### Impactos de la deforestación

Como se ha mencionado, los usos de suelo determinan las características de la superficie y esto influye en los intercambios de energía, humedad y momento hacia la atmósfera y viceversa. Una aproximación al entendimiento de esta dinámica, es propuesta por Foley, Costa, Delire, Ramankutty, & Snyder, (2003), en un modelo con dos escenarios contrastantes, uno considera los procesos que ocurren con la existencia de cobertura vegetal y el otro bajo un proceso de deforestación. En las áreas cubiertas de vegetación (izquierda), la radiación que llega a la superficie es utilizada en mayor parte para que las plantas puedan fotosintetizar y evapotranspirar, y en menor proporción esta energía se utiliza para calentar la superficie por lo tanto el valor del albedo es bajo. El flujo de calor latente

aporta humedad a la atmósfera, aumentando la probabilidad de lluvias. Sin embargo, este proceso depende de otros factores, como la estabilidad de la atmósfera, el ciclo hidrológico, etc.

En las áreas deforestadas (derecha), el suelo desnudo absorbe menos radiación, aumentando la reflexión y, por ende, el albedo. Ya que no existe cobertura vegetal, se reduce el flujo de calor latente y se recicla menos agua, pues se está reduciendo el mecanismo que aporta humedad a la superficie. La superficie se calienta, ya que no tiene medios para eliminar el exceso de energía a través de la transpiración, es decir, calor latente. Se asume que la deforestación tropical a gran escala probablemente causará un aumento considerable de la temperatura superficial y una disminución en la precipitación anual y evapotranspiración (Bonan G. B., 2002). En general, al substituir un bosque tropical con pastizal, se espera un incremento en el albedo y disminución de la rugosidad y del índice de área foliar (Costa & Foley, 2000).

Existen otros elementos y factores que pueden considerarse, para aproximarse a lo que ocurre en la realidad, el esquema propone un modelo para entender en general cómo cambian los procesos de intercambio en función de la superficie.

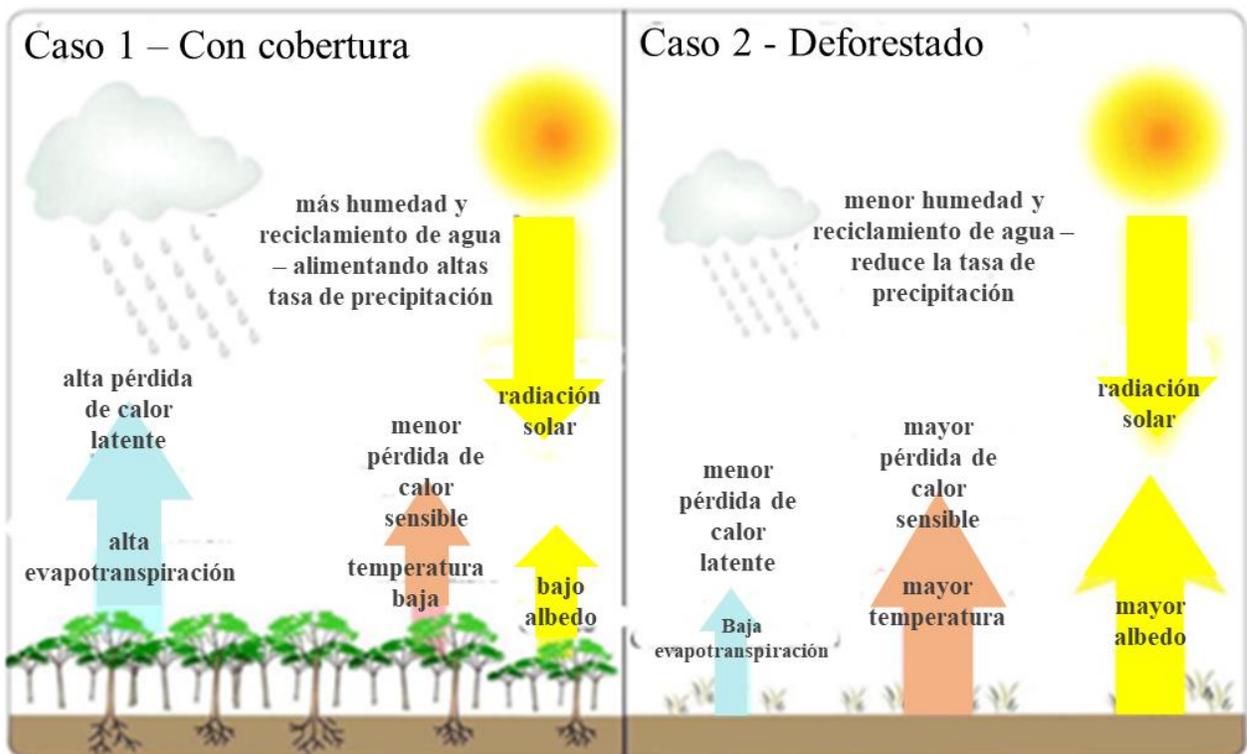


Figura 5 Efecto climático de la deforestación. Tomado de Foley

## Deforestación en trópicos

Hasta finales del siglo XIX la deforestación se concentró en las regiones templadas del mundo mientras que actualmente se concentra en los trópicos, especialmente en América del Sur y en África. Durante el periodo de 2000 a 2010 se perdieron 7 millones de hectáreas por año mientras que las áreas agrícolas incrementaron en 6 millones de hectáreas (FAO, 2016). Las regiones tropicales han experimentado cambios a causa de la rápida expansión demográfica, con la consiguiente demanda creciente de tierras agrícolas y combustibles de madera, con la fuerte presión asociada sobre los recursos naturales para impulsar el crecimiento y el desarrollo económico o, en algunas regiones, la inestabilidad política y conflictos (Drigo, 2005).

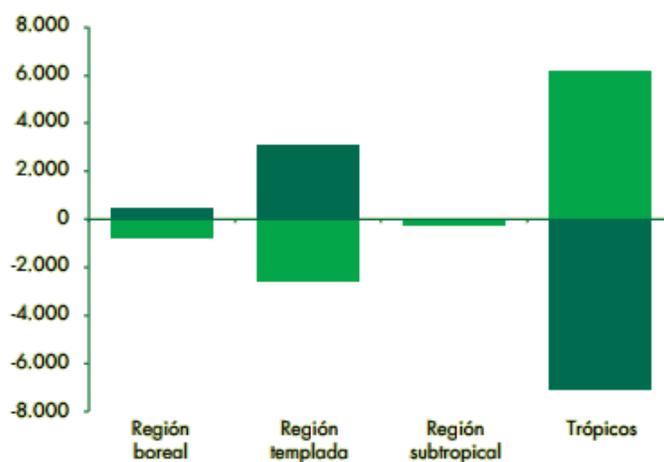


Figura 6 Deforestación. Fuente: FAO

En América Latina tropical, una de las regiones con mayores tasas de deforestación, las tierras utilizadas para el pastoreo extensivo han aumentado continuamente durante las últimas décadas y la mayor parte de este aumento ha sido a expensas de los bosques (Kaimowitz & Angelsen, 2008). El proyecto Global Forest Change, de la Universidad de Maryland, hace un análisis de series de tiempo con imágenes Landsat, generando un producto para identificar el cambio forestal en todo el mundo. El área de América Central es de gran interés por los patrones de deforestación. (Figura 7).

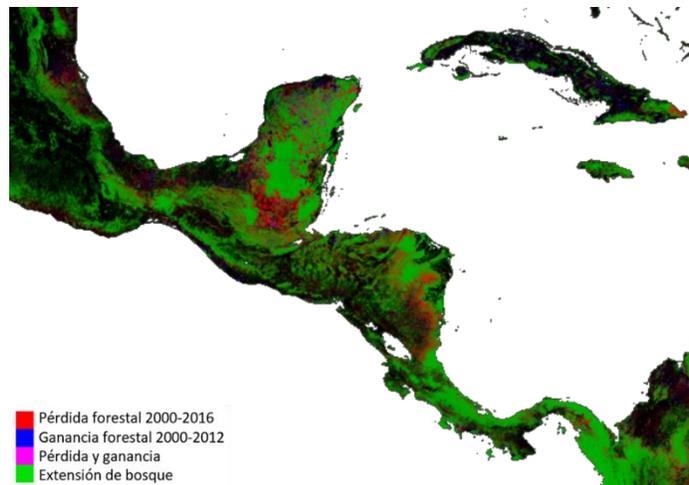


Figura 7 Cambio en cobertura forestal en Centroamérica. Fuente: Global Forest Change

Por otro lado, Achard (et al., 2002) hace un recuento de algunos países “hot spots”, con altas tasas de deforestación, incluyendo a Guatemala y en específico al departamento del Petén. Ambos estudios, identifican a Guatemala con graves problemas de deforestación.

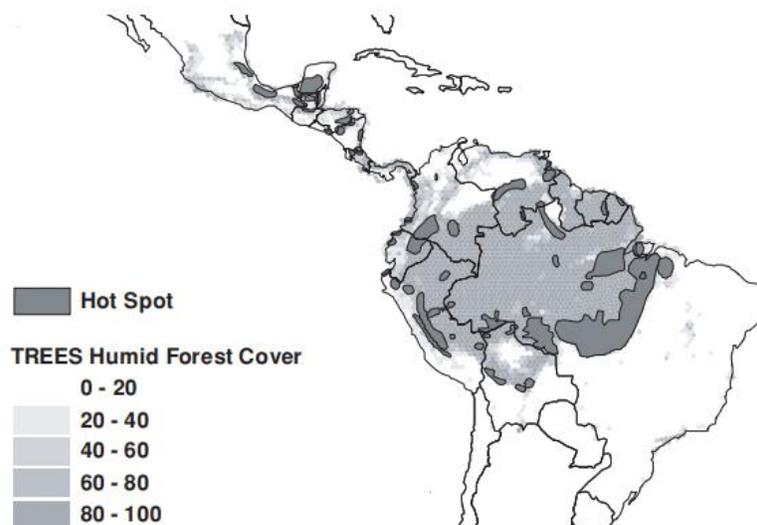


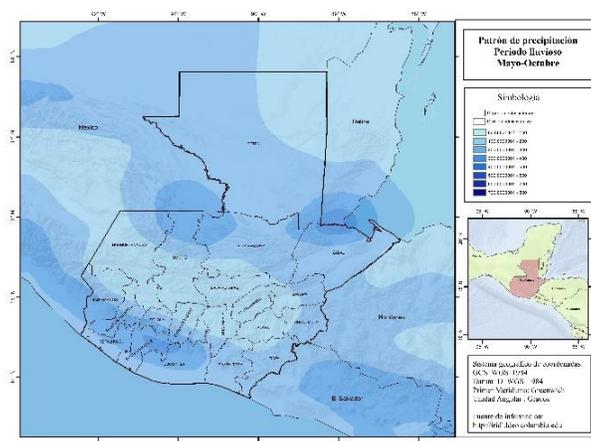
Figura 8 Localización de las Hot-Spot de deforestación. Fuente: Achard et al, 2008



una de las causas de la deforestación que, pese a los programas de manejo forestal del país, no se ha controlado.

### **El clima en Guatemala**

En muchas regiones tropicales y subtropicales existe una temporada de lluvias y una de secas. La época lluviosa en Guatemala inicia en mayo y termina entre los meses de agosto y septiembre (Manoharan, 2009).



*Figura 10 Patrón de lluvia mayo-octubre. Elaboración propia a partir de datos CMORPH*

### **Flujos de humedad: condiciones sinópticas**

Existen fenómenos atmosféricos de gran escala que afectan las condiciones climáticas de Guatemala, que corresponden a la variabilidad natural. Entre los más importantes son la zona intertropical de convergencia, El Niño y las oscilaciones AMO y PDO.

### **ZITC**

La zona intertropical de convergencia intertropical (ZITC) es una región de baja presión orientada de este a oeste cerca del ecuador donde se encuentran los vientos alisios de la superficie del noreste y sureste. A medida que estos vientos convergen, el aire húmedo se fuerza hacia arriba, produciendo cúmulos y una fuerte precipitación. Estas nubes ocurren en masas dispersas de unos 100 km de ancho. Entre estas nubes espaciadas al azar se encuentran las ondas de escala sinóptica que se mueven de este a oeste; ellos son conocidos como las olas del este. Dentro de ITZC, los vientos son a menudo ligeros y variables tanto en velocidad como en dirección. La ZCIT se desarrolla más claramente en los océanos tropicales (en el Pacífico oriental y el Atlántico). Es la característica climática más prominente en los trópicos y juega papeles principales en el clima tropical al interactuar con las

circulaciones de la atmósfera y el océano a escala planetaria (Yan, 2005). La variación de esta zona afecta los patrones de precipitación en Guatemala.

## **Variabilidad: ENSO y AMO, PDO**

### **ENSO**

El Niño se refiere al fenómeno climático oceánico-atmosférico a gran escala vinculado a un calentamiento periódico en las temperaturas de la superficie del mar a través del Pacífico ecuatorial central y este-central. El Niño representa la fase cálida del ciclo, es referido a veces como un episodio caluroso del Pacífico. El Niño se refirió originalmente a un calentamiento anual de las temperaturas de la superficie del mar a lo largo de la costa oeste de Sudamérica tropical. Durante un fenómeno de El Niño o La Niña, los cambios en las temperaturas del Océano Pacífico afectan los patrones de lluvias tropicales desde Indonesia hasta la costa occidental de América del Sur. Se debe decir que la ocurrencia de El Niño o La Niña no es periódica, en otras palabras, no ocurre un evento de este tipo cada cierto número de años. Por otro lado, a un evento El Niño no sigue necesariamente uno La Niña o viceversa (Magaña, 1999).

### **AMO**

La Oscilación Multidecadal Atlántica (AMO) es una serie de variaciones en las temperaturas de la superficie del mar (TSM) en el Atlántico Norte, que duran varias décadas. Las observaciones de este patrón se remontan a 150 años. En la década de 1990 se ha observado que a medida que las TSM en esta región aumentaron, aumentó la actividad de los huracanes en el Atlántico. La tendencia de la temperatura de un siglo para las TSM en el océano Atlántico y a nivel mundial ha sido al alza.

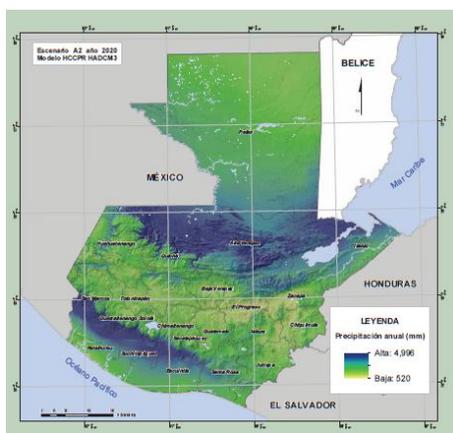
### **PDO**

La Oscilación Decenal del Pacífico (DOP) es un patrón de variabilidad climática centrado en el Océano Pacífico Norte. Durante la fase positiva (cálida) de la DOP, las temperaturas superficiales del mar tienden a ser superiores al promedio a lo largo de la costa oeste de América del Norte y en el Pacífico tropical oriental; mientras que a través del Pacífico Norte central son más frías que la media. Los patrones opuestos ocurren durante la fase negativa (fría). Cada fase generalmente persiste de 20 a 30 años. Predominó una fase cálida desde finales de los años setenta hasta alrededor de 2000, y desde entonces la PDO se está moviendo hacia condiciones más frías. La PDO puede estar relacionada con ENOS, pero difiere principalmente porque la escala de tiempo para la PDO es mucho más larga (varias décadas) y porque la PDO involucra más claramente al Pacífico extratropical y el sistema Aleutiano de baja presión.

