



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

**ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA
MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES EN LAGOS DEL
PARQUE NACIONAL LAGUNAS DE MONTEBELLO
DURANTE EL PERIODO DE 1991-2017**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
BIÓLOGO**

**PRESENTA:
ISAÍAS CASTILLO CRUZ**

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. ROBERTO BONIFAZ ALFONZO
ASESOR INTERNO:
M. EN C. ARMANDO CERVANTES SANDOVAL**



CIUDAD DE MÉXICO 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

A la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.

Al director de tesis Dr. Roberto Bonifaz Alfonzo y al personal actual y anterior perteneciente a la sección de Radiación Solar del Instituto de Geofísica.

Al asesor interno M. en C. Armando Cervantes Sandoval.

A los sinodales M. en C. Faustino López Barrera, M. en E.S. María Cristina Alvarado Domínguez y M. en C. Nicté Ramírez Priego.

Al personal a cargo, colaboradores y habitantes del Parque Nacional Lagunas de Montebello.

INDICE

1	Resumen.....	2
2	Introducción.....	2
3	Marco teórico	4
3.1	Percepción remota.....	4
3.1.1	Imágenes satelitales	6
3.1.2	Satélites LANDSAT	7
3.2	Sistemas de información geográfica.....	9
3.3	Clorofila.....	10
4	Planteamiento del problema.....	13
5	Preguntas de investigación	13
6	Objetivo general	13
6.1	Objetivos particulares	13
7	Hipótesis	14
8	Área de estudio	14
8.1	Morfología.....	14
8.2	Clima	17
8.3	Vegetación.....	18
9	Metodología	18
9.1	Pre-procesamiento de imágenes	21
9.1.1	Descarga de imágenes satelitales	21
9.1.2	Formación de stacks para visualización de imágenes	22
9.1.3	Recorte de imágenes	22
9.1.4	Llenado de pixeles vacíos de imágenes landsat 7 slc-off	22
9.1.5	Corrección atmosférica	23
9.2	Aplicación del modelo de cuantificación de clorofila	23
9.3	Análisis estadístico de los resultados	25
10	Resultados	26
11	Discusión.....	42
12	Conclusiones.....	44
13	Referencias Bibliográficas.....	45
14	Apéndice	51

1 Resumen

Los lagos que se encuentran el Parque Nacional Lagunas de Montebello se han visto afectados por un cambio de coloración, pasando de tonalidades que abarcaban desde azules profundos hasta esmeraldas, en la actualidad estos tonos han cambiado por la predominancia de verdosos-amarillentos en muchos lagos. Para entender mejor los cambios a lo largo del tiempo y entender el comportamiento del cambio de coloración y reflejarlo en cifras, se ha hecho uso de un modelo numérico que estima la cantidad de clorofila presente en los lagos por medio de percepción remota aplicado a una serie de imágenes satelitales que abarcan desde 1990 hasta 2017. A partir de esta metodología se analiza la serie de tiempo para ver el comportamiento de las concentraciones de clorofila y la relación que tuvo con el cambio de tonalidad, pasando de solo el impacto visual que proporcionaban las imágenes a valores numéricos cuantificables y que pueden ser analizados y comparados entre los lagos, temporadas de estiaje, meses y a lo largo de los años, estos datos obtenidos al ser validados contra mediciones realizadas en la zona por diversos autores alcanzaron un valor de r^2 de hasta el 0.97, con lo que se pudo reafirmar que existen dos conjuntos de lagos; uno que se encuentra gravemente afectado y otro en el cual el impacto a resultado mínimo hasta el momento y que el comportamiento estacional y anual ha variado.

2 Introducción

Una imagen satelital se puede resumir como una matriz de datos contenida en una serie de celdas con un tamaño delimitado en un área determinada, las cuales han surgido ante la necesidad por obtener información acerca de los fenómenos que ocurren a diario en el planeta, esto ha generado el desarrollo de una gran cantidad de herramientas en las que el uso de sus datos puede diversificarse. Un factor limitante de estas herramientas es el procesamiento contra la adquisición de datos, lo que provoca un vacío en ciertos lapsos del procesamiento, aunque la información se encuentre a total disposición de ser explorada, tratada, entendida y explicada hacia el grueso de la población. El aprovechamiento de la obtención de datos debe ser primordial para su máxima difusión lo que permitirá conocer más eficientemente los procesos ambientales que ocurren en el planeta.

Durante el 2003 la población que se encuentra cercana al Parque Nacional Lagunas de Montebello (PNLM) reportó un cambio en la coloración de los lagos de un tono cristalino a uno amarillo-verdoso, además de olores fétidos y mortandad de peces, problemática que se vio con mayor notoriedad en los meses de diciembre a febrero. En 2009 la Secretaría de Medio ambiente y Vivienda dio inicio a actividades de monitoreo y evaluación de los lagos de Montebello, con el objetivo de identificar cuáles de ellos cambiaron de coloración, y la existencia de conexión entre estos (CONAGUA, 2009). A partir de los reportes se llegó a la determinación de realizar estudios exhaustivos que contribuyeran a la explicación de estos eventos y la posibilidad de revertir el proceso.

En 2012 la Comisión Federal de Electricidad (CFE) realizó un estudio que se enfocó en la caracterización climatológica, meteorológica e hidrográfica en la cuenca del Río Grande de Comitán. Ese mismo año se inició el proyecto por parte de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) con fondos mixtos de la Comisión Nacional del agua (CONAGUA) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) el cual se llamó “Estudio hidrológico y de calidad del agua del sistema lagunar de Montebello” a partir del que se generó una gran cantidad de información inédita para la zona. Algunos trabajos que se desarrollaron en la zona que tiene influencia sobre el PNLM fueron estudios de tipo hidrogeoquímico (Juárez-Hernández, 2014; Alvarado-Velázquez, 2015; Barajas–García, 2017), geomorfológicos (Duran–Calderón, 2013; Mora *et al.*, 2016), cartográficos (Bahena–Bahena, 2014), de suelos (Martínez–Ángeles, 2015; López–Rivera, 2017; Parra–Carrillo, 2017) y de aguas subterráneas (Olea-Olea, 2015; Olea-Olea & Escolero, 2018).

A la par de estas investigaciones Villalpando – Alanís en 2015 con imágenes satelitales y cuantificaciones de clorofila-a *in situ*, obtiene un modelo que permite estimar la concentración de Chl-a presente en los lagos a partir de percepción remota.

Con la aplicación del modelo mencionado el presente trabajo tiene el propósito de obtener una fuente alternativa confiable de información en cuanto a la cantidad presente de Chl-a en los lagos de Montebello, así como obtener un registro histórico de esta variable en el rango de tiempo que permita el acervo de imágenes satelitales disponible para la zona de estudio debido a que la información antes de 2012 es inexistente y resulta de suma importancia por el cambio observable en el sistema lacustre.

3 Marco teórico

3.1 Percepción remota

El término “remote sensing” (percepción remota) fue utilizado por primera vez en 1960, el cual se refería a la observación y medida de un objeto sin estar en contacto con él, de igual manera se le considera como la adquisición de información en torno a un objeto sin estar en contacto físico con este (Ormeño, 2006).

Ahora se puede definir a la teledetección espacial como una técnica capaz de generar imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas fuera de la Tierra, que pueden transmitir estos datos hacia las instalaciones en tierra para su almacenamiento y posterior procesamiento, accediendo a un mejor aprovechamiento de recursos e información para una determinada aplicación, esta herramienta tiene como elementos principales a: la fuente de energía, a partir de la cual se obtiene el flujo energético que tiene por fin llegar al sensor y recibir una señal; el objeto a observar, que es la superficie terrestre y sus diversas áreas de interés tales como vegetación, suelo, cuerpos de agua, etc.; el sensor, cuya función es recibir la energía manifestada por la cubierta terrestre a partir de la fuente de energía, además que almacena la información obtenida de una forma que pueda ser interpretada y transmitida a la Tierra; la base en tierra, administradora y encargada de recopilar los datos obtenidos por el sensor y ponerlos a disposición del público que está interesada en éstos; y por último, el usuario, la persona para la que resulta valiosa y necesaria la información generada por este sistema (Chuvienco, 1995) (Figura 1).

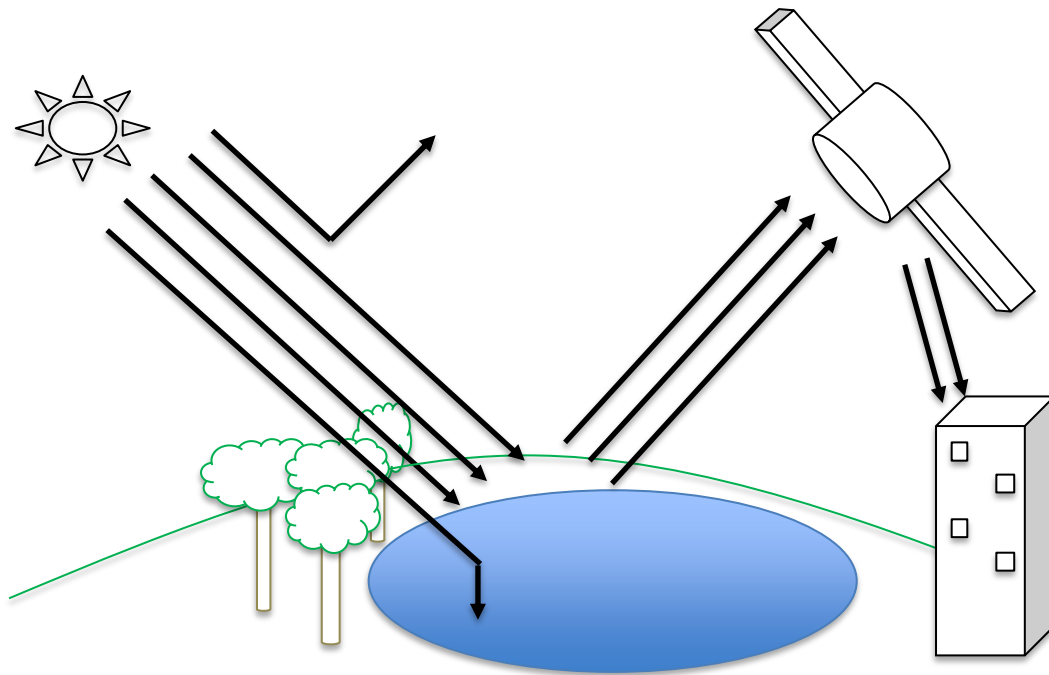


Figura 1. *Esquema de capturas de las imágenes satelitales desde el espacio*

El principio básico que sustenta la percepción remota es el espectro electromagnético, el cual se puede definir como la escala con la que podemos separar los intervalos entre la frecuencia o longitudes de onda que presenta la radiación electromagnética emitida por el Sol, estos intervalos abarcan desde los rayos gamma, rayos X, ultravioleta, visible, infrarrojo, microondas y radio, los cuales son reflejados o absorbidos por los objetos o los fenómenos que se estudian (Figura 2).