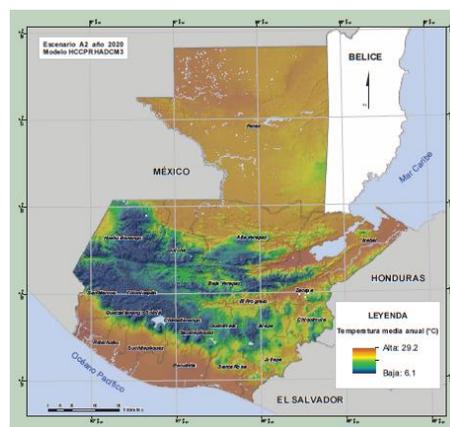
## Comunicaciones de Guatemala

Guatemala cuenta con dos comunicaciones de cambio climático, en donde genera escenarios con diferentes emisiones de gases de efecto invernadero e incrementos en la temperatura. Las comunicaciones tratan la dinámica de la atmosfera – biósfera, en un sentido direccional, donde el clima afecta a la superficie terrestre y cómo esta, podría adaptarse. La afectación al sector forestal indica que podrían cambiar las zonas de distribución de diferentes especies. Consideran que los recursos forestales más vulnerables son los bosques de coníferas que experimentan una reducción de su extensión como consecuencia de un aumento de la zona seca. Y se espera disminución en la productividad de productos forestales, con lo cual podría extenderse el uso agrícola. Para reducir las emisiones en recursos forestales se plantea el mantenimiento de las reservas de carbono a través de las protección y conservación de bosques, incremento de la eficiencia del manejo forestal y de la cobertura boscosa, así como la implementación de sistemas de agroforestería. Un punto a discusión es la propuesta de aumentar la oferta de productos forestales, lo cual no es factible bajo el esquema actual de deforestación. Un punto importante que considera es el ordenamiento del uso de suelo y la disminución de los cambios de uso de suelo.

Las tendencias para Guatemala bajo escenario de cambio climático son, disminución en la precipitación y aumento de la temperatura, impactando a los ecosistemas boscosos.



*Figura 11 Escenario de cambio en precipitación*



*Figura 12 Escenario de cambio en temperatura*

## Población

La sociedad guatemalteca es pluricultural, pluriétnica y multilingüe, conformada por cuatro grupos étnicos (mayas, xinca, garífuna y ladina) y 23 comunidades lingüísticas. Para el año 2006 los pueblos indígenas representaban más de la mitad de la población de Guatemala (63%). La mayoría de la

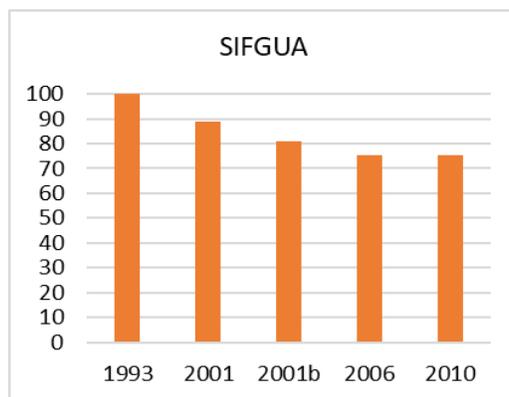
población vivía en zonas rurales (54%), no obstante, el resto de la población (46%) se encontraba asentada en la urbe (Ziegler, 2006). En el año 2002 Guatemala tenía 11.237 millones de habitantes y se estima que para el 2015, la población ha aumentado a 16 millones (2da comunicación, 2015). la tasa de crecimiento anual de la población es de 2.4% (2010 – 2015), una de las más altas de América Latina. Tiene la escolaridad más baja de Centroamérica. El analfabetismo es del 25.19% en los hombres y en las mujeres 29.9% (INE, 2006).

La desnutrición crónica en el área rural (58.6%) es mayor de la que se encuentra en el área urbana (34.3%). Las regiones que presentan niveles más altos de desnutrición crónica son la Noroccidente y la Norte, con 70.8 y 59.4%, respectivamente. La desnutrición crónica es casi el doble en los niños y niñas indígenas, 65.9% que, en los niños y niñas no indígenas, 36.2%.

El Índice de Desarrollo Humano (IDH) representa el impulso de una definición más amplia del bienestar y ofrece una medida compuesta de tres dimensiones básicas del desarrollo humano: salud, educación e ingresos. Entre 1980 y 2011 el IDH de Guatemala creció en un 0.95% anual, pasando desde el 0.428 hasta el 0.574.

### **Datos de deforestación en Guatemala**

Los datos de deforestación en Guatemala son diversos, algunos tratan de mostrar escenarios más optimistas. La tendencia en general muestra que la cobertura boscosa en el país sigue disminuyendo. Se seleccionó al 1993 como año base con datos del Sistema de Información Forestal de Guatemala. Para la siguiente década, la cobertura había disminuido un 20%, y para el año 2010 se había perdido aproximadamente 1/3 parte de la cobertura que existía 20 años atrás. Los datos corresponden a la cobertura forestal de todo el país.



*Figura 13 Perdida de cobertura forestal.. Fuente: SIFGUA*

Por otro lado, FAO a través de los reportes del estado de los bosques reporta los siguientes datos, siendo el 1990 año base. La década siguiente se reporta una pérdida de casi 20% de la cobertura.

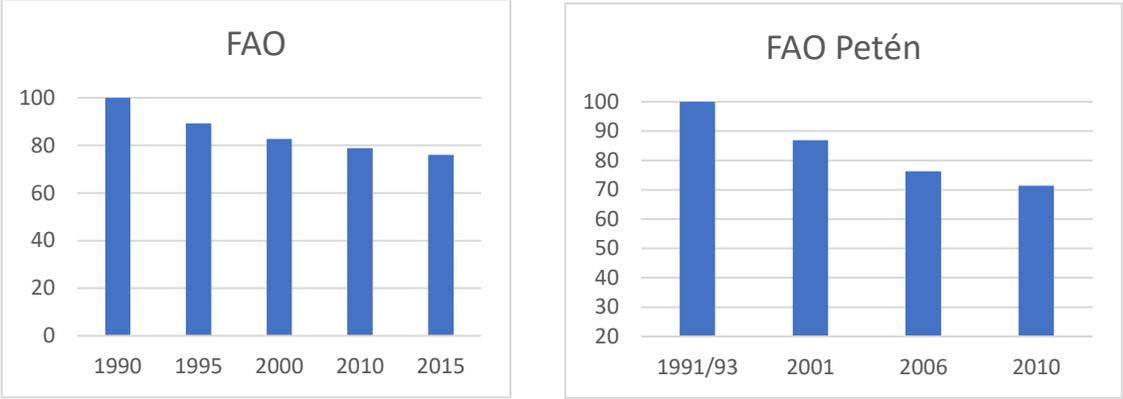


Figura 14 Cobertura forestal datos FAO. Guatemala y Petén.

El Petén reporta una pérdida de aproximadamente el 30% de la cobertura que reportaba la década de 1990. La tasa de pérdida en el Petén es mayor que el promedio nacional.

## Justificación

### Guatemala: un problema social, económico y ambiental

En Guatemala, el proceso de transición de una sociedad gobernada por una dictadura a un gobierno democrático indujo cambios en la sociedad y su economía que se tradujeron en diversas formas de aprovechamiento de sus recursos naturales. La región del Petén representaba una gran reserva de bosque. La creciente movilización de los pobres ha obrado como catalizador de los procesos de cambio de uso de suelo. Los desplazamientos de poblaciones dentro de Guatemala, El Salvador y Nicaragua hacia otros países del istmo han sido masivos. Como resultado de los conflictos armados y de la crisis económica, durante los años ochenta se desplazó aproximadamente el 14% de la población de esos tres países (véase el Mapa 2).



Figura 15 Fuentes: USAID Country Environmental Profiles

Según Loening et al. (2003), la cobertura forestal total de Guatemala se redujo del 65% al 26% durante la segunda mitad del siglo XX (1950-2000). Las tasas de deforestación fueron especialmente altas en los años noventa (1,7% anual) (Carr, 2009), donde la mayor parte de la deforestación puede atribuirse directamente a la migración fronteriza rural por ganaderos y a los agricultores de subsistencia (Carr, 2004) que con frecuencia convierten sus tierras agrícolas en pastizales, después de unos años de cultivo (Sader, Sever, Smoot, & Richards, 1994). La extrema concentración de los terrenos y el subempleo, combinado con la alta tasa de fecundidad del país, ha llevado a una fragmentación de las parcelas agrícolas guatemaltecas y a la pobreza rural, estimulando así la emigración rural hacia las ciudades, destinos internacionales y la frontera boscosa (Bilsborrow y Stupp, 1997).

## **Hipótesis**

Las modificaciones en las características del paisaje, tales como la deforestación, inducen cambios localizados el clima, con coincidencias espaciales y temporales, que permiten hacer la atribución de una forma de cambio climático de origen antrópico.

## **Objetivo General**

Mostrar que los cambios en el uso de suelo (eg, deforestación) generan cambios en el clima (eg reducción en la lluvia) a escala local e incluso regional, en lo que es una forma de cambio climático de origen antrópico de gran impacto.

## **Objetivos específicos**

- Desarrollar una aproximación metodológica para estudios de atribución de cambio climático.
- Presentar un ejemplo (El Petén, Guatemala) en el que las componentes físicas (ambiental), social y económica en un socioecosistema interactúan con impactos en la población, resultando un caso de estudio conjunto para la Geografía Física, Social y Económica.

La tesis está estructurada en cinco capítulos. En el Capítulo 1 se da una breve descripción de las interacciones entre la vegetación y la atmósfera. El capítulo 2 describe a la región del Petén, y a los datos y metodología utilizados. En el capítulo 3 se muestran los resultados de los cambios en el clima. En el capítulo 4 se describen las condiciones sociales que ocasionaron la deforestación en la región del Petén. En el capítulo 5 se concluyen y discuten los resultados obtenidos y las propuestas para trabajo futuro.

## **Datos y Metodología**

### **Datos**

Se utilizaron productos de uso de suelo para validar el patrón espacial de cambio de uso de suelo. Los datos climáticos utilizados, son derivados de estimaciones satelitales. Las estaciones no cubren el periodo de interés, se utilizaron como referente para elegir la fuente de datos estimados, con mayor similitud.

### **Precipitación**

La base de datos (PRECL) se construyó para el período 1948 y 2000 mediante la interpolación de observaciones de gauge utilizando el algoritmo OI (Chen, Xie, Janowiak, & Arkin, 2002). Se usaron dos conjuntos de observaciones de pluviómetro de precipitación mensual para construir el análisis. Uno es el conjunto de datos GHCN2, (Peterson y Vose 1997) y el otro es el conjunto de datos CAMS (Ropelewski et al., 1985).

### **Temperatura**

Los datos mensuales de temperatura de la superficie media terrestre global fue desarrollado por el Centro de Predicción Climática (Fan & van den Dool, 2004), tiene una resolución de  $0.5 \times 0.5^\circ$  y cubre el período de 1948 – 2017. Esta base de datos combina dos conjuntos de datos individuales de observaciones de estaciones recopiladas de la Global Historical Climatology Network versión 2 y el Climate Anomaly Monitoring System (GHCN + CAMS).

### **Uso de suelo**

Se obtuvo información del producto “Global Land 30”, derivado de imágenes del satélite Landsat y HJ-1, realizado por la Agencia China. Los conjuntos de datos GlobeLand30 están disponibles gratuitamente y comprenden diez tipos de uso de suelo incluyendo los bosques, superficies artificiales y humedales, etc., para los años 2000 y 2010. Las imágenes Landsat TM / ETM + fueron seleccionadas como la fuente de datos primaria para los dos años de referencia de 2000 y 2010. Las imágenes del satélite chino de medio ambiente y desastre (HJ-1) también se utilizaron como datos complementarios para el año 2010, ya que tienen similares al sensor Landsat TM / ETM + en términos de banda espectral y resolución espacial (Hu et al., 2014).

### **Global Land Cover 30**

Las imágenes de 30 m de detección remota fueron seleccionadas para asegurar una cobertura global óptima y una mínima contaminación de las nubes y de tal manera que fueron capturadas dentro de la

vegetación local. El uso de imágenes satelitales para el monitoreo de cambios en la superficie, supone una herramienta muy importante.

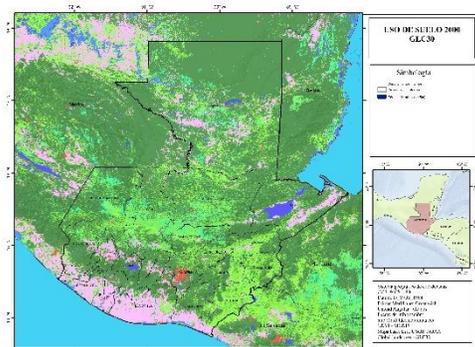


Figura 16 Uso de suelo 2000

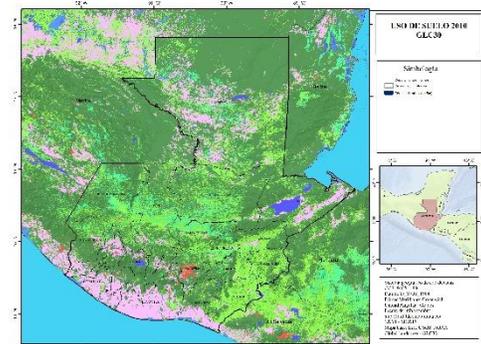


Figura 17 Uso de suelo 2010

## NDVI

Un índice de vegetación es un indicador que describe el verdor (la densidad relativa y la salud de la vegetación) para cada elemento de imagen, o píxel, en una imagen de satélite. En particular el NDVI es especialmente útil para el monitoreo de la vegetación de escala continental a escala global, ya que la resolución puede compensar las diferentes cambiantes condiciones de iluminación. Cuando se analiza a través del tiempo, el NDVI puede revelar dónde está prosperando la vegetación y dónde está bajo estrés, así como los cambios en la vegetación debido a actividades humanas como deforestación, disturbios naturales como incendios forestales o cambios en el estado fenológico de las plantas.

Los valores de NDVI varían desde +1.0 a -1.0. Las áreas de roca estéril, arena o nieve generalmente muestran valores muy bajos de NDVI (por ejemplo, 0.1 o menos). La vegetación escasa, como los arbustos y las praderas o los cultivos en senescencia, puede dar lugar a valores moderados de NDVI (aproximadamente 0,2 a 0,5). Los valores altos de NDVI (aproximadamente 0.6 a 0.9) corresponden a vegetación densa como la que se encuentra en bosques templados y tropicales o cultivos en su etapa de mayor crecimiento. Aunque el índice puede ser calculado utilizando las imágenes satelitales, se prefirió utilizar el producto NDVI derivado de MODIS, compuesto de 15 días, que va del 2001 al 2016, versión 005 SNA del USGS. El problema con las imágenes satelitales es la nubosidad.

*Cuadro 1 Resumen de datos*

Identificador	Nombre de la variable	Descripción	Unidad de medición	Resolución		Rango temporal
				Temporal	Espacial	
Pcp	Precipitación	Precipitación acumulada mensual estimada	mm	mensual	0.5°	1950-2016
Temp	Temperatura	Temperatura media mensual estimada	°C	mensual	0.5°	1950 - 2016
NDVI	Índice de vegetación	Es el índice de vegetación normalizado	Dato normalizado entre -1 y 1	Compuestos de 15 días	260 m	2001-2016
CUS	Cambio de uso de suelo	Mapa de uso de suelo	Clasificación de usos:		30 m	2000 y 2010

## **Metodología**

Se utilizaron los productos del “Global Land30” para identificar las áreas representativas de los cambios de uso de suelo. Para cada área se extrajeron series de tiempo de temperatura, precipitación y NDVI, que fueron filtradas y evaluadas a través de análisis de tendencias e histogramas, como se describe a continuación.

### **Series de tiempo**

Para cada área se extrajeron series de tiempo y se analizaron para identificar tendencia, ciclicidad, estacionalidad, irregularidad, o una combinación de estos comportamientos. La tendencia es el patrón a largo plazo de una serie temporal, puede ser positiva, negativa o estacionaria en la media. Cualquier patrón que muestre un movimiento hacia arriba y hacia abajo alrededor de una tendencia dada se identifica como un patrón cíclico. La duración de un ciclo depende del tipo de dato que se analiza. Por otro lado, la estacionalidad ocurre cuando la serie temporal muestra fluctuaciones regulares durante el mismo mes (o meses) cada año.

### **Filtros**

El análisis de series de tiempo de los datos climáticos incluyó un filtro, para facilitar la observación de tendencias. La función de un filtro es resaltar datos con características particulares. Los filtros “pasa baja” suavizan los datos para extraer una señal de baja frecuencia, eliminando el ruido o la variabilidad de alta frecuencia. Por ello, se utilizó la media móvil para limpiar las señales y eliminar el ruido, utilizando la siguiente fórmula:

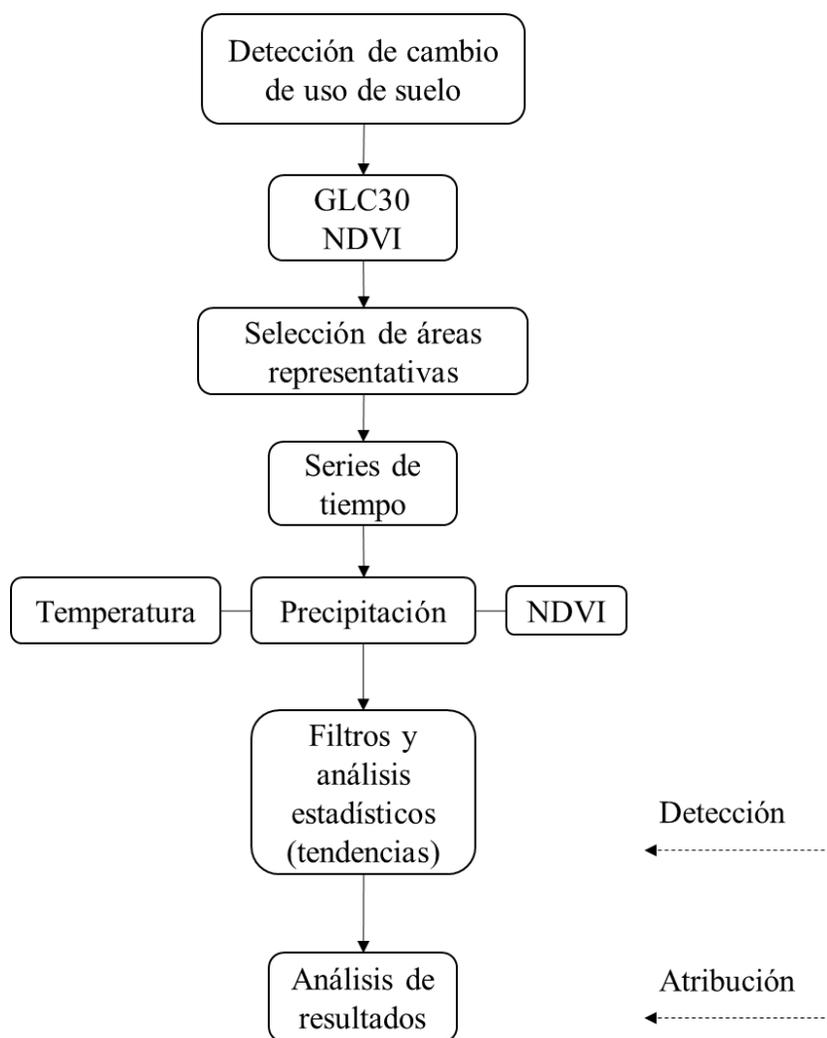
$$y(n) = \frac{1}{4}x(n) + \frac{1}{4}x(n-1) + \frac{1}{4}x(n-2) + \frac{1}{4}x(n-3)$$

### **Análisis de tendencias Mann-Kendall**

Se utilizó la prueba no paramétrica estacional Mann-Kendall con una periodicidad de 12 meses y un nivel de significancia del 5%. La hipótesis nula ( $H_0$ ) indica que no existe tendencia en la serie de datos, la hipótesis alternativa ( $H_a$ ) indica que si existe. Cuando el valor-p es menor al valor de Alpha (0.05), se rechaza la hipótesis nula y se hace una segunda evaluación para determinar si la tendencia es positiva o negativa.

## Función de densidad de probabilidad (histogramas)

La gráfica de distribución de datos o histograma, muestra la acumulación o tendencia, variabilidad o dispersión y la forma de distribución. Se recomienda para variables continuas, que se agrupan en clases, que deben ser de igual tamaño.



## Resultados:

Fue posible detectar en las series de tiempo de las variables climáticas, el impacto del cambio de uso de suelo. Por tanto, se atribuye al uso de suelo local la modulación de la magnitud de los cambios en el clima.

### Tendencia en NDVI

Para el año 1980 (Figura 18), visualmente se observa un patrón de mayor verdor comparado con el abril del 2016 (Figura 20), donde se muestra un cambio espacial en el Parque Laguna del Tigre dentro de la Reserva Maya. Los cambios más importantes reportados para la reserva, son en décadas recientes.

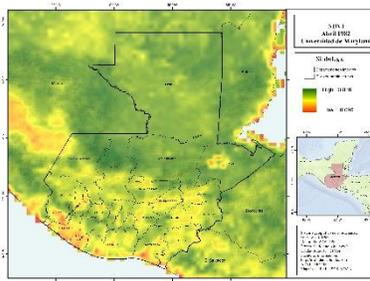


Figura 18 NDVI abril 1980

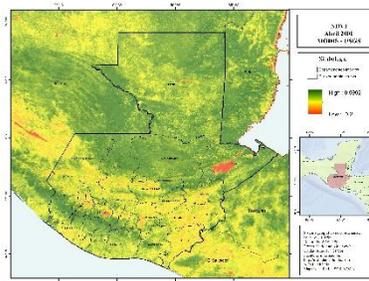


Figura 19 NDVI abril 2001

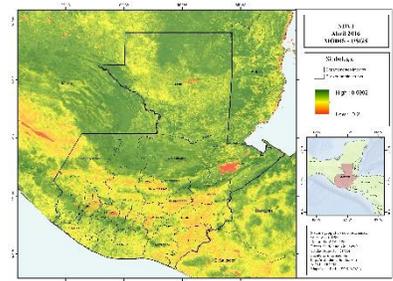


Figura 20 NDVI abril 2016

Se generó el NDVI para los meses de abril y septiembre por quinquenios para el periodo 2001-2016. Visualmente se observa una tendencia a la disminución del índice de verdor. En la comparación de los quinquenios inicial y final se contrastan las áreas que han perdido verdor y se supone que serían las áreas donde se ha reducido la cantidad de vegetación. Las áreas que se observan de color amarillo en el oeste de la Reserva Maya, corresponden a usos de suelo agrícola. Las áreas de mayor verdor conservan coberturas boscosas.

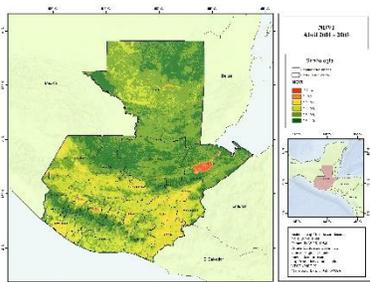


Figura 21 NDVI abril  
quinquenio 1: 2001-2005

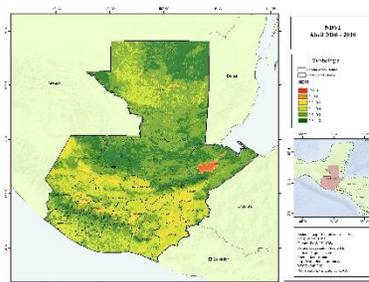


Figura 22 NDVI abril  
quinquenio 2: 2006-2010

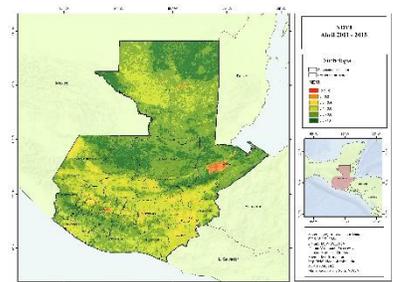
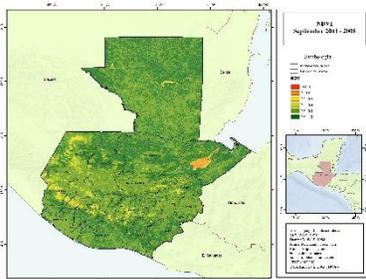


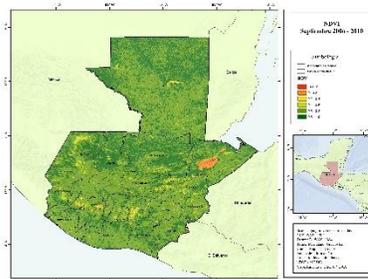
Figura 23 NDVI abril  
quinquenio 3: 2011-2015

Para el mes de septiembre, el primer quinquenio (Figura 24), los valores de NDVI en la Reserva Maya y el centro del Petén tenían una variación espacial fragmentada, con valores entre 0.6 y 1. El quinquenio 2 (Figura 25), comienza a definir el patrón de aumento de valores de 0.6 a 0.8 y finalmente el quinquenio 3 (Figura 26), define un cambio en la zona del Parque Nacional Laguna del Tigre. Presenta un valor de NDVI de 0.6 a 0.8 pero es menor comparada a la que se observa en la Reserva Maya que no ha sido deforestada.



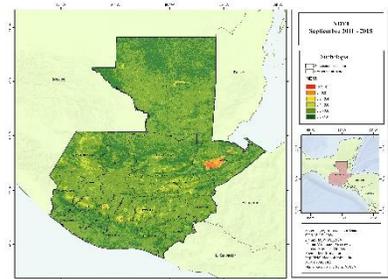
*Figura 24 NDVI*

*septiembre quinquenio 1:  
2001-2005*



*Figura 25 NDVI*

*septiembre quinquenio 2:  
2006-2010*

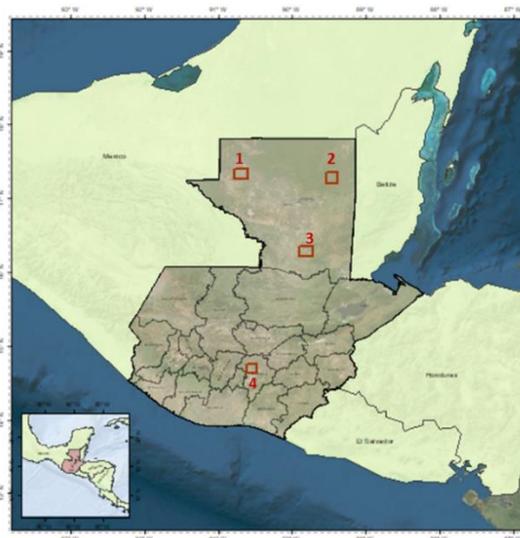


*Figura 26 NDVI*

*septiembre quinquenio 3:  
2011-2015*

### Áreas representativas

Se seleccionaron cuatro áreas representativas. El polígono localizado en el Parque Nacional Laguna del Tigre (1) fue deforestado posterior al año 2000. La zona de la Reserva Maya (2) conserva la cobertura de bosque tropical. El Petén (3), es un área de uso agrícola, cuyo proceso de deforestación ocurrió desde 1960. La Ciudad de Guatemala (4) representa el uso de suelo urbano.



*Figura 27 Áreas representativas*

## **Cambio de uso de suelo en Ciudad de Guatemala**

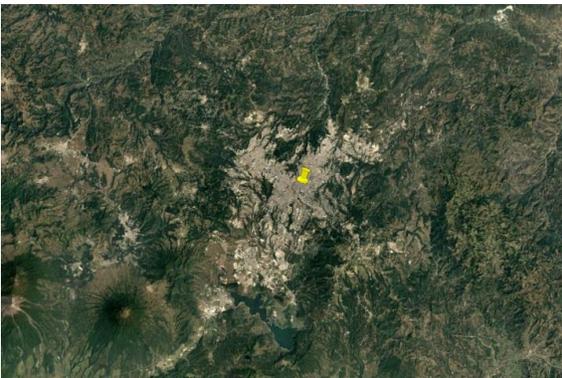
La ciudad de Guatemala ha crecido constantemente, ya que las migraciones hacia este departamento continúan.



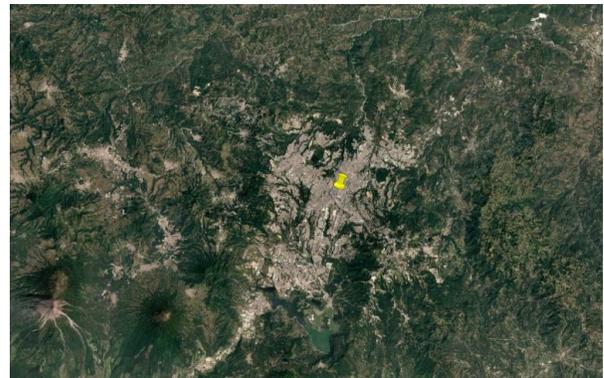
*Figura 28 Ciudad de Guatemala 1990*



*Figura 30 Ciudad de Guatemala 2010*



*Figura 29 Ciudad de Guatemala 2000*



*Figura 31 Ciudad de Guatemala 2016*

## NDVI en la Ciudad de Guatemala

Los datos de NDVI son derivados de compuestos de 15 días. El comportamiento en alta frecuencia es ruido. La línea roja representa al índice después de ser filtrado. Aunque el periodo de análisis es corto, se observa un cambio en la amplitud de índice, posterior al año 2005.