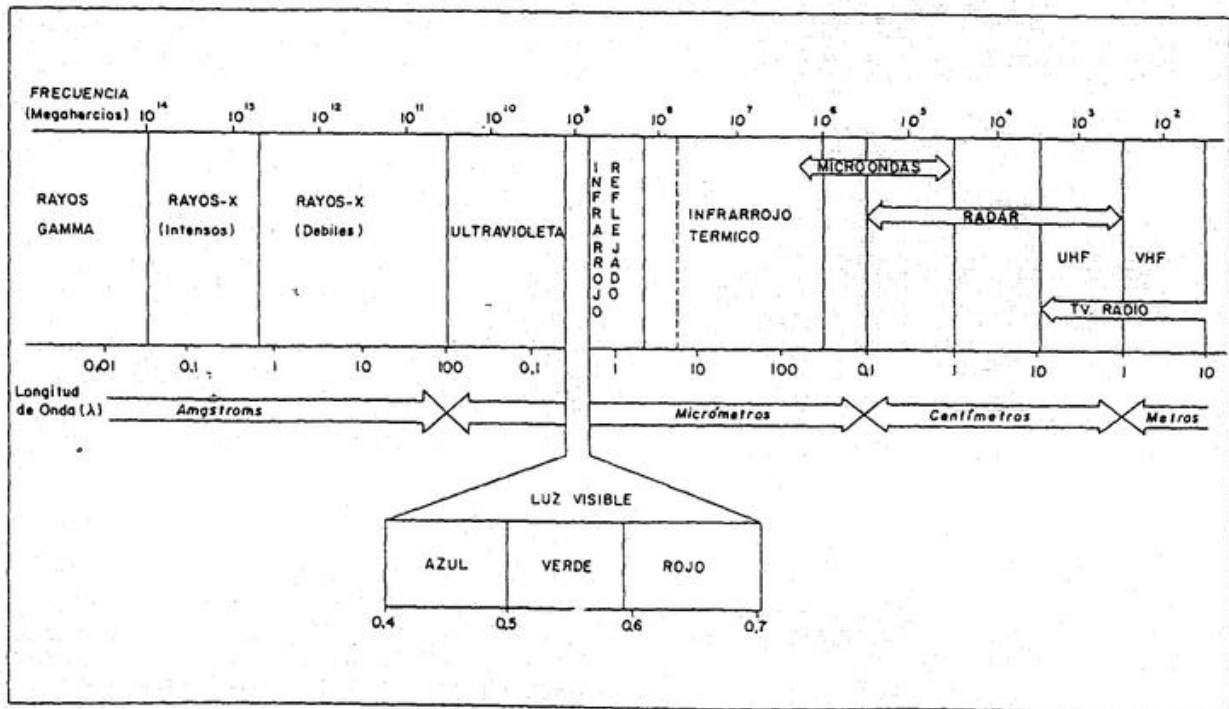


Figura 2. Esquema del espectro electromagnético. Tomado de *Fundamentos de teledetección*, Chuvieco, 1995.

La diferencia de la cantidad de energía y la longitud de onda que reflejan los objetos permite distinguir cada uno de ellos, a esta respuesta se le conoce como firma espectral, la cual es única para cada objeto y dependerá de la capacidad del sensor hacer reconocible uno de otro, por lo que si un sensor no tiene la suficiente capacidad para medir estas diferencias no podrá discriminarlas entre cada una de ellas, por el contrario si es mayor la capacidad entre pequeños valores tendrá un mayor poder para definir objetos y así, por ejemplo, se podrá diferenciar el agua de la vegetación o del suelo desnudo. En resumen, para la teledetección las bandas de mayor importancia son las del espectro visible, el infrarrojo, y las microondas, tomando en cuenta que esto depende de los sensores y su capacidad de captar la radiación y convertirla en información (Ángeles, 2019).

3.1.1 Imágenes satelitales

Cuando se toma la elección de qué producto es más conveniente utilizar para el fin deseado, se debe tener en cuenta las especificaciones propias de las imágenes, un punto fundamental son las resoluciones, éstas están enfocadas en discriminar elementos que proporcionarán tener el detalle óptimo de desempeño y las cuales son:

- resolución espacial (tamaño de pixel)
- resolución espectral (número y ancho de bandas con las que cuenta el sensor)
- resolución radiométrica (capacidad de detección en la variación de las escalas de nivel de energía recibida)
- resolución temporal (periodo de tiempo transcurrido entre las tomas de escena)

La utilización de imágenes satelitales se ha vuelto una práctica cotidiana en la actualidad, ya que pueden ser empleadas en diversos campos como, por ejemplo: el monitoreo de la vegetación, aplicaciones geológicas, en el estudio de los recursos naturales y también de los cultivos. Además, cabe resaltar que la buena resolución de sus sensores, la cobertura periódica de imágenes alrededor del planeta y su eficiente distribución, explican el uso de expertos en campos diversos (Brizuela 2007).

Cuando se realiza el análisis de la evolución de algún fenómeno con ayuda de imágenes satelitales, es necesario utilizar una secuencia que abarque el período deseado, generalmente, debido a la disponibilidad, es necesario utilizar imágenes provenientes de diferentes sensores. Cada sensor posee características propias y distintivas que definen la resolución de éste en todas sus dimensiones, por lo que las imágenes resultantes también tienen resoluciones distintas, esto hace necesario realizar algunas operaciones previas al análisis, dado que se deben uniformizar todas las imágenes de la secuencia, de manera que éstas puedan ser comparables entre sí y con esto obtener el resultado deseado (Tristán et al, 2008). La uniformidad requerida se obtiene transformando los datos “crudos” provenientes de los satélites a unidades físicas cuantificables que puedan ser medidas y diferenciadas, y así lograr las características necesarias para su aplicación en una serie de tiempo.

3.1.2 Satélites LANDSAT

El programa LANDSAT consta de una serie de satélites en órbita cuyo fin es la observación de la Tierra en alta resolución. Desde 1972, los satélites LANDSAT han adquirido continuamente imágenes satelitales basadas en la superficie de la Tierra, proporcionando datos que sirven como recursos valiosos para el uso e investigación de cambios ocurridos en el planeta. Los datos espectrales son útiles para una serie de aplicaciones que incluyen silvicultura, agricultura, geología, planificación regional y educación (USGS, 2022).

LANDSAT es un esfuerzo conjunto del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), quien desarrolla instrumentos de teledetección y la nave espacial, luego lanza y valida el rendimiento de los instrumentos y satélites, el USGS asume la propiedad y operación de los satélites, además de gestionar toda la recepción en tierra, archivo de datos, generación de productos y distribución de datos (INEGI, 2022). El resultado de este programa es un registro continuo sin precedentes de los cambios naturales y antropogénicos en el paisaje global.

El Departamento del Interior norteamericano, la NASA y el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos se propusieron un ambicioso esfuerzo para desarrollar y lanzar el primer satélite civil de observación de la Tierra, su objetivo se logró el 23 de julio de 1972, con el lanzamiento del Satélite de Tecnología de Recursos de la Tierra (ERTS-1), que luego pasó a llamarse Landsat 1, los lanzamientos de Landsat 2, Landsat 3 y Landsat 4 siguieron en 1975, 1978 y 1982, respectivamente, cuando se lanzó Landsat 5 en 1984, nadie podría haber predicho que el satélite continuaría entregando datos globales de alta calidad de las superficies de la Tierra durante 28 años y 10 meses, estableciendo oficialmente un nuevo récord mundial Guinness para el "satélite de observación de la Tierra de mayor tiempo en funcionamiento", Landsat 6 no logró alcanzar la órbita en 1993, Landsat 7 se lanzó con éxito en 1999, Landsat 8 en 2013, estos últimos dos satélites aún continúan generando datos. Con el lanzamiento de Landsat 4 surgió una novedad que le daría una característica distintiva a los anteriores satélites y era que sus instrumentos tenían la capacidad de distinguir la parte azul del espectro electromagnético visible generando una banda única para esta sección, así paso de contar con solo cuatro bandas a poder obtener información en siete bandas espectrales incluida una banda térmica. Las imágenes Landsat 4-5 Thematic Mapper (TM) consisten en siete bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las Bandas 1 a 5 y 7, la resolución espacial para la Banda 6 (infrarrojo térmico) es de 120 metros, pero se vuelve a muestrear a 30 metros, el tamaño aproximado de la escena es de 170 km de norte a sur por 183 km de este a oeste. Las imágenes Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) constan de ocho bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las Bandas 1 a 7, la resolución para la Banda 8 (pancromática) es de 15 metros, el tamaño aproximado de la escena es de 170 km de norte a sur por 183 km de este a oeste. El 31 de mayo de 2003, el *Scan Line Corrector* (SLC), que compensa el movimiento hacia adelante del satélite, falló, los esfuerzos posteriores para recuperar el SLC no tuvieron éxito y el fracaso es permanente, sin un SLC operativo,

la línea de visión del sensor traza un patrón en zigzag a lo largo de la ruta terrestre del satélite, como resultado, el área de la imagen se duplica, con un ancho que aumenta hacia el borde de la escena, cuando se procesan los datos de Nivel 1, las áreas duplicadas se eliminan, dejando vacíos de datos, aunque estas escenas solo tienen el 78 por ciento de sus píxeles restantes después de eliminar las áreas duplicadas, estos datos siguen siendo algunos de los datos de satélite civil más precisos geométrica y radiométricamente del mundo. Las imágenes Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) y el sensor de infrarrojos térmicos (TIRS) consisten en nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las bandas 1 a 7 y 9, la nueva banda 1 (ultra azul) es útil para estudios en costas y aerosoles, la nueva banda 9 es útil para la detección de nubes cirrus, la resolución para la Banda 8 (pancromática) es de 15 metros, las bandas térmicas 10 y 11 son útiles para proporcionar temperaturas superficiales más precisas y se recogen a 100 metros, el tamaño aproximado de la escena es de 170 km de norte a sur por 183 km de este a oeste (USGS, 2022).

3.2 Sistemas de información geográfica

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) se define de acuerdo con la National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA) como un “sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos especialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión”, lo que puede resumirse a cuatro elementos: soporte físico (hardware), soporte informático (software), datos geográficos y equipo humano (Daniele, 2009).

Para el correcto funcionamiento de un SIG es indispensable que todas las partes funcionen adecuadamente, dado que, si alguna no realiza las funciones correspondientes, el sistema por completo resulta no funcional. El éxito o fracaso para el uso de este sistema depende en gran medida del nivel de conocimientos que maneja el personal, tanto en el uso de las tecnologías, como en los procedimientos, así como del tema a analizar y de igual medida la capacidad para resolver los problemas que puedan surgir durante el proceso. Particularmente los datos usados en los SIG están basados en los formatos vector y raster. En el formato vector la información se ve reflejada en puntos, líneas y polígonos referenciados geográficamente, lo que permite una conceptualización de la realidad en formas geométricas básicas partiendo desde un conjunto de puntos, pasando por una red

de líneas hasta alcanzar figuras irregulares propias del medio en el cual se trabaje. Mientras que con el formato raster la información se ve restringida a una red de cuadrícula perfecta en la que cada espacio representa la unidad mínima que puede ser representada bajo este formato (Figura 3). Cada formato tiene sus pros y contras que en real medida depende totalmente de la naturaleza del trabajo que se lleve a cabo y que incluso llegue a una combinación de ambos formatos de datos.