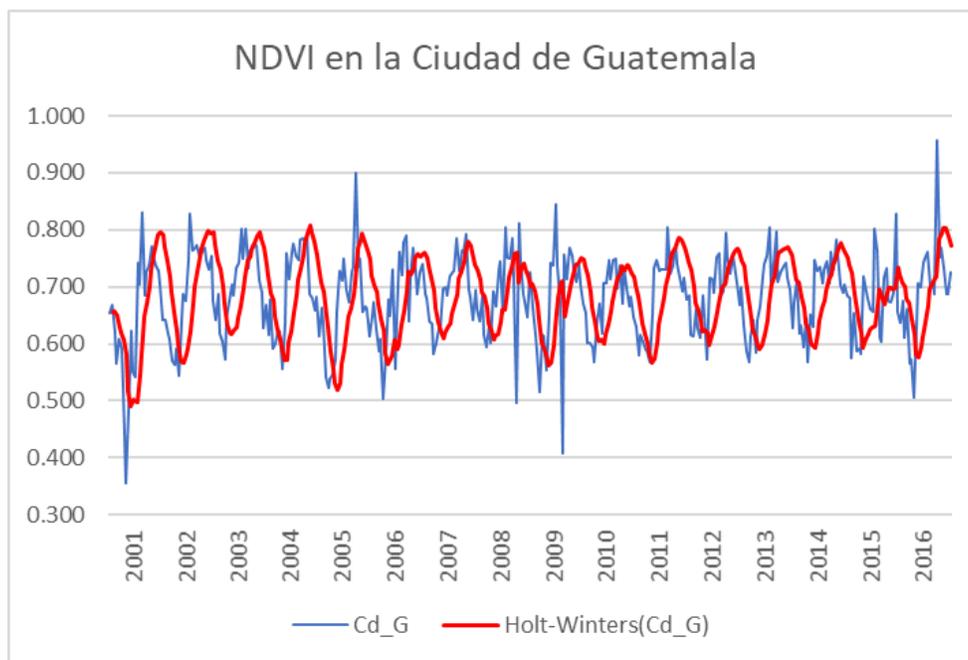


Figura 32 NDVI suavizado en la Ciudad de Guatemala

## Resultados de la evaluación Mann-Kendall

La prueba de Mann-Kendall dio como resultado para la serie de tiempo de precipitación, que no había tendencia. Para la temperatura detectó una tendencia positiva.

## Precipitación en Ciudad de Guatemala

En la ciudad de Guatemala, se observa una tendencia negativa. La línea roja es la media móvil de los datos mensuales de precipitación. Se identifican tres periodos de cambio y estabilización de la lluvia.

A principios de la década de 1980 y del 2000, se identifican dos puntos de cambio. Los niveles de precipitación disminuyen en casi 100 mm. En los periodos intermedios de 1980 y 2000, se observa una estabilización de los datos. Es posible que estemos subestimando los datos, ya que son derivados

de radar meteorológico y corresponden a datos mensuales. Posteriormente se suavizan con la media móvil, es decir, el escenario real podría estar perdiendo mayor precipitación.

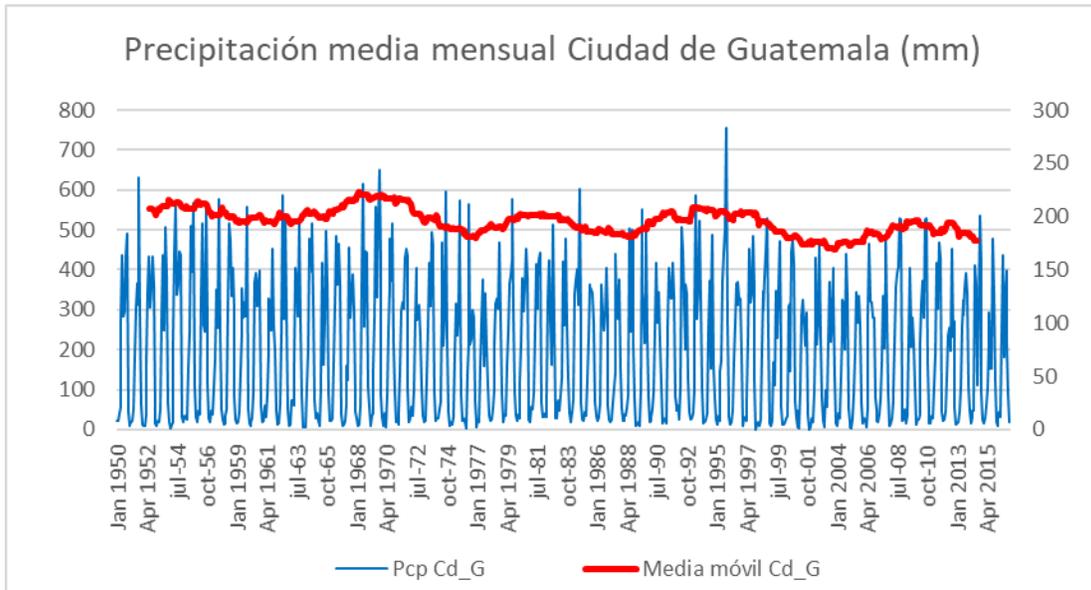


Figura 33 Tendencia en precipitación mensual para la ciudad de Guatemala

### Temperatura en la Ciudad de Guatemala

La temperatura en la Ciudad de Guatemala muestra una tendencia positiva a largo plazo. En la década de 1980 comienza a aumentar y parece estabilizarse en la década de 1990.

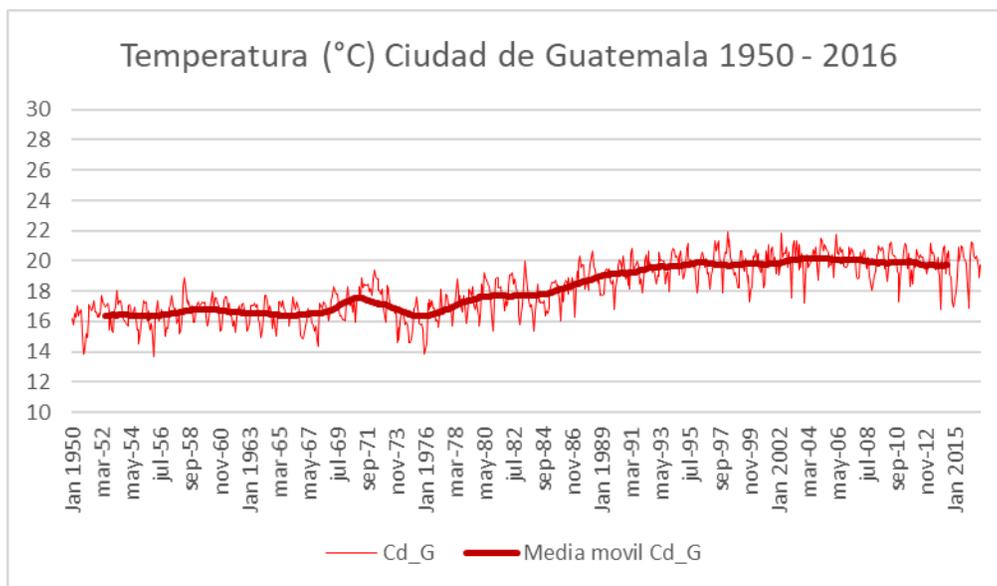
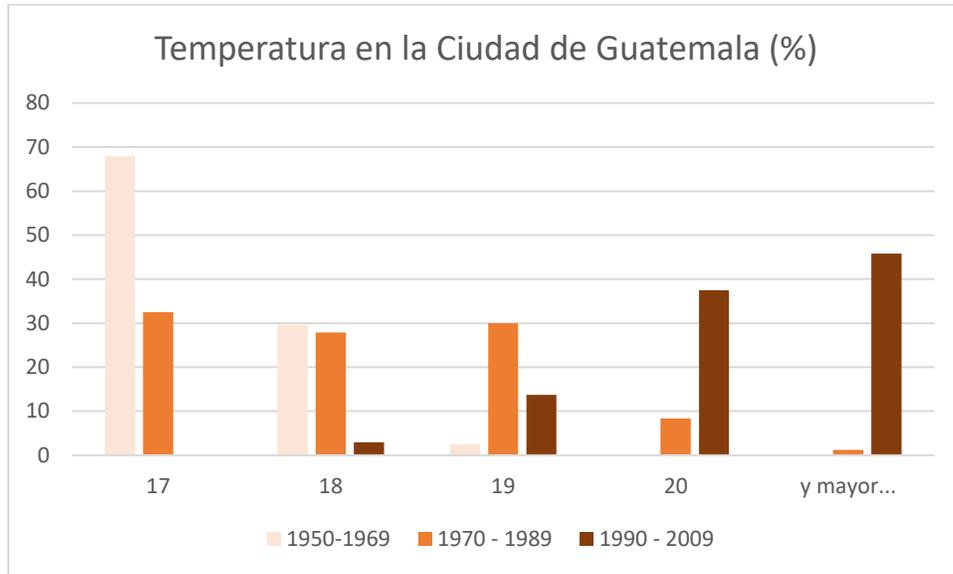


Figura 34 Tendencia en temperatura media mensual para la Ciudad de Guatemala

El histograma muestra cambios más intensos (Figura 35). En el periodo de 1950 a 1970, la mayor cantidad de eventos era de 17°, en el último periodo evaluado, 1990-2009, el patrón cambia y es posible ahora tener temperaturas incluso mayores a 20°.



*Figura 35 Histograma de la temperatura en Ciudad de Guatemala*

## Cambio de uso de suelo en el Petén

La región del Petén ha sido el destino de migrantes indígenas guatemaltecos, desde la década de 1960. Uno de los impactos en el medio fue la remoción de masa forestal para conversión agrícola. Para el área seleccionada en la región, se observa un importante cambio entre la década del 2000 y el 2010.



*Figura 36 Petén 1990*



*Figura 38 Petén 2010*



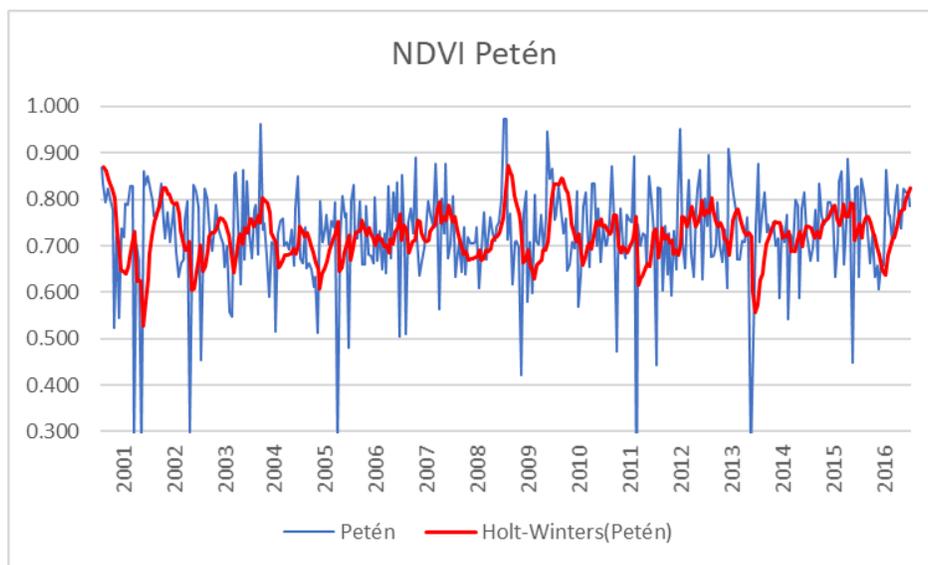
*Figura 37 Petén 2000*



*Figura 39 Petén 2016*

## NDVI en el Petén

Las variaciones observadas en la serie de tiempo de NDVI para el Petén corresponden a ruido. La serie filtrada muestra cambios en la amplitud del índice, por ejemplo, posterior al año 2005. En esta área seleccionada, se identificaron cambios en el año 2000, existe una coincidencia temporal.



*Figura 40 NDVI suavizado en el Petén*

## Resultados de la evaluación Mann-Kendall

Según la prueba estadística Mann-Kendall, la tendencia en temperatura es positiva y en la precipitación es negativa.

## Precipitación en el Petén

La serie de tiempo filtrada muestra dos periodos en donde la precipitación disminuye, en la década de 1980 y 2000. Aunque localmente el cambio de uso de suelo es a partir del 2000, regionalmente el Petén se comenzó a deforestar en la década de 1960. Los cambios en la baja frecuencia podrían corresponder a cambios regionales.

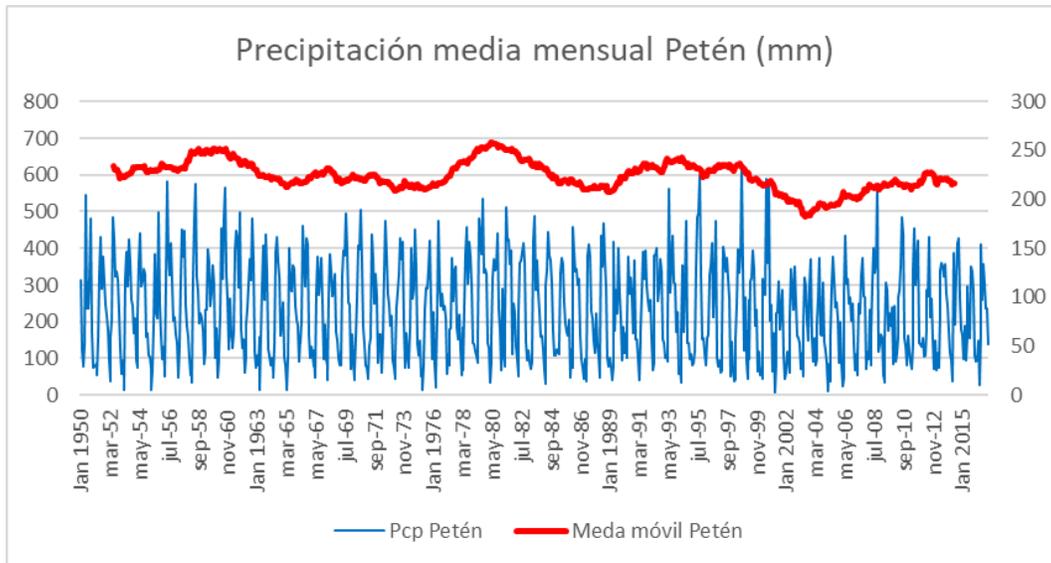


Figura 41 Tendencia en precipitación mensual para el Petén

### Temperatura en la región del Petén

La serie de tiempo muestra una tendencia positiva en la baja frecuencia. A inicio de la década de 1970 aumenta y es hasta la década del 2000 que parece estabilizarse.

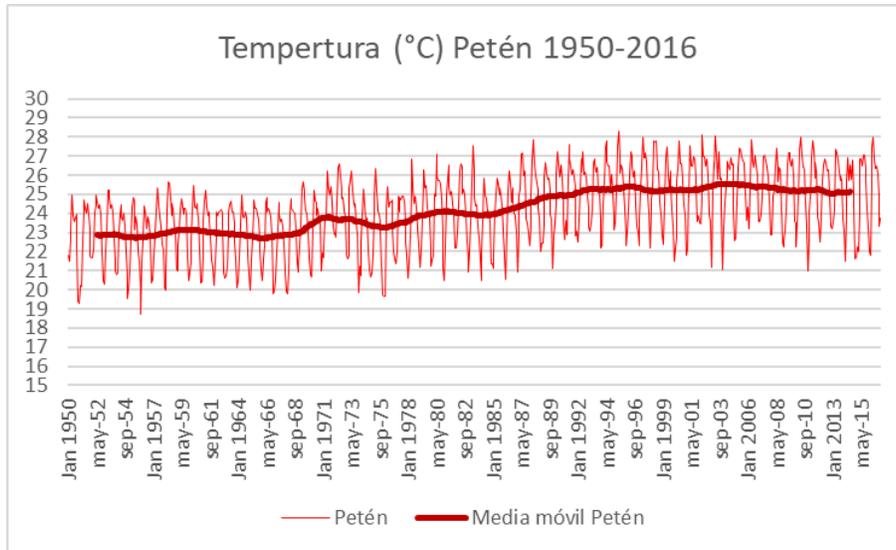


Figura 42 Tendencia en temperatura media mensual para el Petén

El Histograma tiene un comportamiento similar al observado en la Ciudad de Guatemala. Actualmente es menos probable tener días con temperatura de 24°C y más probable tener valores de más de 26°C. En décadas anteriores no se presentaban eventos de este tipo.