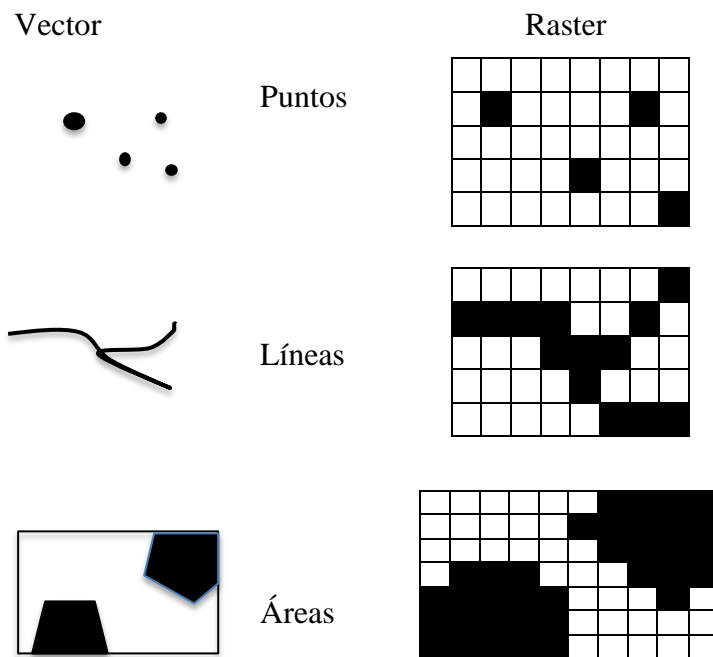


Figura 3. Esquema con ejemplo de cuadrícula raster y datos vectores.

3.3 Clorofila

La clorofila-a (Chl-a) es el pigmento principal encontrado en todas las especies de fitoplancton y la concentración de esta se usa para estudios de productividad primaria y la determinación de la biomasa de fitoplancton. Debido a una alta correlación entre las concentraciones de Chl-a y nutrientes, este pigmento se ha usado como un indicador del estado trófico (Watanabe, 2015).

Para determinar el estado trófico de ríos, lagos y embalses, los investigadores crearon diferentes formas de clasificarlos. El Índice de estado trófico (TSI) utiliza la concentración de fósforo, la transparencia del disco Secchi y la concentración de Chl-a como parámetros de la ecuación. El concepto trófico es multidimensional, involucrando aspectos de carga de nutrientes, concentración de nutrientes, productividad, cantidad y calidad de fauna y flores,

e incluso la morfometría del lago, como tal, el estado trófico no se puede evaluar examinando uno o dos parámetros (Carlson, 1977).

El incremento masivo en el número de células fitoplanctónicas que puede consumir el oxígeno o nutrientes del agua afectando la biota acuática se conoce como florecimiento algal nocivo (FAN) y éste puede causar o no un cambio en la coloración del agua (Schmidt, 2011). Se puede separar a tres tipos diferentes de FAN que serían: los que ocasionan solamente cambio en la coloración del agua y que en casos extremos provocan la muerte de peces por anoxia debido al crecimiento extraordinario en cuanto al número de organismos; los que producen toxinas capaces de llevar a la enfermedad a los humanos debido a la ingesta de manera directa o indirectamente y aquellos que no resultan tóxicos de ninguna forma para los humanos, pero que en los peces e invertebrados obstruyen sus agallas ocasionando la muerte (Hallegreff, 1993). Los FAN están asociados a una acelerada eutrofización de los cuerpos de agua, principalmente son debidos a una excesiva carga de nutrientes (nitrógeno y fósforo), una alta temperatura superficial de agua ($> 20^{\circ}\text{C}$), una persistente estratificación de la columna de agua y un alto contenido de materia orgánica (Paerl, 1996).

La clorofila es una molécula que capta la energía luminosa y la transforma en energía química, esto lo hace a longitudes de ondas específicas las cuales le proporciona una firma espectral determinada y distintiva, ya que tienen un pico de absorción en la luz azul y roja, y reflejan fuertemente el verde, haciendo posible su observación en una imagen de satélite que sean sensibles a estas longitudes de onda del espectro visible, dado que tiene un gran contraste contra el agua o el suelo (Figura 4). Las superficies acuáticas absorben la mayor parte de la radiación visible que reciben, siendo su mayor punto de absorción cuanto mayor sea su longitud de onda. La mayor reflectividad del agua clara se produce en azul, reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo cercano, donde es prácticamente nula (Lira, 2003). La variabilidad del agua se detecta mejor en las longitudes de onda más cortas (azul y verde), que se relacionan con la profundidad, el contenido de materiales suspendidos (clorofila, arcilla y nutrientes) y rugosidad de superficie (Oliveros, 2014).

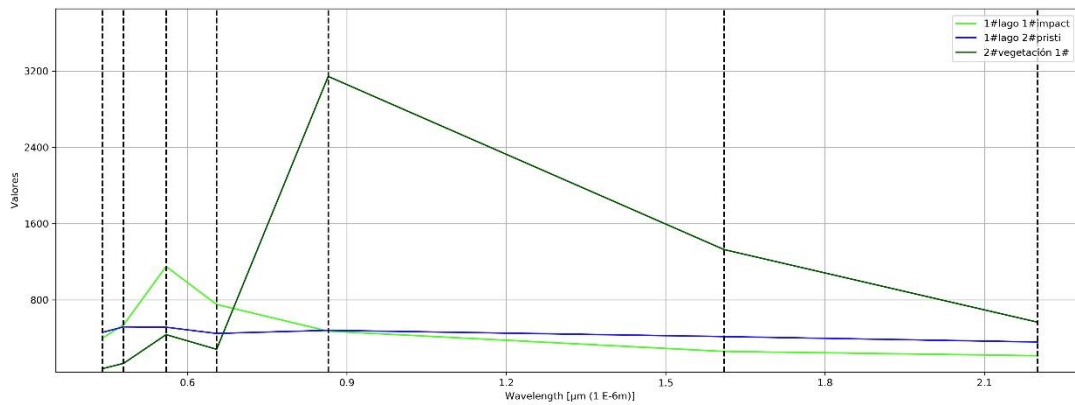


Figura 4. Imagen de firma espectral de agua y clorofila (longitud de onda, reflectancia). Los valores de reflectancia en el eje “y” se multiplican por 0.0001 para obtener la escala de 0 a 1.

En cuanto a la composición, diversos estudios han demostrado la posibilidad de emplear sensores espaciales para cartografiar contenido de clorofila en el agua. Si el agua ofrece importantes concentraciones de clorofila, la reflectividad en el azul tiende a descender, aumentando en el verde (Meliá, 1986). La detección remota de clorofila ha sido ampliamente utilizada tanto en el medio terrestre como en el acuático, se han generado diversos índices que buscan revelar la cantidad de clorofila contenida, en tierra puede ser relacionado con el vigor, actividad fotosintética o condiciones de estrés de plantas y en sistemas acuáticos se relacionan con cantidad de biomasa, florecimientos algales nocivos o contaminación de cuerpos acuáticos, existen algoritmos que son aceptados para la cuantificación de clorofila en aguas oceánicas mediante las bandas azul a verde (O’Reilly et al., 1998), también algunos que utilizan las bandas roja e infrarrojas cercanas (Dall’Olmo et al., 2005; Gitelson et al., 2007) e incluso algoritmos más avanzados que implican un enfoque de redes neuronales (González Vilas et al., 2011).

Para el caso del PNLM, Villalpando Alaníz en 2015 realizó un estudio para conocer el estado trófico de los lagos mediante percepción remota, en el que utilizó un cociente entre las bandas verdes y azul de una imagen satelital SPOT 6, contrastado con mediciones de reflectancia obtenidas con un espectrorradiómetro y concentraciones de Chl-a *in situ*. Generó un modelo de estimación de concentración de clorofila (MCC) basándose en el trabajo de Zimba y Gitelson de 2006 que plantean el uso de más de una banda de imagen satelital para obtener resultados en la visualización de clorofila suspendida en el agua, alcanzando una $r^2 = 0.78$ entre la Chl-a estimada y la medida, a partir del cual se estableció este proyecto.

4 Planteamiento del problema

En lagos del PNLM a principio de los años 2000 sucedió un cambio en la coloración de estos que no pudo ser estudiada en su momento y de la cual no se tiene fecha exacta de inicio ni antecedentes a este evento, el uso de la percepción remota ha ido en aumento durante los últimos años debido a la facilidad en la observación de los procesos que ocurren en la Tierra, en este trabajo se plantea una propuesta para conocer las condiciones anteriores y posteriores al evento reportado como cambio de coloración, esta herramienta puede ser una respuesta para conocer el momento en que iniciaron los cambios de este sistema lacustre si el procesamiento de la información con la que se cuenta, con el uso de las imágenes satelitales y la aplicación del MCC se efectúa de una manera adecuada.

5 Preguntas de investigación

A partir de la generación del MCC con el que se puede estimar la concentración de Chl-a en lagos del PNLM el presente proyecto se planteó las siguientes preguntas de investigación: ¿El uso de imágenes satelitales que abarquen un período de años amplio combinado con la aplicación del MCC mostrará cuando se registraron eventos que indican un cambio visible en los lagos de Montebello en cuanto a su color? Y ¿Será cuantificable este cambio por la concentración de Chl-a a lo largo del tiempo y entre los cuerpos de agua?

6 Objetivo general

Analizar el comportamiento y variaciones de la concentración de Chl-a en lagos del Parque Nacional Lagunas de Montebello en el periodo de tiempo de 1990 al 2017 mediante la utilización de una serie de imágenes de satélite con la aplicación del MCC para conocer la magnitud del cambio en el estado del sistema lagunar.

6.1 Objetivos particulares

Realizar el procesamiento de imágenes satelitales de la zona del Parque Nacional Lagunas de Montebello para una comparación homogénea de éstas a través de los años.

Aplicar el modelo de estimación de concentración de Chl-a a las imágenes satelitales obtenidas de los lagos del Parque Nacional Lagunas de Montebello a lo largo de una serie de tiempo.

Comparar los valores de concentración de Chl-a para cada uno de los lagos, las temporadas de estío y lluvias en la serie de tiempo a través del análisis de imágenes satelitales.

7 Hipótesis

Dado que el estado actual de algunos lagos del Parque Nacional Lagunas de Montebello en cuanto al color es visiblemente diferente al observado a principios de los noventa se podrá estimar el incremento en la concentración de clorofila con la ayuda de las imágenes satelitales gracias a la aplicación del MCC, así como señalar un cambio significativo y gradual en los lagos a lo largo de la serie de tiempo el cual podrá ser reportado con exactitud.