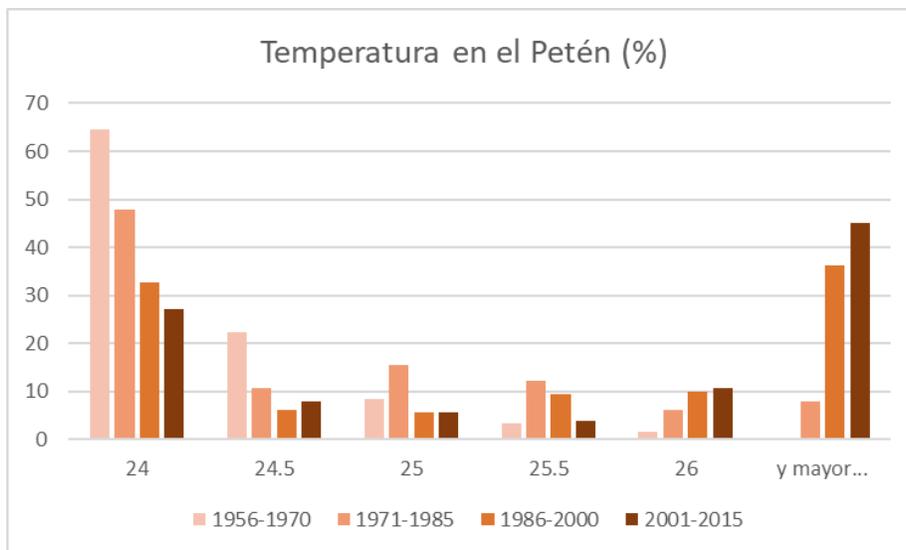


Figura 43 Histograma de la temperatura en el Petén

## Cambio de uso de suelo en el Parque Nacional Laguna del Tigre

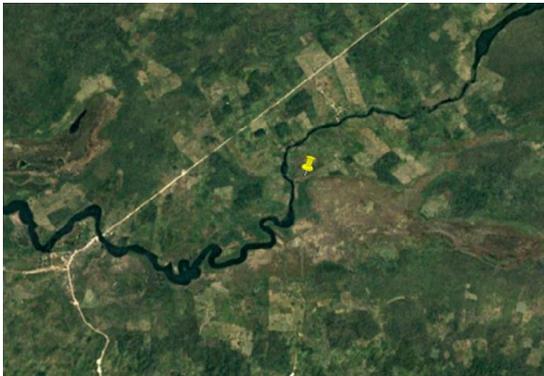
El Parque Nacional Laguna del Tigre fue decretado en 1990. Esta área ha sido modificada hacia uso agrícola , incluso después del decreto.



*Figura 44 Laguna del Tigre 1990*



*Figura 46 Laguna del Tigre 2010*



*Figura 45 Laguna del Tigre 2000*



*Figura 47 Laguna del Tigre 2016*

## NDVI en el Parque Nacional Laguna del Tigre

Al suavizar los datos de NDVI, se observan dos periodos en donde cambian los valores del índice. Los valores máximos no superan el 0.8. (Figura 48).

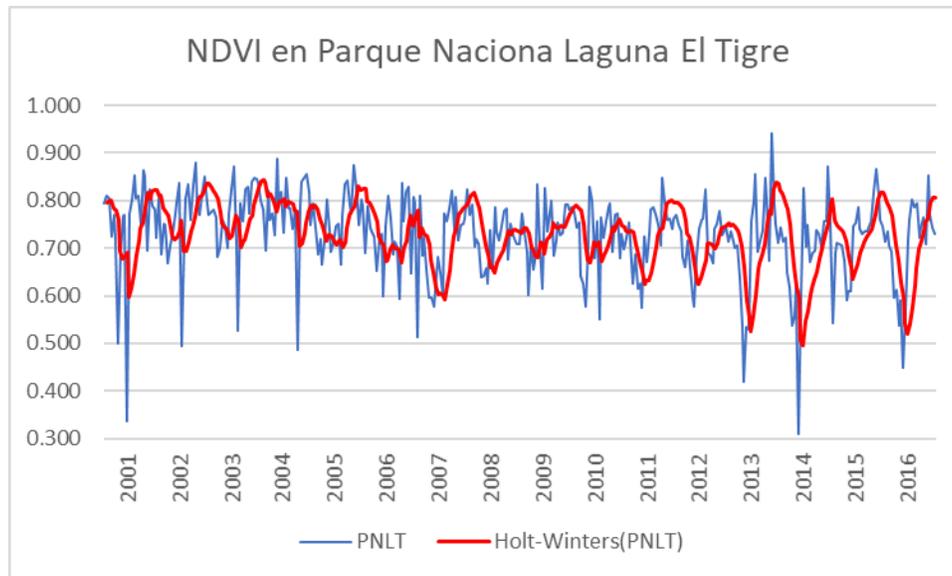


Figura 48 NDVI suavizado en el Parque Nacional Laguna del Tigre

## Resultados de la evaluación Mann-Kendall

La prueba de Mann-Kendall mostró para los datos de temperatura en el Parque Laguna del Tigre, una tendencia positiva y para la precipitación el resultado fue que no hay tendencia.

## Precipitación en el Parque Nacional Laguna del Tigre

Los valores filtrados muestran dos periodos de cambio, 1960 y año 2000. Se sabe que, a partir del año 2000, esta zona fue deforestada. Se sugiere analizar los valores de precipitación anterior y posterior al 2000. La tendencia no sigue un modelo exponencial, muestra diferentes estadios, por ejemplo, antes de 1960 y después del 2000.

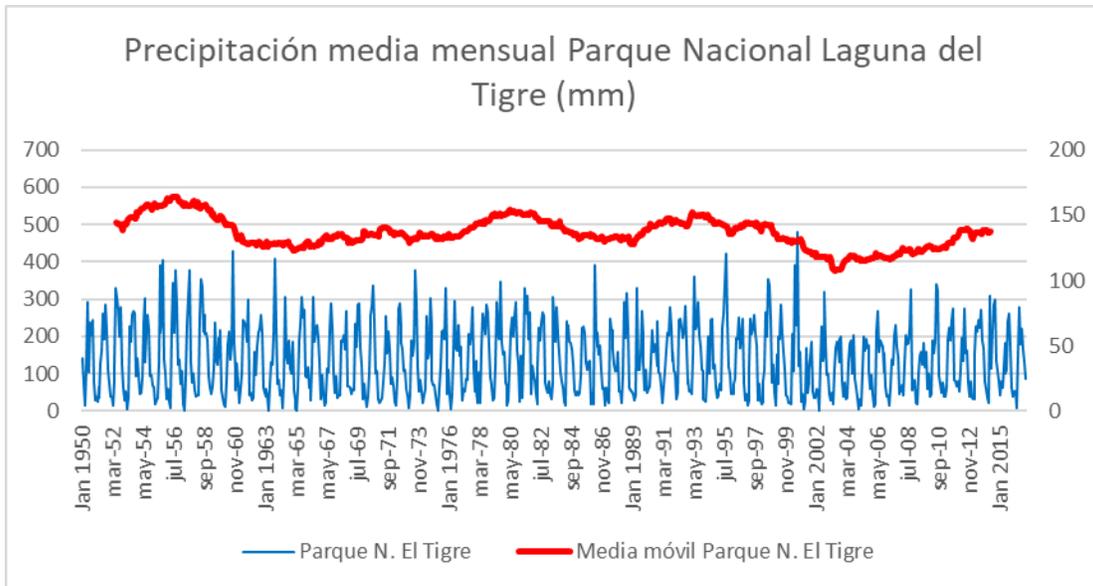


Figura 49 Tendencia en precipitación mensual para el Parque Nacional Laguna del Tigre

Se observa un cambio en la precipitación media mensual, entre dos periodos, 1986-2000 (color azul intenso) y 2001-2015 (azul claro). En el año 2000 la zona fue deforestada para fines agrícolas. La disminución en precipitación es coherente con los cambios en superficie.

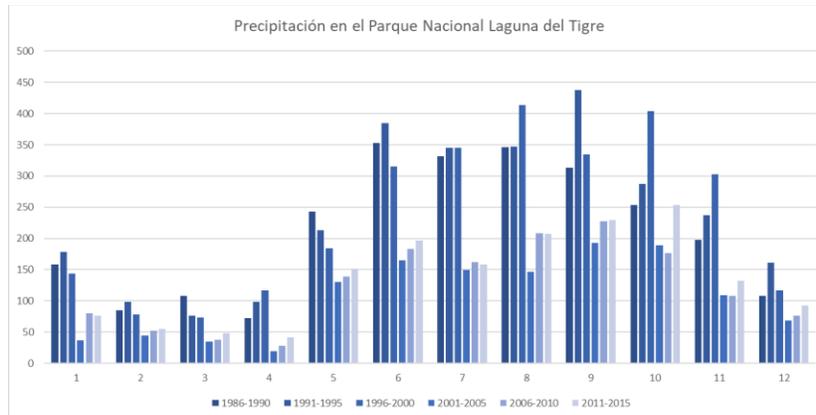


Figura 50 Cambio en precipitación media mensual

## Temperatura Parque Nacional Laguna del Tigre

Se observa una tendencia positiva que podría responder a fenómenos de gran escala, ya que es una respuesta similar en otros puntos observados, ya que las áreas seleccionadas no se ven afectadas únicamente por el cambio local. Se identifican dos periodos de estabilización en 1970 y 1995, aproximadamente. El periodo en el ocurre el cambio de uso de suelo corresponde al año 2000.

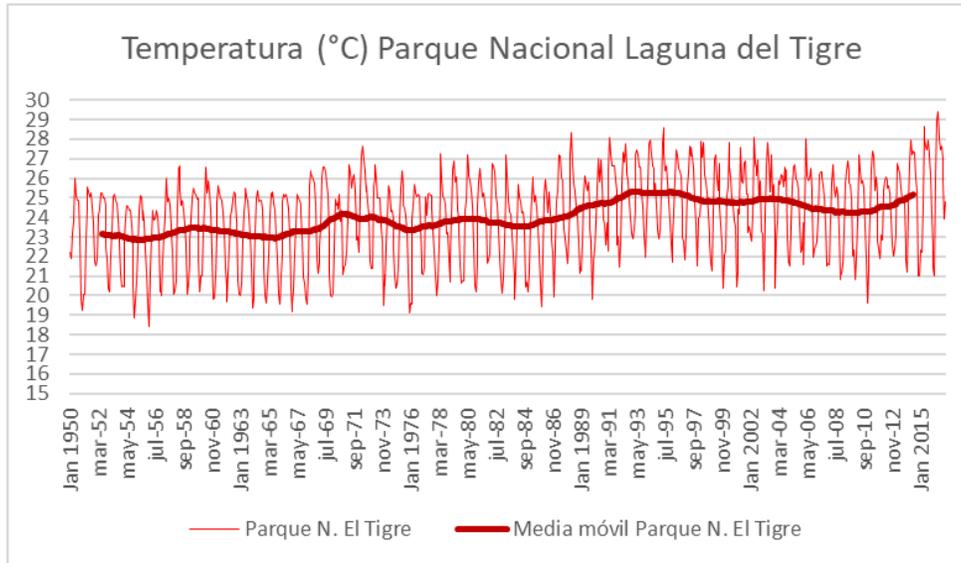


Figura 51 Tendencia en temperatura media mensual para el Parque Nacional Laguna del Tigre

La temperatura en la Laguna del Tigre muestra un cambio de estadios que podrían dividirse en dos etapas. De 1956 a 1985 y de 1986 a 2015. En el segundo periodo se presentaron más eventos con temperaturas mayores a 26°C. En el primer periodo, existían más eventos con temperaturas de 24°.

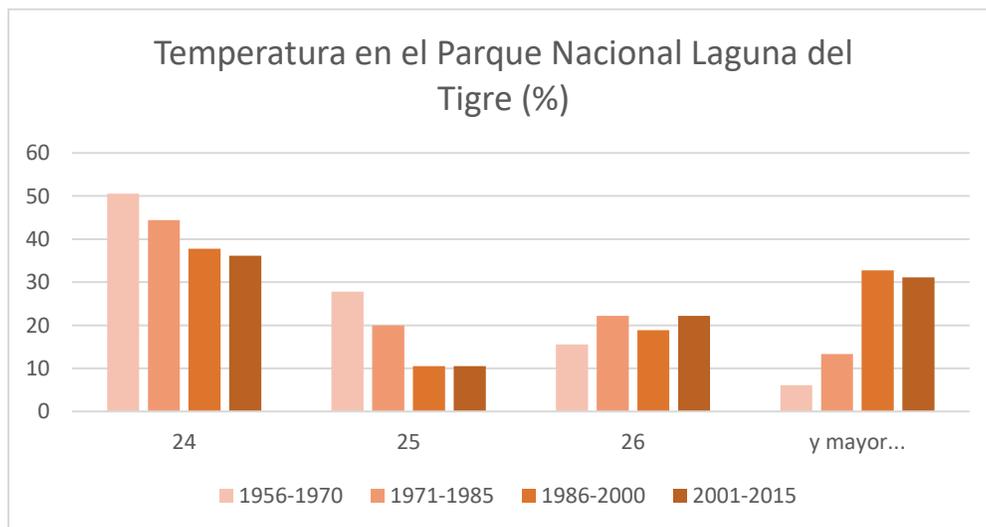
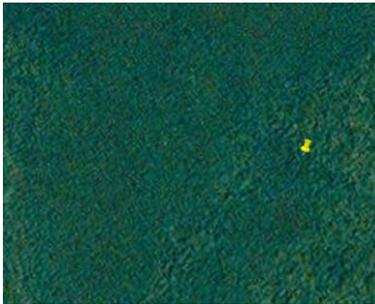


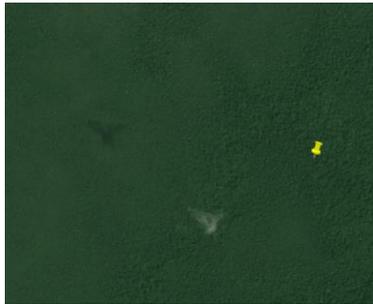
Figura 52 Histograma de la temperatura en el Parque Nacional Laguna del Tigre

## Cambio de uso de suelo en la Reserva Maya

El área que se seleccionó para representar de la Reserva Maya no ha sufrido cambio en el uso de suelo por estar localizada en la selva. Dadas las tendencias de crecimiento de la frontera agrícola esta área está expuesta a ser deforestada



*Figura 53 Reserva Maya  
1970*

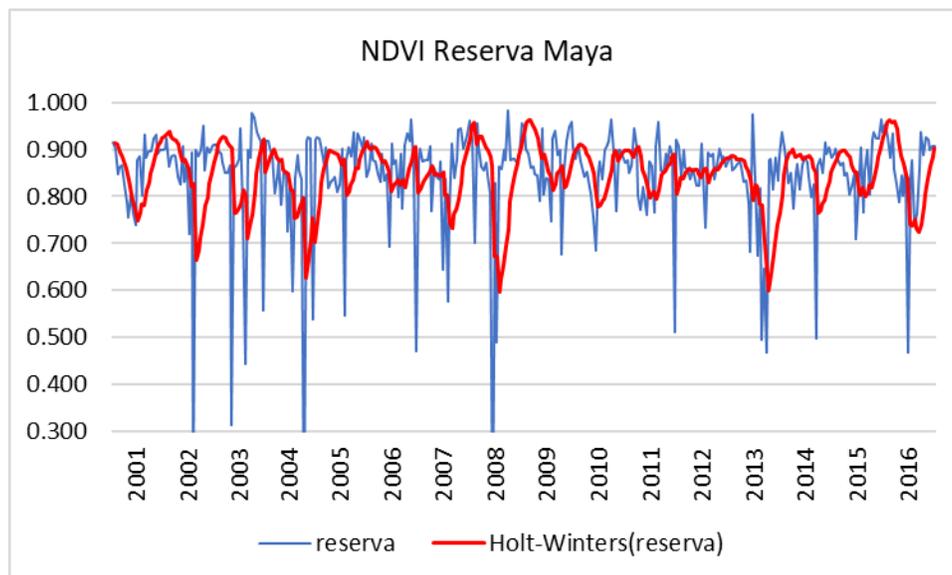


*Figura 54 Reserva Maya  
2010*



*Figura 55 Reserva Maya  
2016*

## NDVI en la Reserva Maya



## Resultados de la evaluación Mann-Kendall

La prueba reportó para la Reserva Maya una tendencia positiva en la temperatura y sin tendencia para el caso de la precipitación.

## Precipitación en la Reserva Maya

La Reserva maya representa una superficie que no ha sido modificada. Se puede observar sin embargo que hay una disminución de la precipitación a inicios de la década del 2000, pero que podría ser parte de un ciclo natural, ya que vuelve a alcanzar valores similares a los observados en la década de 1950.

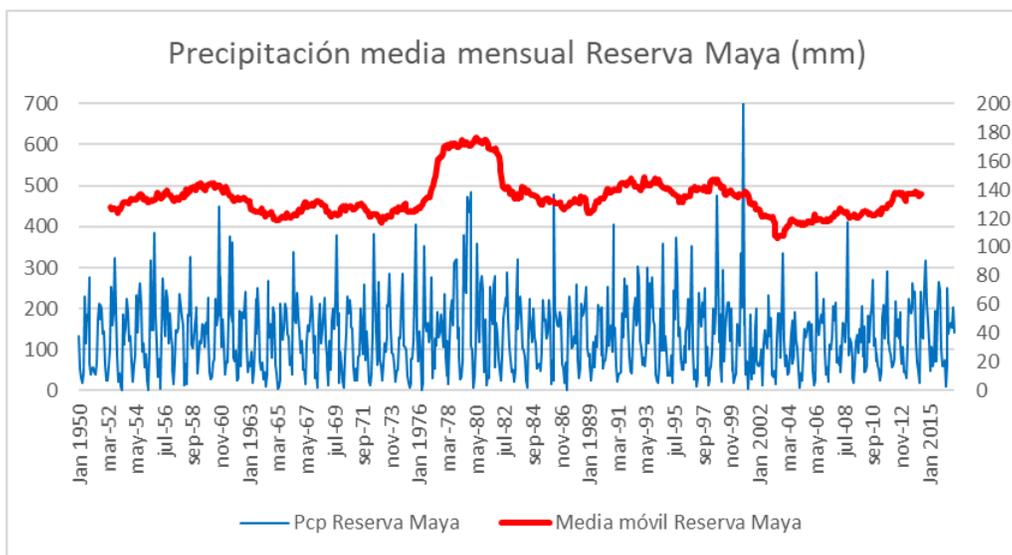


Figura 56 Tendencia en precipitación mensual para la Reserva Maya

## Temperatura de la Reserva Maya

La zona de la reserva maya seleccionada no ha sufrido cambio de uso de suelo. Aunque se observa un aumento en los valores medios de temperatura en la baja frecuencia, no tiene un incremento tal como en las otras áreas seleccionadas. Este resultado es un indicio del rol del uso de suelo.

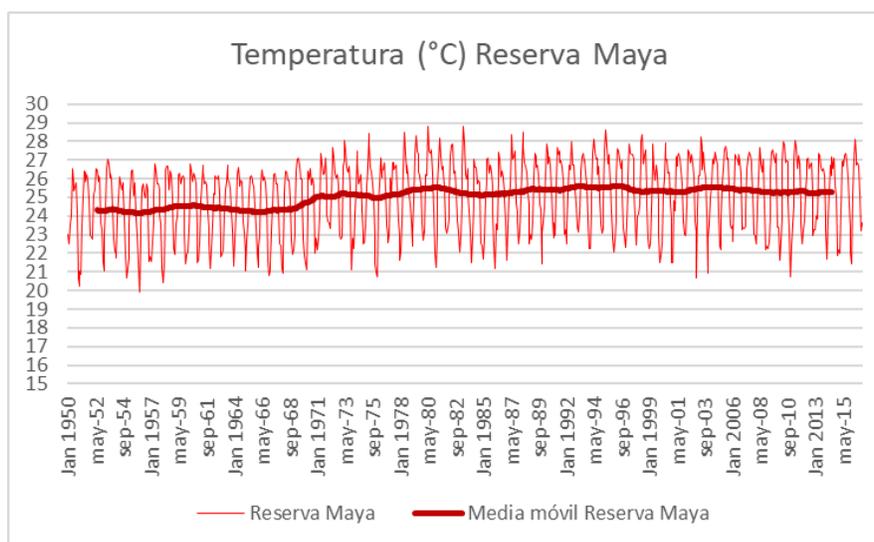


Figura 57 Tendencia en temperatura media mensual para la Reserva Maya

Existe un cambio en temperatura para los diferentes periodos, pero las temperaturas extremas no incrementan como sucede en la ciudad de Guatemala o en el Petén.

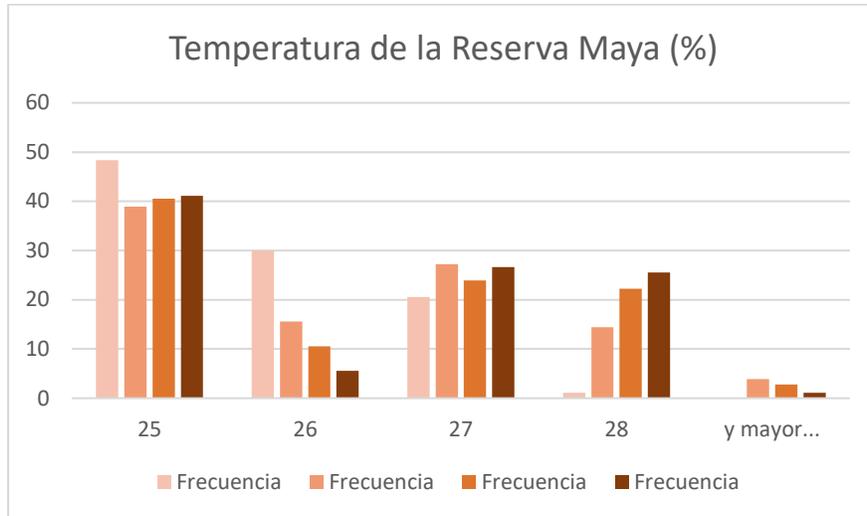


Figura 58 Histograma de la temperatura en la Reserva Maya

## **Síntesis del contexto histórico de Guatemala**

Guatemala es un país tropical altamente diverso, históricamente reconocido a nivel mundial por su extensión de bosques naturales. En el año de 1944 con el triunfo de la revolución guatemalteca, se eligió como presidente a través de un proceso democrático a Jacobo Arbenz. En 1952, el presidente decretó la reforma agraria que benefició a los pequeños campesinos guatemaltecos, a través de la expropiación de tierras ociosas a la élite de terratenientes guatemaltecos y de la Empresa de Fruta Unida (United Fruit Company - UFC). El gobierno indemnizó a los propietarios y se repartieron estas tierras beneficiando aproximadamente a 100,00 familias (Douglas W. Trefzger, 2002). La UFC, no aceptó la reforma agraria, ya que históricamente habían sido dueños de las tierras de mejor calidad (Bucheli, 2006). En 1954 una coalición de élites guatemaltecas, junto con la UFC, y la CIA, orquestaron el golpe de estado que volcó el gobierno democráticamente elegido y revirtió la reforma agraria (Glejises P., 1991). En respuesta a este golpe, el movimiento guatemalteco revolucionario se reactivó en 1960. La guerra civil duró 36 años y se tiene registro de cifras que resultan muy alarmantes, además de posteriores investigaciones que muestran la brutalidad de los militares con el fin de detener el movimiento revolucionario. Más de 200,000 personas fueron matadas o desaparecidas, 500,000 guatemaltecos fueron desplazados, y 150,000 forzados a escapar el país (Palma Murga, Taracena Arriola, & Aylwin Oyarzun, 2002) . Este periodo se ha reconocido como un genocidio. La población que se desplazó dentro del país, migró al norte donde la tierra estaba todavía disponible, como la región del Petén (López-Carr, 2012), la población aumentó de 20,000 a más de 500,000 personas entre 1960 y 2000 (Grandia, 2000).

Militares y otras élites también miraron al Petén, para organizar la repartición del territorio. Estos grupos privilegiados, recibieron títulos de propiedad a través del programa de regularización de la tierra entre los años de 1960 y 1990. Este derecho se negó a campesinos y a la gente indígena (Kaimowitz & Angelsen, 2008). A principios de 1990 la regularización de tierra fue accesible para la población marginada, gracias al movimiento de conservación internacional. Este movimiento de organizaciones no gubernamentales nacionales e internacionales, creó un área natural protegida de 1.6 millones de acres (aproximadamente 65,000 km<sup>2</sup>) llamada Reserva de la Biósfera Maya en el norte del Petén (Sundberg, 1998). La reserva fue creada el 05 de febrero de 1990 mediante el Decreto 5-90 del Congreso de la República de Guatemala. La zonificación de la reserva y el estado actual muestran el deterioro y la pérdida de cobertura original.

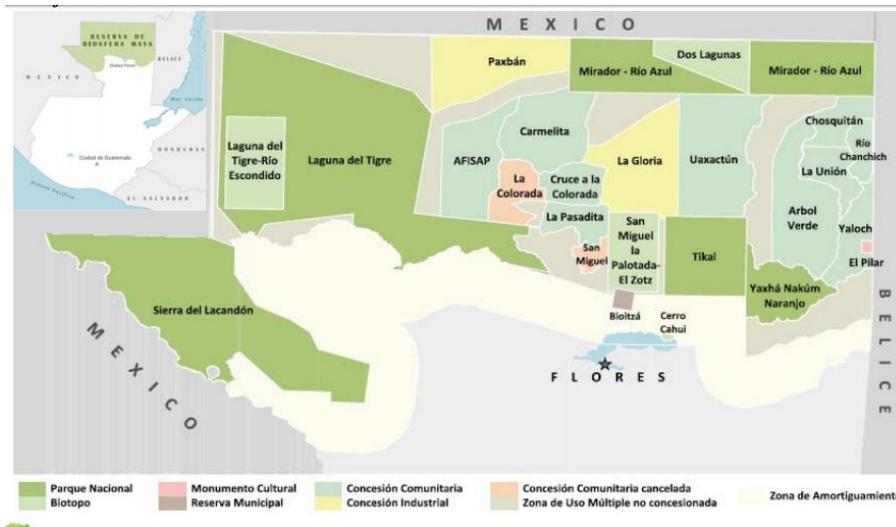


Figura 59 Zonificación de la Reserva de la Biósfera Maya. Fuente: Estado de la RBM.

<https://goo.gl/UCzieK>

La zona de amortiguamiento ha sido invadida por la frontera agrícola, posteriormente se afectó a la Sierra del Lacandón y al Parque Nacional Laguna del Tigre.

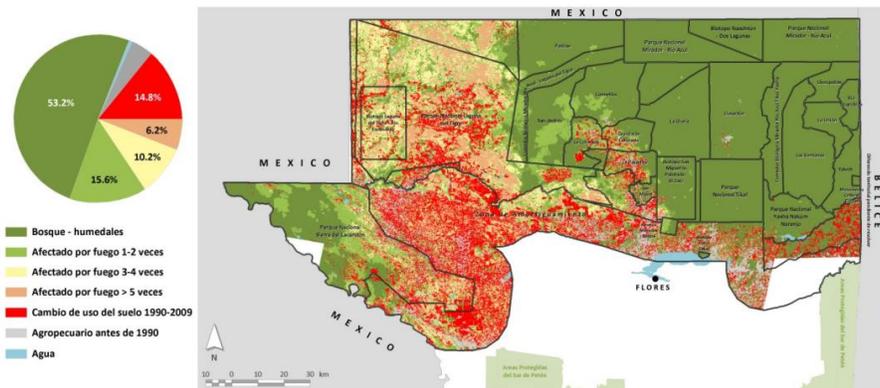


Figura 60 Deforestación en la RBM. Fuente: Estado de la RBM. <https://goo.gl/UCzieK>

Según el informe sobre desastres y migración en Guatemala (OIM, 2001), las migraciones internas recientes, aún se orientan hacia el norte del país en busca de acceso a tierras para tener grandes cultivos e ingresos económicos, y hacia el departamento de Guatemala capital en busca de empleo y mejor nivel de vida. Los expertos identifican dos factores socioeconómicos que afectan fuertemente la migración en Guatemala como la pobreza y el bajo rendimiento en la productividad agrícola, lo cual disminuye los ingresos de los agricultores. Los efectos negativos más sobresalientes de la migración son el hacinamiento, la indigencia, pobreza, desintegración familiar y los cambios en la cobertura de los bosques, que derivan de la situación económica asociada al propio proceso.

La revisión sintética del contexto histórico, de las decisiones políticas y económicas, exponen el origen de las migraciones hacia el Petén. El ambiente de violencia por la lucha del territorio que inicio la compañía frutera en contra de los campesinos indígenas, hizo migrar hacia el norte del país en búsqueda de tierras para fines agrícolas, se entiende una agricultura de subsistencia. Finalmente, la compañía frutera también se benefició de la deforestación en el Petén. Se excluyó a los campesinos guatemaltecos hacia las tierras de menor potencial agrícola, y en consecuencia la frontera agrícola se fue expandiendo. El centro del Petén fue altamente afectado, al perder su cobertura de bosques tropicales. La problemática agraria no se resolvió y actualmente la frontera agrícola está invadiendo la zona de la Reserva, como es el caso de la Laguna del Tigre.

La problemática de la deforestación y su impacto en el cambio del clima, se originó por decisiones políticas, que favorecían a una compañía extranjera. La inconformidad social, además de la migración provocó la reactivación del movimiento guatemalteco revolucionario. La apropiación del territorio para fines de subsistencia por parte de los campesinos, y para fines comerciales por parte de la compañía frutera, tiene repercusiones en el cambio en el clima. Con la tendencia de la disminución de la precipitación y la probable merma de productividad agrícola, la deforestación para conversión agrícola, sigue siendo una solución, y al mismo tiempo, significa una retroalimentación negativa, no sólo al problema ambiental, sino también al social. El conocimiento del contexto social, político y ambiental, conjunta un análisis geográfico integral, deseable para la solución de la problemática.

En resumen, el breve recuento del contexto histórico muestra que la deforestación y su impacto en el clima, están relacionados con las migraciones derivadas de los conflictos armados. La población desplazada por la guerra, migró hacia el norte donde uso y transformó los ecosistemas naturales. Estos procesos locales tienen un gran impacto sobre el uso del suelo, en general de los recursos naturales e interactúan dentro de la dinámica del sistema climático. El enfoque de socioecosistema permite integrar elementos que comúnmente se analizan de manera aislada. La relación e interacción entre el ámbito social, ambiental y económico, son condicionantes del desarrollo de los socioecosistemas, por ello resultan de importancia para entender las actuales problemáticas ambientales.