8 Área de estudio

8.1 Morfología

Localizado en la región Sur-Sureste del Estado de Chiapas, en la frontera con Guatemala, el Parque Nacional Lagunas de Montebello abarca una superficie de 6,425.4927 ha y comprende parte de los municipios La Independencia y La Trinitaria (Diario Oficial de la Federación 16 de diciembre de 1959). Sus coordenadas extremas son 16° 04' 40" y 16° 10' 20" Latitud Norte y 91° 37' 40" y 91° 47' 40" Longitud Oeste (Figura 5).

Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM

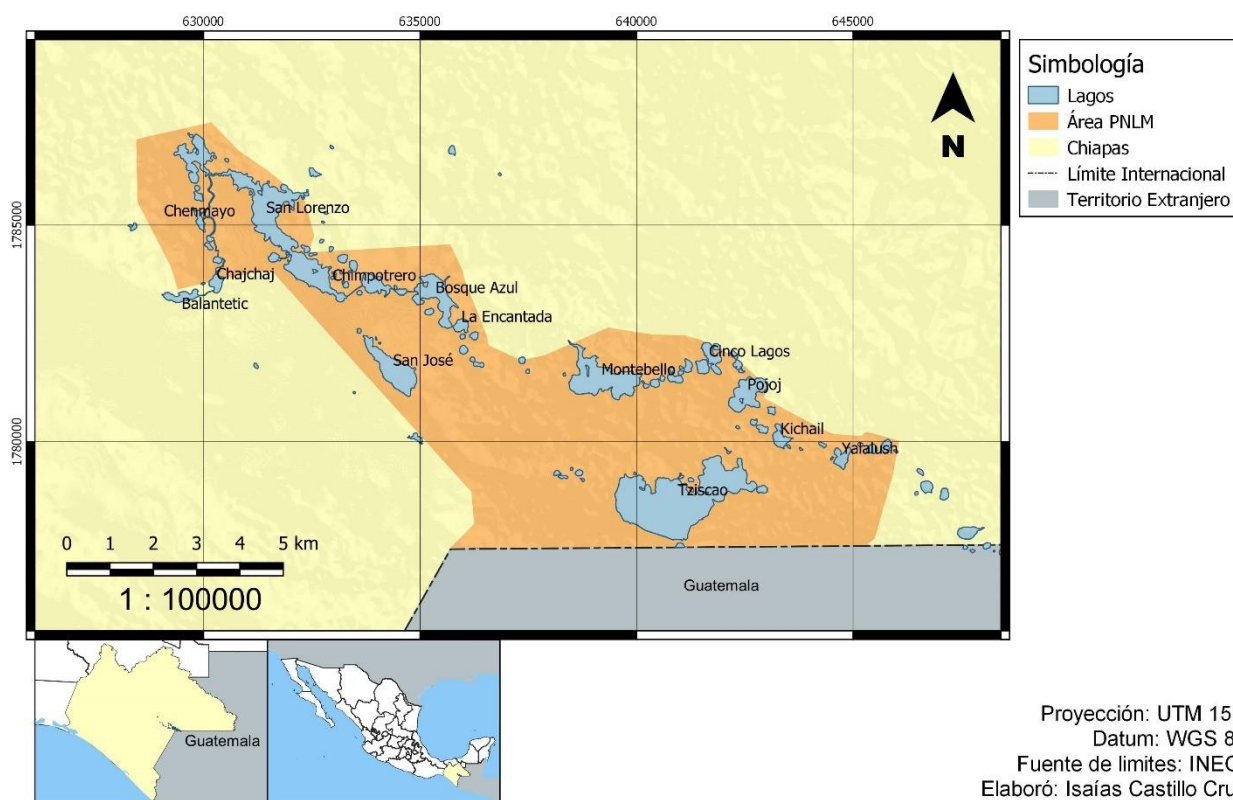


Figura 5. Mapa de localización del Parque Nacional Lagunas de Montebello. Los nombres de los lagos corresponden a los 14 cuerpos de mayor superficie

Los lagos del Parque conforman un complejo lacustre de origen cárstico, extendido entre territorio mexicano y guatemalteco. La alimentación de las aguas lacustres es principalmente subterránea (Vásquez y Méndez, 1994). En su génesis estos lagos constituyeron dolinas, úvalas y poljes cársticos formadas por el derrumbe de los techos de los sistemas de cuevas subterráneas que se originaron por la disolución química de las calizas. Su posición específica dentro del sistema de las aguas freáticas cársticas, facilita el relleno de estas depresiones con aguas subterráneas y el nivel del espejo lacustre, estos lagos presentan variables morfológicas como la existencia de orillas, pequeñas playas o zonas inundables y los lagos formados en dolinas con paredes escarpadas carecen de orillas planas y cuentan con espejos lacustres relativamente profundos (Alcocer et al., 2016). El sistema cárstico de Montebello está constituido por 83 lagos. Muchos de ellos están conectados superficialmente. Los primeros lagos al oeste del Parque son el final de la cuenca del Río Grande de Comitán y es donde se conectan superficialmente varios de estos con el flujo de agua del sistema (Figura 6).

Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM

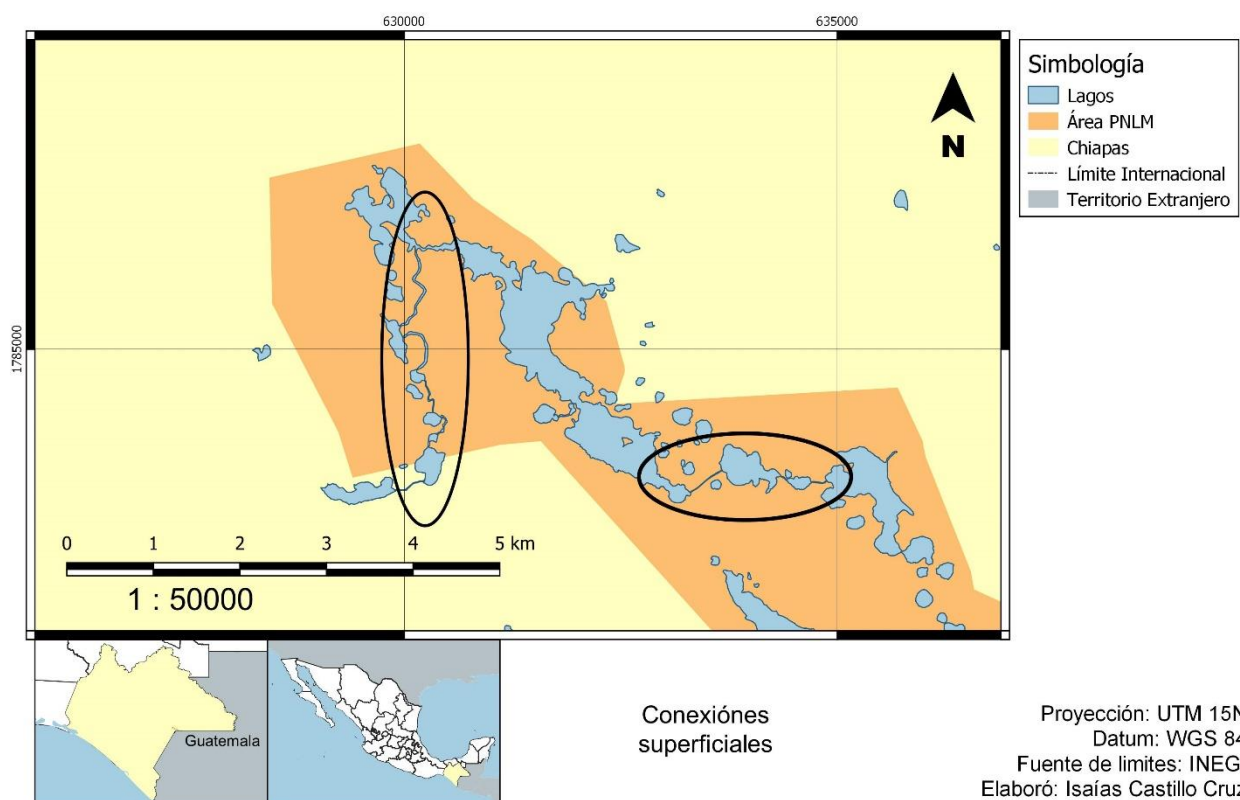


Figura 6. Mapa de conexiones superficiales en los lagos. Las conexiones superficiales se observan en los lagos de la zona noroeste del (PNLM)

El área de estudio está dominada por rocas sedimentarias cretáceas (calizas y dolomitas) también se encuentran depósitos en plataformas poco profundas. En profundidad es posible encontrar turbidez paleocena y profunda sedimentos de la cuenca, hay unidades de Eoceno y Mioceno compuestas por depósitos clásticos continentales (Mora, 2017). Se pueden definir dos grupos principales, uno en la parte baja del área de estudio (NO) con lagos de morfologías irregulares-alargadas y otro en el Este a mayor elevación sobre el nivel del mar donde las morfologías de los lagos son de irregulares a circulares (Figura 7).

Como se aprecia en la figura 7 la distribución de los lagos está orientada al NO-SE, las direcciones de los ejes principales de los lagos son consistentes con las alineaciones estructurales del relieve (fallas, fracturas y pliegues), lo que indica una estrecha relación con las principales alineaciones tectónicas y la red de fracturas (Duran, 2013). Los lagos de Montebello forman uno de los 86 sitios RAMSAR identificados en México, ecosistemas que constituyen una red de humedales estratégicos para la conservación de la biodiversidad. Así mismo la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) considera que el área posee una gran importancia para la conservación

de la dinámica de los recursos hídricos de la zona y la regulación del clima (CONAGUA, 2009).

Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM

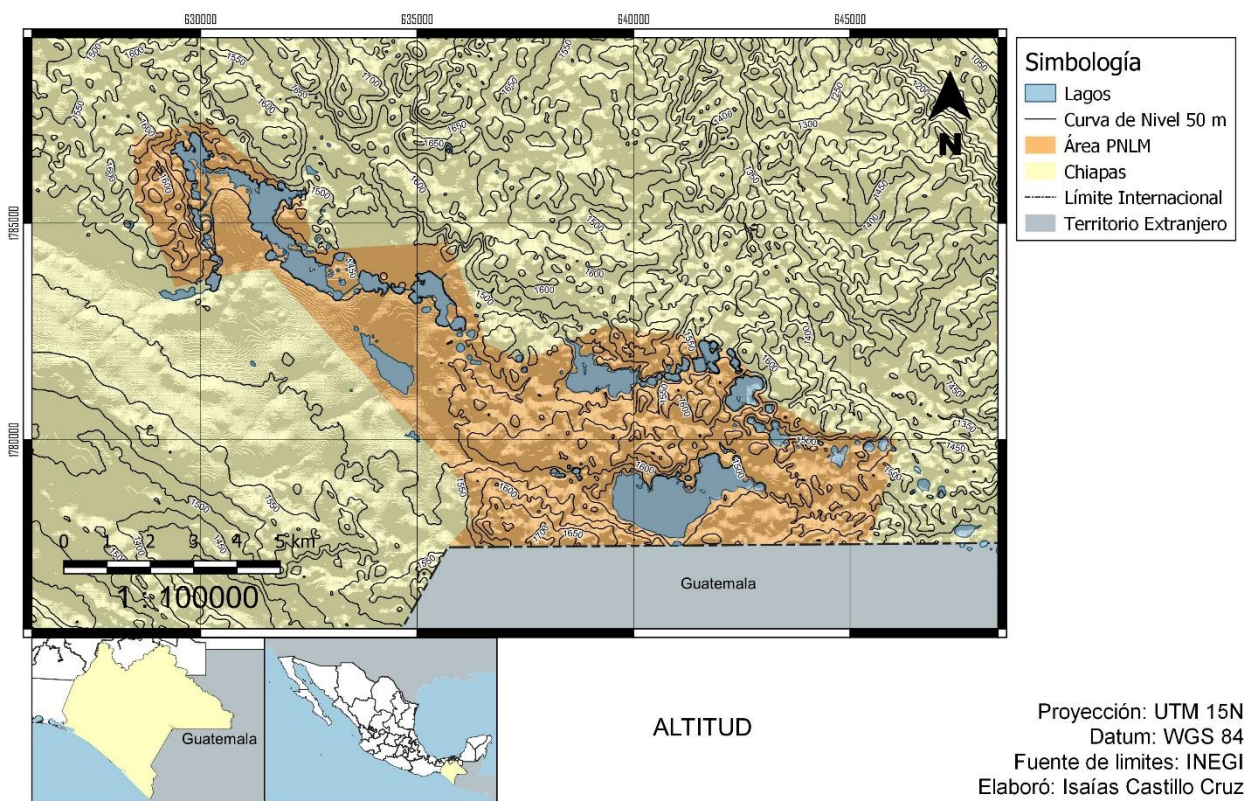


Figura 7. Mapa con las cotas de altitud en la zona del PNLM.

8.2 Clima

En el Parque se presenta clima tipo C(fm) templado húmedo con lluvias todo el año y en el extremo Noroeste A(cm) cálido húmedo con abundantes lluvias en verano (García, 1988). La temperatura media mensual es de 23.6 °C con una oscilación térmica anual de 5.6 °C; el mes más frío es enero con un promedio de 20.9 °C y el más cálido abril, con un promedio mensual de 25.6 °C. La precipitación media del mes más seco es menor a 40 mm. Durante la temporada de lluvia, la precipitación es de 1200 a 1400 mm, con 90 a 119 días de lluvia. El mes más húmedo es septiembre. La frecuencia de la dirección del viento es principalmente del sur; no se presentan heladas. La precipitación total anual es de 1,862 mm, distribuida en dos periodos bien definidos, uno de alta humedad y otro de relativa sequía. Durante el periodo húmedo (de mayo a diciembre) llueve un promedio de 1,716 mm, 92 por ciento de la precipitación total anual, mientras que el restante 8 por ciento (146 mm), se distribuye en las escasas lluvias del periodo seco (INEGI, 1984) aunque existen

otras visiones que marcan el periodo de lluvias entre los meses de mayo a octubre, sin embargo, con ambos casos coinciden que durante este periodo se concentran más del 90 por ciento de la precipitación anual total (González, 2019).

8.3 Vegetación

La vegetación predominante es de bosque de clima templado frío. Las principales asociaciones vegetales son: bosque de coníferas, bosque mixto de coníferas y latifoliadas, bosque mesófilo de montaña, vegetación ripiara, vegetación secundaria y zonas de cultivo. El bosque mesófilo de montaña cubre tan solo el 2% del terreno del parque, donde los árboles más grandes pueden alcanzar alturas de 20 a 30 metros. Se localiza en zonas con topografía abrupta y exposición protegida de las laderas. El bosque de pino-encino-liquidámbar es el más extendido dentro del parque, el 75 de las 208 especies contenidas en el parque se encuentran en este tipo de vegetación. Se considera como una etapa de sucesión hacia el bosque mesófilo de montaña. El bosque de pino es la comunidad florística más empobrecida y está asociada a sitios con menor pendiente y elevación dentro del parque y es donde los incendios superficiales han sido frecuentes. La vegetación riparia se encuentra en los lechos poco profundos de las orillas de algunos lagos. Los principales cultivos son maíz y frijol, con bajo rendimiento por hectárea (González, 2003).

9 Metodología

Para este estudio se hizo una búsqueda y se realizó la descarga de una serie de imágenes satelitales LANDSAT en el área del PNLM abarcando los años de 1990 a 2017, se utilizaron imágenes de los satélites LANDSAT 4 y 5 TM (L4)(L5), 7 ETM+ (L7) y 8 OLI (L8), que después de ser seleccionadas terminaron siendo: 1 para L4; 31 para L5; 40 para L7 y 8 para L8, para un total de 80 escenas, esto debido a que la cobertura de nubes sobre la zona de estudio no permitió el uso de una mayor cantidad de imágenes, debido a esto se obtuvieron 53 escenas en la temporada de secas y 27 para la de lluvias, abarcando desde el 3 de febrero de 1990 hasta el 14 de diciembre de 2017 (Tabla 1), se pre-procesaron para un mismo y uniforme tratamiento que consistió en la descarga de imágenes, formación de *stacks* para su visualización, recorte de las tomas, llenado de píxeles perdidos, corrección atmosférica, después del Pre-procesamiento se aplicó el modelo de cuantificación de Chl-a para todas las imágenes obtenidas con las que se obtuvieron concentraciones estimadas en microgramos sobre litro ($\mu\text{g/L}$) para cada uno de los 14 lagos seleccionados del sistema

lacustre durante el lapso de tiempo de la serie de imágenes, posteriormente se validaron con concentraciones tomadas en diferentes años, además, se hizo un análisis estadístico de los datos para determinar si existen diferencias significativas en las concentraciones obtenidas entre los diferentes lagos, así como entre temporadas de secas y lluvias, meses y a lo largo de los años. Complementariamente se realizó una identificación de fitoplancton presente en algunos lagos que presentan un cambio notable en la coloración de sus aguas.

Tabla 1

Imágenes LANDSAT descargadas

FECHA	AÑO	MES	TEMPORADA
19900203	1990	febrero	secas
19910302	1991	marzo	secas
19910403	1991	abril	secas
19910419	1991	abril	secas
19930203	1993	febrero	secas
19930408	1993	abril	secas
19931220	1993	diciembre	lluvias
19940424	1994	abril	secas
19941121	1994	noviembre	lluvias
19950313	1995	marzo	secas
19960127	1996	enero	secas
19960228	1996	febrero	secas
19960315	1996	marzo	secas
19960331	1996	marzo	secas
19960806	1996	agosto	lluvias
19961212	1996	diciembre	lluvias
19970214	1997	febrero	secas
19970302	1997	marzo	secas
19980201	1998	febrero	secas
19980217	1998	febrero	secas
19980406	1998	abril	secas
19980913	1998	septiembre	lluvias
19990324	1999	marzo	secas
19990409	1999	abril	secas

20000122	2000	enero	secas
20000403	2000	abril	secas
20000419	2000	abril	secas
20000716	2000	julio	lluvias
20001113	2000	noviembre	lluvias
20010313	2001	marzo	secas
20010329	2001	marzo	secas
20020119	2002	enero	secas
20030122	2003	enero	secas
20030428	2003	abril	secas
20031208	2003	diciembre	lluvias
20041108	2004	noviembre	lluvias
20041124	2004	noviembre	lluvias
20050228	2005	febrero	secas
20051127	2005	noviembre	lluvias
20051229	2005	diciembre	lluvias
20060130	2006	enero	secas
20060215	2006	febrero	secas
20070202	2007	febrero	secas
20080205	2008	febrero	secas
20081221	2008	diciembre	lluvias
20090106	2009	enero	secas
20090327	2009	marzo	secas
20090412	2009	abril	secas
20091130	2009	noviembre	lluvias
20091224	2009	diciembre	lluvias
20100314	2010	marzo	secas
20100602	2010	junio	lluvias
20101211	2010	diciembre	lluvias
20110120	2011	enero	secas
20110221	2011	febrero	secas
20110309	2011	marzo	secas
20110824	2011	agosto	lluvias
20111027	2011	octubre	lluvias

20120303	2012	marzo	secas
20120404	2012	abril	secas
20120420	2012	abril	secas
20130218	2013	febrero	secas
20130322	2013	marzo	secas
20130407	2013	abril	secas
20130501	2013	mayo	lluvias
20130509	2013	mayo	lluvias
20130517	2013	mayo	lluvias
20131203	2013	diciembre	lluvias
20140128	2014	enero	secas
20140309	2014	marzo	secas
20141222	2014	diciembre	lluvias
20150208	2015	febrero	secas
20150216	2015	febrero	secas
20150507	2015	mayo	lluvias
20160203	2016	febrero	secas
20160501	2016	mayo	lluvias
20170402	2017	abril	secas
20170410	2017	abril	secas
20170426	2017	abril	secas
20171214	2017	diciembre	lluvias

9.1 Pre-procesamiento de imágenes

9.1.1 Descarga de imágenes satelitales

Las descargas de imágenes satelitales se realizaron del portal de internet <https://earthexplorer.usgs.gov/> para esto, se requirió generar un registro en el USGS, que permitió bajar las imágenes requeridas, para conocer la imagen que incluye la zona de interés se necesitó ingresar el *path* y *row*, un sistema propio de USGS que determina la ubicación de las escenas que toma el satélite, con el cual se obtuvo la imagen requerida, además de seleccionar el satélite del que se necesitaba la vista y el lapso de tiempo que abarcó el estudio, en este caso se ocuparon desde el satélite L4 hasta el L8 , también se consideró la cantidad de nubosidad, dado que, si esta cubría la zona, no se podría tener una apreciación completa, de esta forma se seleccionaron manualmente las escenas que

no contaron con nubes cercanas a la zona de estudio. Los archivos descargados contienen las imágenes separada cada banda individual y un archivo de meta datos, en este archivo se encuentran las especificaciones de la toma de la imagen, así como datos que pueden ayudarnos para hacer un procesamiento adecuado de las imágenes.

9.1.2 Formación de stacks para visualización de imágenes

Las imágenes descargadas se procesaron en el programa QGIS 3.4.5, con estas, se formó un “*layer stack*” de las bandas para visualizar una imagen completa, las imágenes son proporcionadas en un formato geo TIFF (.TIF) las cuales están georreferenciadas, lo que permite ubicar puntos específicos con el sistema de coordenadas deseado, UTM para este caso. Los archivos de imagen contienen para los satélites L4 y L5 un número de siete bandas mientras que L7 nueve y L8 doce. Para L4, L5 y L7 se tomaron las bandas de espectro de luz visible (1, 2 y 3) excluyendo las de infrarrojo, infrarrojo térmico y pancromática, mientras que para L8 fueron las bandas 2, 3 y 4, se descartaron de igual forma las de infrarrojo, infrarrojo térmico y pancromático además de las bandas cirrus y coastal. El nuevo archivo incluyó las bandas seleccionadas y se nombró “stack”.