## Discusión y conclusiones

Los resultados, muestran coincidencia espacial y temporal entre el uso de suelo y las tendencias en el clima, que sugieren que puede atribuirse al cambio de uso de suelo los cambios en la temperatura y precipitación. Los resultados son coherentes con otros estudios.

Regionalmente la tendencia de la temperatura es positiva, sin embargo, el aumento es diferenciado según la cobertura y el uso de suelo local. El escenario extremo es la ciudad de Guatemala, el resultado es coherente con estudios sobre el efecto de la urbanización (Kalnay & Cai, 2003). En la región del Petén, la Laguna del Tigre muestra un incremento en temperatura de hasta 2°C, pasando de 23 a 25°C, en un periodo de 60 años aproximadamente. En contraste, la temperatura en la zona de la Reserva Maya ha aumentado en menos de 1°C para el mismo periodo. Similar a lo encontrado por Manoharan, la tendencia de la temperatura es positiva en la región del Petén, con una pendiente mayor en las áreas deforestadas. Existe un incremento diferenciado entre zonas deforestadas y zonas que conservan el bosque tropical. Por ello, se sugiere que la cobertura vegetal y el uso de suelo, local y regionalmente, son factores que modulan el cambio en el clima. Manoharan analizó la temperatura, el NDVI y la humedad del suelo utilizando datos de MODIS para el periodo 2000-2008. Durante la época seca la temperatura es de 4 a 8° más caliente en regiones deforestadas, comparadas con aquellas que conservan su cobertura natural. Manoharan determina que el proceso de deforestación en la región del Petén, continúa, y le atribuye los cambios en el clima. El autor analiza época seca contra época lluviosa mientras que en la tesis se analizaron cambios por periodos años relacionados con los cambios en los usos de suelos, es decir, no analiza el cambio en corto plazo o por época, sino en el largo plazo, el clima con un uso de suelo y el nuevo clima derivado de la deforestación, estas variaciones son de baja frecuencia, las del artículo de Manoharan, por el contrario, son de alta frecuencia.

El resultado en la disminución de la precipitación coincide con los resultados obtenidos por Sampaio (2007), quien determinó una disminución en la precipitación, como respuesta a la deforestación ocurrida en la cuenca del Amazonas. En comparación con Aguilar (2005), los resultados indican coherencia espacial en la tendencia de la temperatura. América Central y el norte de Sudamérica, la región claramente se está calentando, sobre las últimas décadas y los extremos en temperatura están cambiando. Se observa un incremento en temperaturas máximas extremas y disminución en temperaturas mínimas extremas. Según Aguilar, las tendencias positivas y negativas en precipitación son variadas, en estaciones individuales, con usos de suelo diferenciados.

Los datos evaluados muestran coherencia con los datos observados, los cuales no pueden ser reemplazados en el proceso del entendimiento de la respuesta climática. Se recomienda obtener y analizar datos diarios observados. Aguilar (2005), hace mención de la existencia de estos datos, pero no son de fácil acceso. Los datos disponibles son de años recientes (1990), y este periodo no permitiría detectar el cambio atribuido al cambio de uso de suelo. Es necesario tener la referencia espacial y temporal, con un escenario anterior que muestre el estado sin alteraciones antrópicas.

### **Cambio global y cambio regional-local**

El cambio climático global antrópico, derivado del aumento de gases de efecto invernadero es un tema de gran importancia en la agenda ambiental. Las estrategias de mitigación están enfocadas en la disminución de emisiones, mientras que las de adaptación, tratan de reducir la vulnerabilidad a los impactos del clima cambiante. Sin embargo, poco se discute respecto a la importancia e impactos de los cambios locales y regionales de cobertura y uso de suelo. Los análisis a escala global, no consideran las particularidades locales, que pueden resultar moduladoras. Para el caso del Petén, se observa un aumento general de la temperatura, pero el aumento es diferenciado según la cobertura o uso de suelo. Los bosques tropicales de la Reserva Maya muestran un ligero aumento, en comparación con la Laguna del Tigre. La diferencia entre estas zonas, es que la Laguna del Tigre ha sido deforestada por el aumento de la frontera agrícola, mientras que la Reserva Maya conserva su vegetación natural. La Laguna del Tigre, al perder la cobertura boscosa, ha perdido la rugosidad que conserva la Reserva Maya, y en consecuencia los intercambios de flujos de humedad, energía y momento, son diferentes. El área de la Reserva Maya, es la referencia para comparar con las otras áreas. La Ciudad de Guatemala, evidencio el impacto de la deforestación, mientras que la región del centro del Petén, no detecta un cambio claramente, porque los cambios en superficie ocasionados por la deforestación ocurrieron desde la década de 1960, por ello la señal no muestra el cambio, como en la Laguna del Tigre. La evaluación de la precipitación suele resultar más compleja, que la de la temperatura. El análisis estadístico de esta variable no muestra tendencia. Coincidentemente con Aguilar et al., (2005), se observa un cambio en la precipitación, pero no es significativo. En el parque Laguna del Tigre, los datos sugieren una importante disminución de la precipitación, comparando datos de 1985-2000 y 2001-2015. Entre 3 y 5 años siguientes a la pérdida de masa forestal, se puede detectar el cambio en lluvia. Este resultado debe verificarse con datos observados. La obtención de estos fue posible gracias al Insivumeh (Instituto Nacional De Sismología, Vulcanología, Meteorología E Hidrología), pero no cubren el periodo anterior al cambio de uso de suelo.

Una de las aportaciones del análisis de la señal climática, y que dificulta la identificación de las tendencias, es que se observan cambio escalonados y no exponenciales.

## **Conclusiones**

Se cumplió con el objetivo general y específicos de la tesis. Los resultados sugieren que la hipótesis se cumple. Las coincidencias temporales del cambio en la precipitación y temperatura, y los procesos de deforestación, indican la atribución del impacto en el clima, por cambios en el uso de suelo, en la región del Petén. Sin embargo, es necesario precisar esta información con datos observados, no sólo estimados.

La revisión del contexto social en Guatemala, además del análisis de las variables físicas, permite aproximarse al problema. Una caracterización socioeconómica podría integrar la totalidad del problema. En la tesis se intenta la aproximación metodológica; se logró una síntesis histórica, no así el análisis completo y necesario.

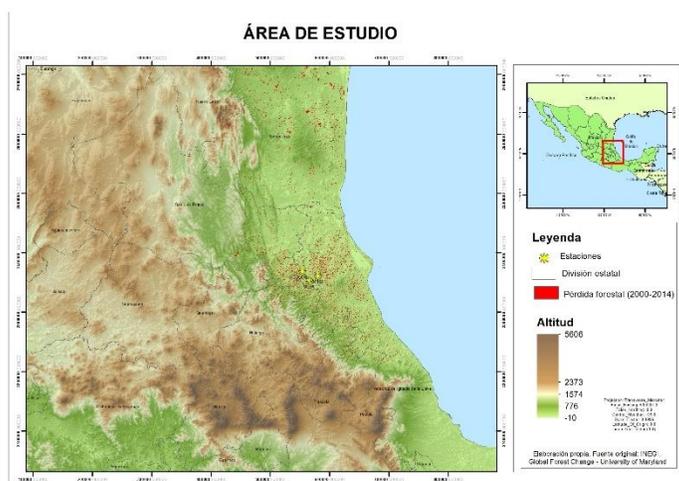
El cambio de uso de suelo y la pérdida de cobertura natural, está ocurriendo con mayor incidencia en países tropicales, altamente biodiversos, esto urge a hacer estudios que analicen los impactos en los respectivos socioecosistemas, pues se ha demostrado que existe un impacto local y regional, en el clima, derivado de los cambios en la cobertura terrestre.

La investigación es una aproximación a la dinámica del cambio de uso de suelo y su impacto sobre el clima. No debe descartarse el análisis de datos observados, y evaluaciones in situ. Los resultados que se obtuvieron dan pie a hacer un análisis más fino, que se aproxime cada vez más a entender la compleja dinámica del clima. Como se ha explicado, las respuestas no son lineales, los factores que influyen en la interacción atmósfera biósfera son diversos. En particular para México, la región de la vertiente del Golfo, es un área de interés por el intenso proceso de deforestación que ha ocurriendo, y sus respectivas implicaciones en la dinámica con la atmósfera.

## Trabajo futuro: México (breve descripción del caso del norte de Veracruz)

En México los agroecosistemas más extendidos son la agricultura de temporal (11.4 %), pastizal cultivado (6.6%) y agricultura de riego (5.12%). El Estado de Veracruz concentra la mayor superficie tanto de pastizal cultivado como de agricultura de temporal, seguido de Zacatecas y Jalisco en agricultura de temporal, y de Chiapas y Tamaulipas en lo que respecta a pastizal cultivado.

El área en dónde se han detectado importantes cambios en el uso de suelo, comprende el norte del estado de Veracruz e Hidalgo y una porción del sur del estado de San Luis Potosí.



*Figura 61 Área con cambios de uso de suelo*

A mediados de la década de 1970, a través del Programa Nacional de Desmonte (PRONADE), cuyo fin era la conversión de tierras para aprovechamiento agropecuario, se taló aproximadamente 12% del territorio nacional, y el estado de Veracruz fue uno de los más afectados. De 1972 a 1976, el programa incorporó 1,176,000 hectáreas. Muchas de las tierras que se abrieron al cultivo en los estados del sureste de la república, permanecen improductivas (González, 1980).

Se sugiere que el impacto en el clima, derivado de la conversión agropecuaria, puede medirse a través del aumento de la temperatura y cambio en los patrones de precipitación. Los usos de suelo identificados son agricultura de temporal, riego, y pastizales.

### Diagnóstico general

De manera general se analizaron algunas estaciones, en un proceso de detección-atribución como el que se hizo para el caso del Petén. El área tiene características para ser analizadas bajo el mismo enfoque, que además de la interacción física de la biosfera-atmósfera, involucre los aspectos histórico sociales que condicionaron el contexto actual.

Al identificar los cambios espaciales y temporales en el uso de suelo, se analizaron la temperatura y precipitación de algunas estaciones. Se detectaron cambios en estas variables, que pueden asociarse a cambios en superficie. Se seleccionaron estaciones ubicadas en zonas de cambio de uso de suelo. Las series de tiempo fueron suavizadas para reducir el ruido que podría ser correspondiente a la variabilidad natural. El primer análisis siendo aún robusto, sugiere una tendencia negativa en la lluvia acumulada entre los meses de mayo a octubre.

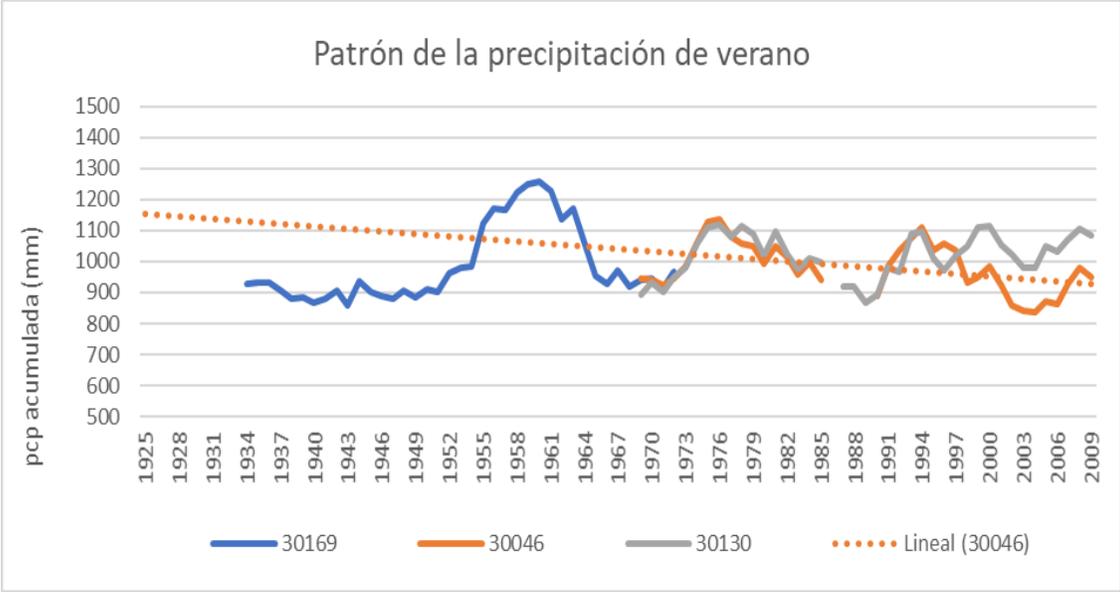
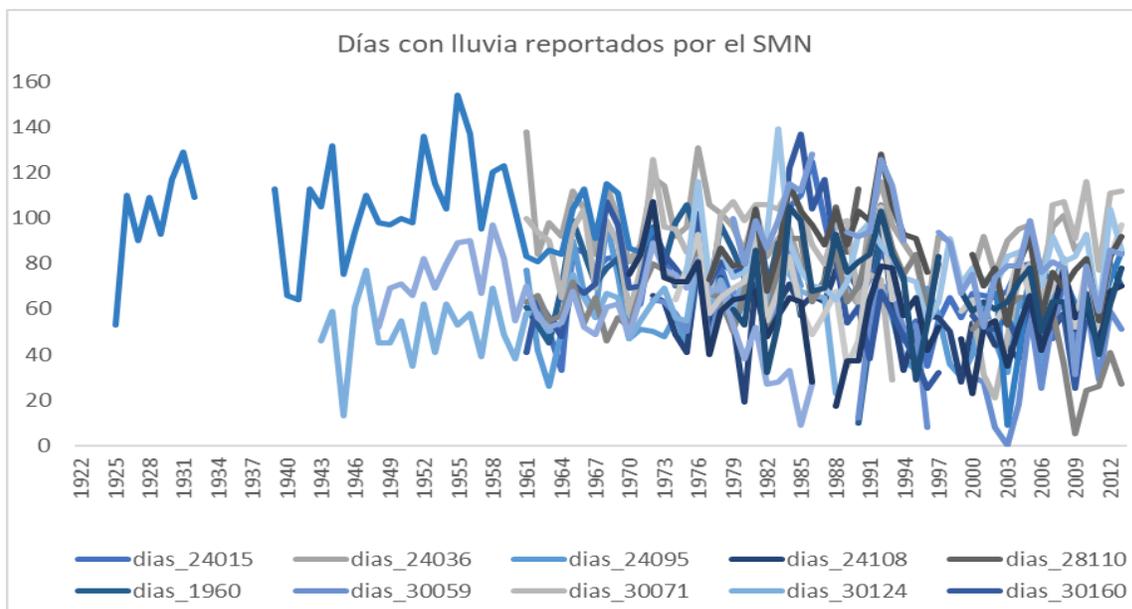


Figura 62 Patrón de precipitación para tres estaciones de Veracruz

Como parte del diagnóstico general, se observa que existe una disminución de los días con lluvia reportados anualmente. Se observa que la forma en cómo llueve (distribución, cantidad), está cambiando, y que podría atribuirse a patrones de uso de suelo y cobertura. Conocer si el cambio ocurre en cantidad o en distribución de la lluvia, es primordial para la planeación del uso del territorio.