9.1.3 Recorte de imágenes

Efectuadas la formación del stack se procedió a ajustar el tamaño, las imágenes descargadas abarcan un área aproximada de 185x185 km y se redujeron a la zona del PNLN tomando como referencia el polígono georreferenciado y digitalizado disponible en el portal del INEGI para un mejor aprovechamiento tanto de espacio de almacenamiento como tiempo en el procesamiento.

9.1.4 Llenado de pixeles vacíos de imágenes landsat 7 slc-off

Al tener el stack listo se observó que algunas imágenes de L7 contenían unas líneas negras hacia los costados lo que impedía tener una imagen completa, este “error” se debe al funcionamiento en órbita del satélite LANDSAT 7 SLC-off a éste bandeamiento se denomina gaps y provocan aproximadamente, la pérdida de un 22% de la información de cada imagen; están dispuestos en franjas inclinadas hacia la izquierda unos 8° respecto a la orientación horizontal debido a la rotación de la imagen y aparecen en intervalos de 33 píxeles. Estas franjas tienen hasta 15 píxeles en el borde de la imagen, y van disminuyendo gradualmente camino al centro hasta desaparecer (Ramos 2009). Para

solucionar este error la plataforma de LANDSAT lanzó el “SLC gap filled products methodology” (Scaramuzza et al, 2004). Este proceso tuvo que ser repetido tres veces dado que el proceso para la eliminación del bandeamiento y para éste caso se observó que se necesitaba de este número de procesamiento.

9.1.5 Corrección atmosférica

Una vez realizado el stack y resuelto el problema de los gaps se procedió a realizar una corrección radiométrica a las imágenes, esto con la finalidad de reducir las alteraciones atmosféricas que pudieran resultar de la toma de imágenes satelitales en diferentes lapsos de tiempo, además de estandarizar para hacer comparables los datos, al convertir los valores digitales de la imagen (ND) en porcentaje de reflectancia, que es una variable física cuantificable. Para este proceso se utilizó el complemento Semi-Automatic Classification Plugin mediante el proceso de corrección atmosférico DOS1 (Congedo, 2021), en el cual se seleccionaba el stack y el archivo de metadatos para hacer la conversión de unidades. Sin embargo, a partir de 2019 el USGS puso a disposición bajo demanda el producto de imágenes en Surface reflectance, esto simplifico el proceso ya que estas imágenes ya venían con valores de reflectancia lo que representó un ahorro de tiempo.

9.2 Aplicación del modelo de cuantificación de clorofila

Después de hacer el Pre-procesamiento de las imágenes se realizó un cociente de las bandas Verde/Azul que de acuerdo a trabajos anteriores de Villalpando Alaníz (2015) es el cociente que muestra una mejor respuesta a los cambios visibles en los lagos de Montebello. A esta nueva capa-cociente se le aplicó el MCC para obtener los valores estimados de concentración de Chl-a, este modelo fue obtenido mediante una regresión lineal entré los valores de reflectancia medidos en los lagos y las concentraciones de Chl-a registradas en el mismo punto que las mediciones de reflectancia y cuya fórmula es:

$$\text{Cociente V/A} = 0.0029 (\mu\text{g/L de Chl-a}) + 0.3826$$

Es importante señalar que para la obtención de esta fórmula el muestreo sólo se realizó en lagos cuya coloración era evidentemente distinta a la anteriormente observada lo cual puede ocasionar que se sobreestimen los valores en lagos que no han tenido un cambio de coloración en sus aguas.

Posteriormente, se eligieron los 14 cuerpos de agua con mayor área de acuerdo a la digitalización de los contornos de los lagos del conjunto Montebello, se generó un muestreo aleatorio estratificado (Figura 8) en base a la extensión de los lagos realizando un buffer de treinta metros con respecto a la orilla, para evitar que se registrarán valores en tierra y así obtener en cada punto su valor estimado de Chl-a, para obtener una secuencia de datos a lo largo de la serie de imágenes para cada uno de los puntos generados. (Tabla 2).

Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM

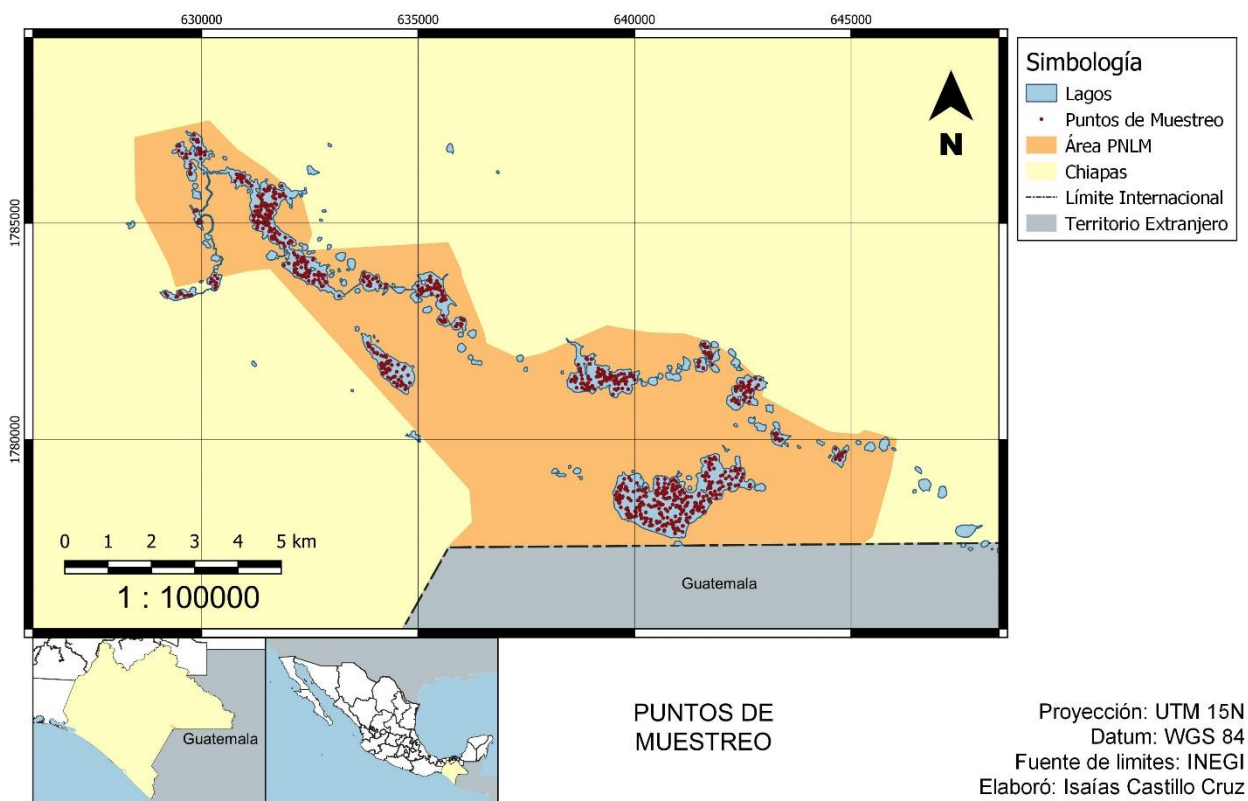


Figura 8. Mapa de puntos aleatorios de muestreo. Los puntos de muestreo generados están estratificados de acuerdo al área de los lagos.

Tabla 2*Puntos aleatorios generados para cada lago*

LAGO	NUMERO DE PUNTOS ALEATORIOS
Tzisco (Tz)	306
San Lorenzo (SL)	223
Montebello (Mb)	96
San José (SJ)	61
Bosque Azul (BA)	52
Pojoj (Po)	43
Cinco Lagos (CL)	24
Chimpotrero (Chp)	20
Balantetic (Bt)	13
Kichail (Ki)	12
Yalalush (Ya)	11
Chaj Chaj (CC)	9
La Encantada (LE)	8
Chenmayo (Chm)	7

9.3 Análisis estadístico de los resultados

Con los valores obtenidos se graficaron las concentraciones estimadas a lo largo de los años y en cada lago, se compararon los resultados entre cada uno de estos, las temporadas de secas contra la de lluvias, los meses y entre las condiciones de conectividad o aislamiento de los lagos. Posteriormente se realizaron pruebas de Kruskal-Wallis (KW) (Siegel y Castellan, 1988) y test de Wilcoxon (TW) (Hollander y Wolfe, 1973) para conocer si existieron diferencias significativas de las estimaciones a través de los años, temporadas, meses, conectividad y entre los propios lagos, así mismo, se validaron las concentraciones obtenidas las cuales fueron contrastadas con cuantificaciones *in situ* echas en trabajos previos de la zona (Hernández, 2016; Maya, 2017; Vera, 2017; Alcocer, 2018) para cada grupo de datos se sacó la r^2 y el RMSE.

10 Resultados

A partir de la aplicación del MCC sobre las imágenes satélites del área del PNLM procesadas uniformemente se puede reportar que la mayor concentración de Chl-a estimada en los puntos seleccionados fue de 2051.98 $\mu\text{g/L}$ en el lago La Encantada en 2014, mientras que, el menor fue de 3.77 $\mu\text{g/L}$ en Cinco Lagos en 1996, para un promedio global de 273.88 a lo largo de 1990-2017. (Tabla 3).

Tabla 3

Concentraciones estimadas de Chl-a en $\mu\text{g/L}$ por lago

LAGO	PROMEDIO	MAXIMO	MINIMO
SAN LORENZO	402,18	1191,37	59,52
BALANTETIC	397,91	1565,68	204,14
CHENMAYO	394,16	1675,44	189,34
BOSQUE AZUL	388,63	1268,93	61,31
LA ENCANTADA	385,09	2051,98	87,85
CHIMPOTRERO	378,7	808,72	102
CHAJ CHAJ	369,93	1053,18	154,59
SAN JOSE	281,75	562,95	107,45
KICHAIL	263,84	573,4	77,25
YALALUSH	208,86	567,62	79,58
MONTBELLO	203,9	852,89	22,69
TZISCAO	188,54	548,15	18,17
CINCO LAGOS	166,45	556,22	3,77
POJOJ	154,77	783,65	11,92

Basándose como primer parámetro en el promedio total se puede observar que ocho lagos se encuentran por encima de este, mientras que los restantes seis por debajo (Figura 10), estos ocho lagos por encima del promedio total se encuentran en la parte noroeste (NO) del sistema lagunar, los cuales son: San Lorenzo, Balantetic, Chenmayo, Bosque Azul, La Encantada, Chimpotrero, Chaj Chaj y San José, a excepción de San José los demás siete tienen una conexión superficial entre sí. El conjunto de los otros seis lagos se localiza al sureste (SE) del sistema y no presentan conexiones superficiales entre ellos, estos son: Kichail, Yalalush, Montebello, Tzisco, Cinco Lagos y Pojoj.

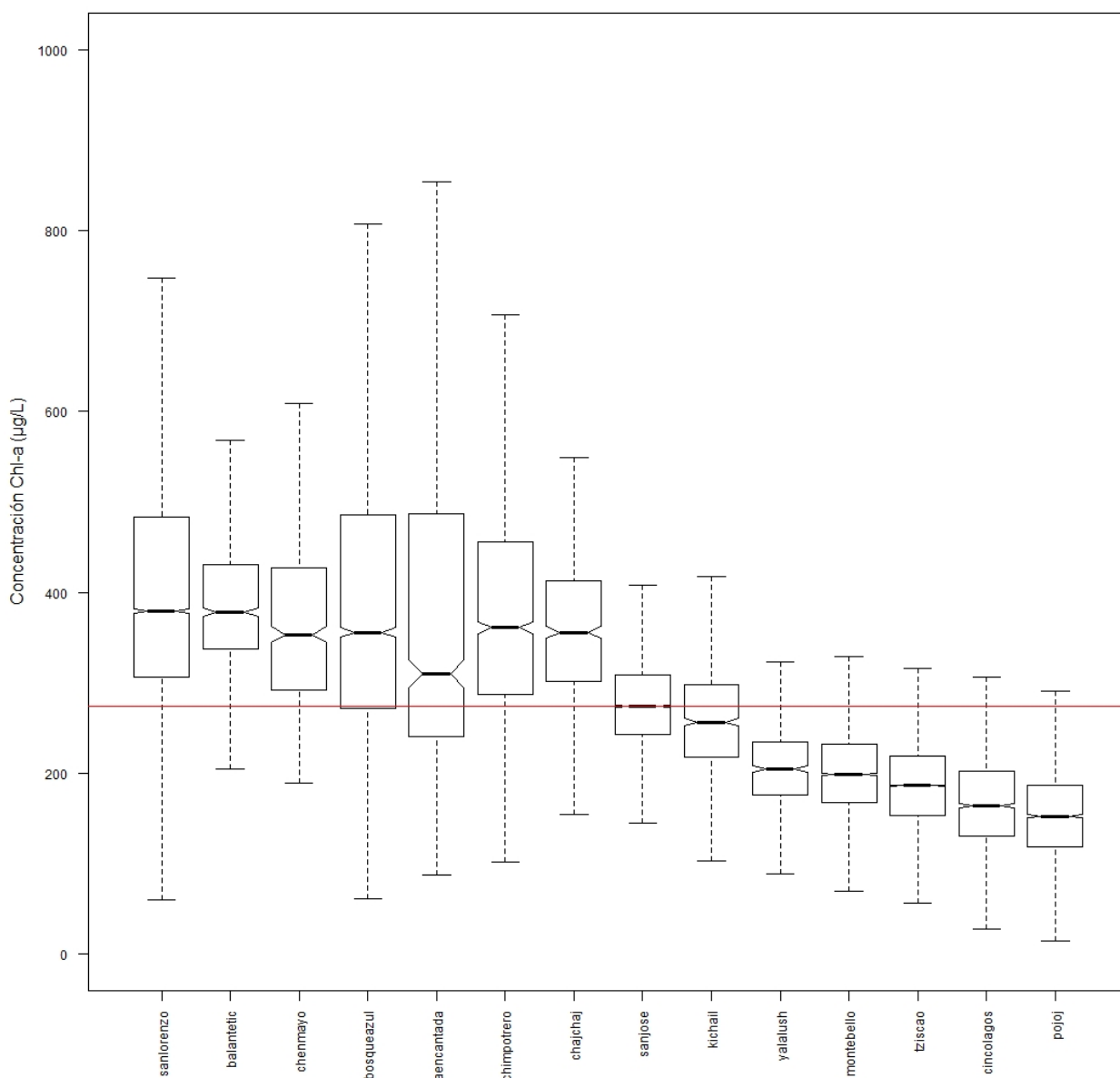


Figura 10. Boxplot de las concentraciones de Chl-a en $\mu\text{g/L}$ para cada uno de los lagos. La línea roja que atraviesa el boxplot indica el promedio general de Chl-a

Como resultado de la prueba KW se puede afirmar que existen diferencias entre los distintos lagos y al hacer un test de múltiples comparaciones después de KW (MC-KW) se obtiene la tabla 4 donde se observa la formación de pequeños grupos, de manera particular se muestra la agrupación de los lagos en los mismos conjuntos que se observan con la separación de conexión física entre estos.

Tabla 4*Relación de diferencias significativas entre los lagos*

LAGOS	SL	BA	CM	BA	LE	CP	CH	SJ	KI	YA	MB	TZ	CL	PO
SAN LORENZO														
BALANTETIC	■													
CHENMAYO	■	■												
BOSQUE AZUL			■											
LA ENCANTADA				■										
CHIMPOTRERO			■	■										
CHAJ CHAJ	■	■	■	■		■								
SAN JOSE														
KICHAIL														
YALALUSH														
MONTEBELLO														
TZISCAO														
CINCO LAGOS														
POJOJ														

Nota. El color rojo significa que entre esos lagos no existe diferencia estadísticamente significativa $\alpha=0.05$

Al tomar como conjunto de datos el hecho de si los lagos se encuentran aislados o conectados superficialmente se aprecia como los que si se encuentran conectados tienen valores máximos, mínimos y promedio superiores a los que se encuentran aislados entre sí resaltando que el máximo obtenido de clorofila se encuentra dentro de los lagos denominados conectados y el mínimo obtenido se localiza dentro de los aislados. (Tabla 5) (Figura 11).

Tabla 5*Concentraciones estimadas de Chl-a en $\mu\text{g/L}$ por estado de conexión superficial*

ESTADO	PROMEDIO	MAXIMO	MINIMO
AISLADO	199,94	852,89	3,77
CONECTADO	397,02	2051,98	59,52

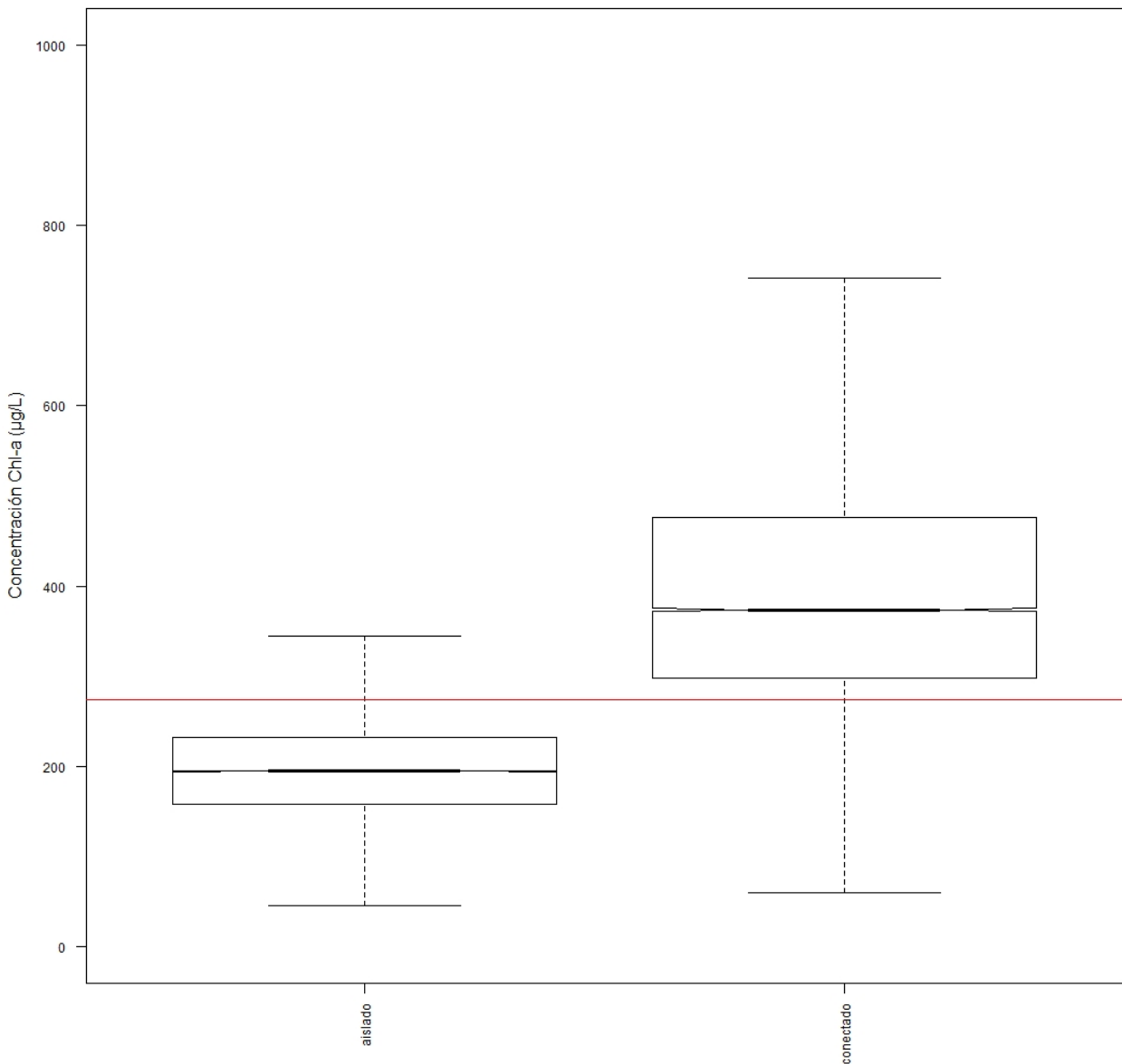


Figura 11. *Boxplot de las concentraciones de Chl-a en µg/L para cada estado de conexión superficial. La línea roja que atraviesa el boxplot indica el promedio general de Chl-a*

El TW ratifica que existen diferencias significativas entre el conjunto de lagos aislados y conectados.

Wilcoxon rank sum test with continuity correction

data: concentración by conectividad

W = 73419457, p-value < 2.2e-16

alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0

Como se aprecia en la tabla 6 existe una fluctuación entre los máximos y mínimos de concentración en el que no se percibe un comportamiento homogéneo, esto puede deberse a que el número de imágenes para cada año no se encuentran en la misma cantidad a lo largo del periodo de tiempo que abarca el trabajo, de igual manera los promedios parecieran no tener mayor cambio hasta el final del estudio que es cuando se nota un mayor incremento en las concentraciones de clorofila a partir de 2012 hasta 2017. (Figura 12).