*Figura 63 Días con lluvia para estaciones en el norte de Veracruz*

En este ejemplo, como en el de Guatemala, los cambios que ocurren localmente resultan de gran impacto, inclusive, por encima de los cambios globales. En Guatemala, los incrementos en temperatura fueron claramente diferenciados, según el uso de suelo local. La respuesta de la precipitación fue más clara en la Laguna del Tigre. Se requieren más datos para analizar esta variable. En Veracruz, se cuenta con datos observados, pero la heterogeneidad en el uso de suelo, hace más complejo el análisis y la atribución. En el caso del Petén, la deforestación es más homogénea. En México, existen diversos casos, con sus particularidades, que serían de interés para evaluar las relaciones entre clima y superficie. Se recomienda continuar con los análisis, utilizando datos observados. Los datos modelados o estimados son una herramienta muy útil, pero no pueden sustituir a los observados. El rol del uso de suelo sobre el clima es muy relevante. El entendimiento de la dinámica con el clima, permitiría una mejor planeación de los socioecosistemas y de la gestión del riesgo climático.

## Bibliografía

- Achard, F., Eva, H. D., Stibig, H.-J., Mayaux, P., Gallego, J., Richards, T., & Malingreau, J.-P. (2002). Determination of Deforestation Rates of the World's Humid Tropical Forests. *Science*, 297(5583), 999. <https://doi.org/10.1126/science.1070656>
- Aguilar, E., Peterson, T. C., Obando, P. R., Frutos, R., Retana, J. A., Solera, M., ... Mayorga, R. (2005). Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961–2003. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)*, 110(D23). <https://doi.org/10.1029/2005JD006119>
- Anthes, R. A. (1984). Enhancement of Convective Precipitation by Mesoscale Variations in Vegetative Covering in Semiarid Regions. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(4), 541-554. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<0541:EOCPBM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<0541:EOCPBM>2.0.CO;2)
- Bonan G. B. (2002). *Ecological climatology: concepts and applications*. New York: Cambridge University Press.
- Bucheli, M. (2006). *Good Dictator, Bad Dictator: United Fruit Company and Economic Nationalism in Central American in the Twentieth Century*.
- Carr, D. L. (2004). Proximate Population Factors and Deforestation in Tropical Agricultural Frontiers. *Population and Environment*, 25(6), 585-612. <https://doi.org/10.1023/B:POEN.0000039066.05666.8d>
- Charney, J., Halem, M., & Jastrow, R. (1969). Use of Incomplete Historical Data to Infer the Present State of the Atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 26(5), 1160-1163. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1969\)026<1160:UOIHDT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1969)026<1160:UOIHDT>2.0.CO;2)

- Chen, M., Xie, P., Janowiak, J. E., & Arkin, P. A. (2002). Global Land Precipitation: A 50-yr Monthly Analysis Based on Gauge Observations. *Journal of Hydrometeorology*, 3(3), 249-266.  
[https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2002\)003<0249:GLPAYM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2002)003<0249:GLPAYM>2.0.CO;2)
- Costa, M. H., & Foley, J. A. (2000). Combined Effects of Deforestation and Doubled Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentrations on the Climate of Amazonia. *Journal of Climate*, 13(1), 18-34.  
[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<0018:CEODAD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<0018:CEODAD>2.0.CO;2)
- Dickinson, R. E. (1995). Land-atmosphere interaction. *Reviews of Geophysics*, 33(S2), 917-922.  
<https://doi.org/10.1029/95RG00284>
- DOUGLAS W. TREFZGER. (2002). GUATEMALA'S 1952 AGRARIAN REFORM LAW: A CRITICAL REASSESSMENT. *International Social Science Review*, (1/2), 32.
- Drigo, R. (2005). Trends and patterns of tropical land use change. En L. A. Bruijnzeel & M. Bonell (Eds.), *Forests, Water and People in the Humid Tropics: Past, Present and Future Hydrological Research for Integrated Land and Water Management* (pp. 9-39). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535666.006>
- Fan, Y., & van den Dool, H. (2004). Climate Prediction Center global monthly soil moisture data set at 0.5° resolution for 1948 to present. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D10), n/a–n/a. <https://doi.org/10.1029/2003JD004345>
- Foley, J. A., Costa, M. H., Delire, C., Ramankutty, N., & Snyder, P. (2003). Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1(1), 38-44. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2003\)001\[0038:GSHTEC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2003)001[0038:GSHTEC]2.0.CO;2)
- Gleijeses P. (1991). *Shattered hope : The Guatemalan Revolution and the United States, 1944-1954*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

- Grandia, L. (2000). ¿Cuántas personas quiere que vivan en Petén? En *Nuevas perspectivas de desarrollo sostenible en Petén*. Guatemala: FLACSO Guatemala.
- Hayes, D. J., Sader, S. A., & Schwartz, N. B. (2002). Analyzing a forest conversion history database to explore the spatial and temporal characteristics of land cover change in Guatemala's Maya Biosphere Reserve. *Landscape Ecology*, 17(4), 299-314.  
<https://doi.org/10.1023/A:1020542327607>
- John D. Aber. (1995). Terrestrial ecosystems. En Kevin E. Trenberth (Ed.), *Climate System Modeling* (2.<sup>a</sup> ed., p. 788). New York.
- Kaimowitz, D., & Angelsen, A. (2008). Will Livestock Intensification Help Save Latin America's Tropical Forests? *Journal of Sustainable Forestry*, 27(1-2), 6-24.  
<https://doi.org/10.1080/10549810802225168>
- Kalnay, E., & Cai, M. (2003). Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 423, 528.
- López-Carr, D. (2012). AGRO-ECOLOGICAL DRIVERS OF RURAL OUT-MIGRATION TO THE MAYA BIOSPHERE RESERVE, GUATEMALA. *Environmental research letters : ERL [Web site]*, 7(4), 045603. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/045603>
- Magaña, V. (1999). *Los impactos de El Niño en México*. Distrito Federal: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Manoharan, V. S., Welch, R. M., & Lawton, R. O. (2009). Impact of deforestation on regional surface temperatures and moisture in the Maya lowlands of Guatemala. *Geophysical Research Letters*, 36(21), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2009GL040818>

- Palma Murga, G., Taracena Arriola, A., & Aylwin Oyarzun, J. (2002). *Procesos agrarios desde el siglo XVI a los Acuerdos de Paz*. Guatemala: Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales Misión de Verificación de las Naciones Unidas Dependencia Presidencial de Asistencia Legal y Resolución de Conflictos sobre la Tierra.
- Pielke, R. A., Sr., Avissar, R., Raupach, M., Dolman, A. J., Zeng, X., & Denning, A. S. (1998). Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate. *Global Change Biology*, 4(5), 461-475. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1998.t01-1-00176.x>
- Rosalva Landa, Víctor O. Magaña Rueda, & Carolina Neri. (2008). Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático [Institucional]. Recuperado 1 de diciembre de 2017, a partir de [https://ceiba.org.mx/publicaciones/rosalvalanda/agua\\_y\\_clima.pdf](https://ceiba.org.mx/publicaciones/rosalvalanda/agua_y_clima.pdf)
- Sader, S. A., Sever, T., Smoot, J. C., & Richards, M. (1994). Forest change estimates for the northern Petén region of Guatemala — 1986–1990. *Human Ecology*, 22(3), 317-332. <https://doi.org/10.1007/BF02168855>
- Sampaio, G., Nobre, C., Costa, M. H., Satyamurty, P., Soares-Filho, B. S., & Cardoso, M. (2007). Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophysical Research Letters*, 34(17), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2007GL030612>
- Schwartz, N. B. (1990). *Forest society: a social history of Petén, Guatemala*. University of Pennsylvania Press.
- Sud, Y. C., Lau, W. K.-M., Walker, G. K., Kim, J.-H., Liston, G. E., & Sellers, P. J. (1996). Biogeophysical Consequences of a Tropical Deforestation Scenario: A GCM Simulation Study. *Journal of*

*Climate*, 9(12), 3225-3247. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1996\)009<3225:BCOATD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009<3225:BCOATD>2.0.CO;2)

Sundberg, J. (1998). NGO landscapes in the Maya Biosphere Reserve, Guatemala[a]. *Geographical Review*, 88(3), 388.

Villar, L. (1998). *La flora silvestre de Guatemala*. Guatemala, Guatemala: Editorial Universitaria.

Yan, Y. Y. (2005). Intertropical Convergence Zone (ITCZ). En J. E. Oliver (Ed.), *Encyclopedia of World Climatology* (pp. 429-432). Dordrecht: Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/1-4020-3266-8\\_110](https://doi.org/10.1007/1-4020-3266-8_110)

## Anexos

### Anexo 1. Biomas de Guatemala

Las áreas seleccionadas, donde había certeza del cambio de uso de suelo, se validaron utilizando el NDVI y los mapas de uso de suelo del proyecto “Global Land 30”. Se muestra a continuación información de los ecosistemas en Guatemala, según Villar, (1998).



Valor	Bioma	%
1	Selva tropical húmeda	61.37
2	Selva tropical lluviosa	24.12
3	Selva de montaña	2.97
4	Chaparral espinoso	0.86
5	Bosque de montaña	8.42
6	Selva subtropical húmeda	1.70
7	Sabana costera del Pacífico	0.56

#### Selva tropical húmeda

Este bioma, representativo de la región de Petén al norte del país, se caracteriza por el relieve plano, suelos pobres, aunque con selvas exuberantes y una alta diversidad de fauna asociada. Hay varias asociaciones vegetales presentes en este bioma como son Selva Alta, Selva Baja, Sabana, Humedales Lacustres y Llanuras de inundación. En general es un bioma de clima muy caluroso y húmedo, con altitud por debajo de los 900msnm, no hay una marcada diferencia entre la época de lluvias y la época seca, aunque se asume que la época seca es entre noviembre y junio. La vegetación dominante son árboles de “hoja ancha”, aunque se encuentran algunos pinares (*Pinus caribbea*).

### **Selva tropical lluviosa**

Aunque es similar a la Selva Tropical Húmeda, la pluviosidad y humedad atmosférica es mucho más alta, la vegetación es más compleja y se observa mucha similitud con la vegetación suramericana. Con un rango altitudinal desde el nivel del mar hasta 1300msnm, el clima predominante es cálido húmedo y aunque la época seca de verano no está muy definida se puede esperar más lluvias entre junio y octubre. En este bioma se encuentran varios ecosistemas, incluyendo selvas altas perennifolias, sabanas y pastizales asociados, manglares y esteros entre otros. La vegetación dominante son árboles de hoja ancha, aunque hay algunas asociaciones de pinos (*Pinus caribea* y *P. oocarpa*).

### **Selva de montaña**

Con una alta complejidad en su composición florística, se ubica en zonas montañosas de pendientes marcadas entre los 1100 y 2900msnm. Tiene una alta diversidad de hábitat y vegetación asociada (aguacates, pinos, encinos, helechos arborescentes entre otros); el sotobosque está formado por variedad de plantas y musgos ubicados en diferentes estratos que le confieren una alta complejidad, mientras en lo alto de la copa de los árboles se observa una gran diversidad de epífitas debido a la alta humedad. El clima presente puede variar entre templado a cálido húmedo durante el día, pero las noches pueden ser bastante frías; la alta pluviosidad es característica de este bioma, siendo la época más lluviosa entre abril y septiembre.

### **Chaparral o matorral espinoso**

Este es uno de los biomas más frágiles y con menor representación en el SIGAP, está distribuido de manera discontinua en la región oriental y central del país, en valles rodeados de montañas las cuales generan el fenómeno llamado sombra de lluvia, trayendo como consecuencia zonas secas con muy baja precipitación pluvial. La vegetación es característica de zonas áridas, con abundantes cactus y plantas con espinas, generalmente caducifolias (es decir que pierden las hojas en la temporada seca). Se ubica entre los 100 y 1000msnm, con una época de lluvias corta pero bien definida (entre junio-octubre).

### **Bosque de montaña**

Es un bioma que recuerda la influencia de Norteamérica en la biodiversidad, como se describió previamente. El bosque de montaña tiene pocas especies, solo se diferencia un estrato y el sotobosque es pobre, sin embargo, varios endemismos de plantas y fauna se pueden encontrar en este bioma, el cual ocupa todo el altiplano de Guatemala entre 2000 y 4200msnm; el clima es variado, pero con tendencia a ser frío y se observa una estacionalidad relacionada con las latitudes del norte.

### **Selva subtropical húmeda**

Este bioma ubicado la porción de la región Pacífico llamada Boca-costa, a lo largo de la vertiente pacífica de la cadena volcánica, se encuentra aproximadamente entre los 800 y 1200msnm. Con una vegetación diversa, clima cálido a templado, la cadena volcánica hace de barrera a los vientos cargados de humedad provenientes del sur por lo que es normal una alta precipitación pluvial en sus laderas.

### **Sabana Tropical Húmeda:**

Ubicado a lo largo de la costa Pacífica, desde el nivel del mar hasta cerca de 1000msnm, con un clima principalmente cálido. Actualmente su vegetación original (selvas caducifolias, selvas de hojas perennes, sabanas, manglares) está altamente transformada y reemplazada por paisajes agrícolas; sin embargo, algunos remanentes de bosque y vegetación permanecen y se observan numerosos ríos que bajan de la cadena volcánica hacia el mar.

## Anexo 2. Dinámica forestal de Guatemala

### Dinámica de la cobertura forestal

En 2001 la Universidad del Valle de Guatemala (UVG), el Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP) y el Instituto Nacional de Bosques (INAB) realizaron un mapeo de la dinámica de la cobertura forestal de Guatemala. Se utilizaron datos de los sensores LANDSAT 5 y 7 como fuente primara de información correspondientes al año 2010, aunque en ciertas áreas se utilizaron imágenes de los años 2009 y 2011 en función de su calidad. Con estos productos, se observa como la cobertura forestal ha sido mermada. Estos productos también sirvieron de referencia para seleccionar las áreas de análisis.

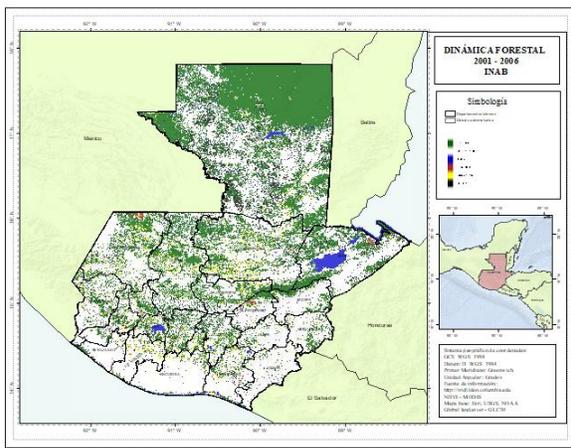


Figura 64 Dinámica forestal 2006

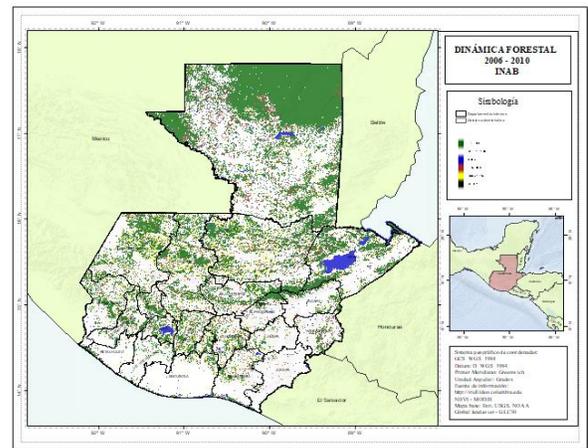


Figura 65 Dinámica forestal 2010