Tabla 6*Concentraciones estimadas de Chl-a en µg/L por año*

AÑO	IMÁGENES	PROMEDIO	MAXIMO	MINIMO
1990	1	234,09	1191,36	18,17
1991	3	267,49	695,15	70,03
1993	4	246,64	518,31	63,31
1994	1	241,71	640,85	46,37
1995	1	231,17	431,22	109,62
1996	6	233,67	723,75	3,77
1997	2	230,65	526,56	56,51
1998	4	260,55	833,59	11,92
1999	2	245,3	571,44	32,76
2000	5	238,86	666,18	26,19
2001	2	255,5	477,3	87,67
2002	1	231,55	628,03	28,65
2003	3	232,53	547,14	14,97
2004	2	280,28	562,83	69,61
2005	3	276,57	611,78	31,74
2006	2	275,37	631,26	21,51
2007	1	326,91	808,68	38,5
2008	2	252,15	690,35	20,15
2009	5	293,18	753,65	13,05
2010	3	252,27	720,56	18,63
2011	5	264,4	656,25	16,48
2012	3	296,52	662,19	68,41
2013	7	312,66	890,88	19,46
2014	3	333,27	2051,98	25,49
2015	3	338,11	1565,68	38,12
2016	2	362,09	890,81	108,9
2017	4	313,77	904,6	18,72

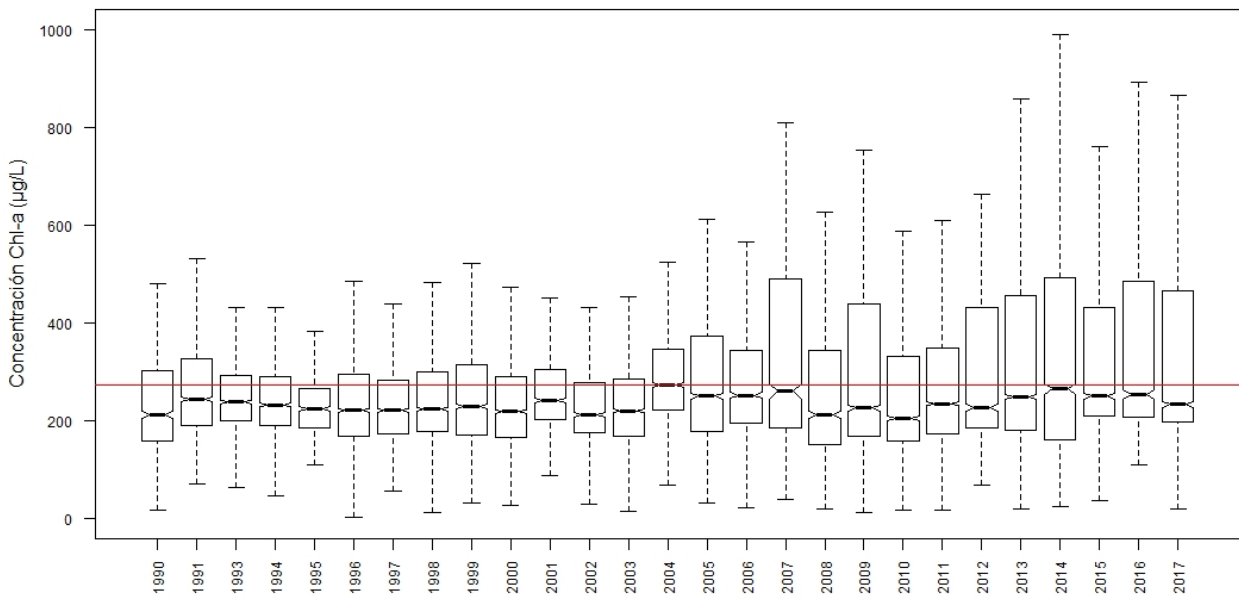


Figura 12. *Boxplot de las concentraciones de Chl-a en $\mu\text{g/L}$ para cada uno de los años. La línea roja que atraviesa el boxplot indica el promedio general de Chl-a*

El MC-KW tampoco arroja mayor detalle respecto a la tabla 6 exceptuando el hecho de que hacia el final del estudio los valores son distintos a los que se presentaban al inicio de este dónde los valores promedio eran alrededor de los 200 $\mu\text{g/L}$ y terminan por valores superiores a los 300 $\mu\text{g/L}$. (Tabla 7).

Tabla 7

Relación de diferencias significativas entre los años

AÑO	90	91	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	
1990																												
1991																												
1993																												
1994																												
1995																												
1996																												
1997																												
1998																												
1999																												
2000																												
2001																												
2002																												
2003																												
2004																												
2005																												
2006																												
2007																												
2008																												
2009																												
2010																												
2011																												
2012																												
2013																												
2014																												
2015																												
2016																												
2017																												

Nota. El color rojo significa que entre esos lagos no existe diferencia estadísticamente significativa $\alpha=0.05$

Comparando entre los lagos conectados y aislados a través de los años se nota la diferencia entre estas condiciones, observándose como en los aislados las concentraciones se mantienen y solo hasta el fin del periodo de estudio tienen un incremento, mientras que, en los conectados este aumento en las concentraciones es mucho más notorio desde mediados del tiempo hasta la finalización en 2017 (Figura 13).

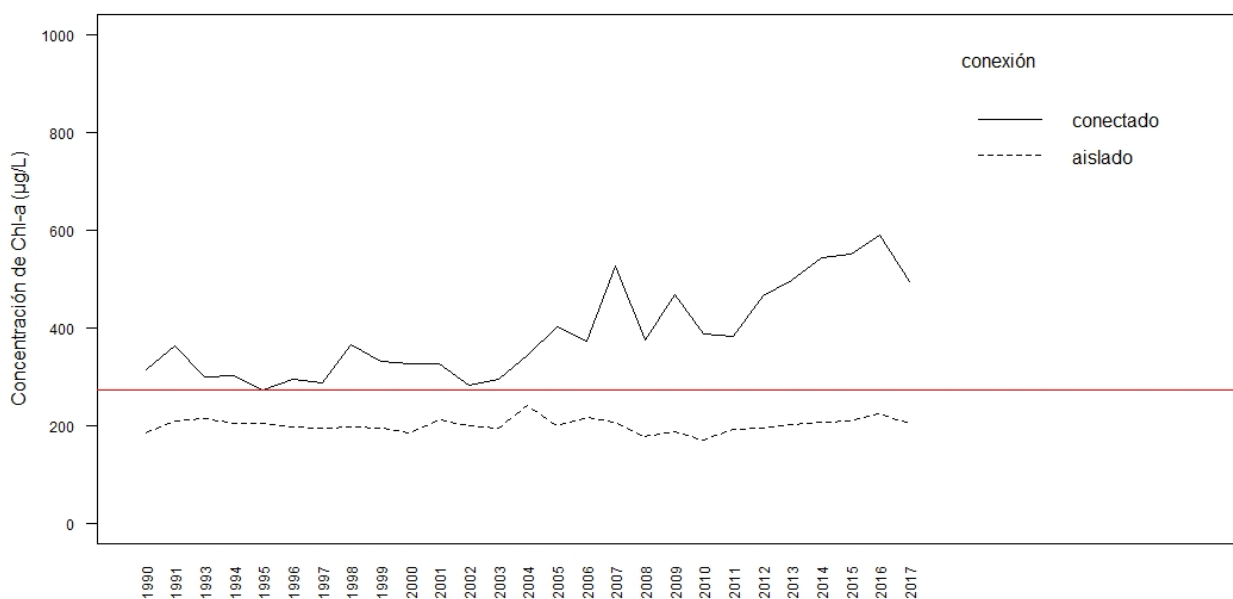
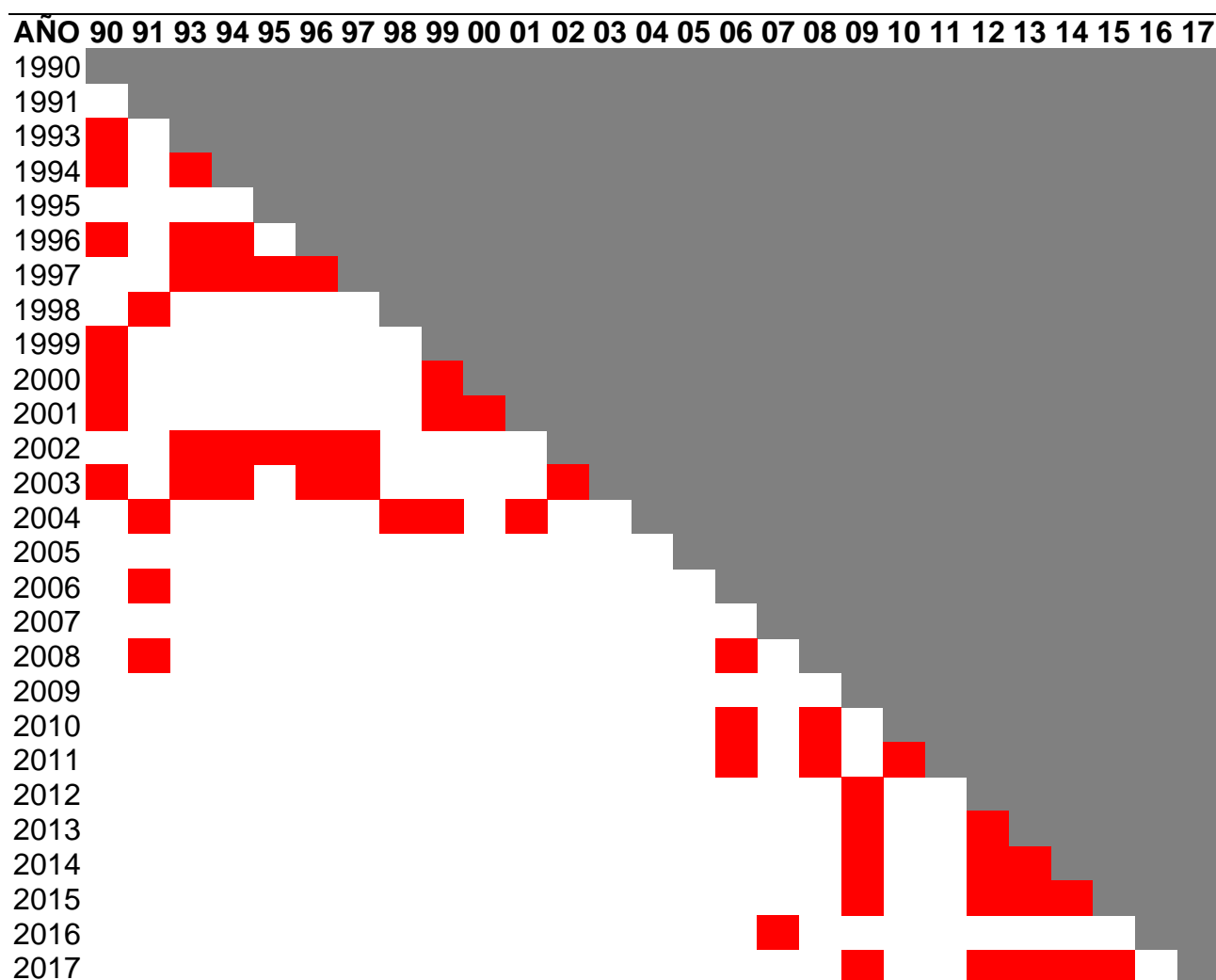


Figura 13. Comparación entre los estados de conexión a lo largo de los años. Las líneas negras representan el promedio de los lagos que presentan cada estado de conexión a lo largo de los años y la línea roja indica el promedio general de Chl-a

El análisis de MC-KW para los lagos conectados a través de los años da como resultado que existe similitud entre los primeros años y aparte entre los últimos, separando completamente las concentraciones entre el inicio de las imágenes contra el final (tabla 8).

Tabla 8*Relación de diferencias significativas entre los años en los lagos con conexión superficial*

Nota. El color rojo significa que entre esos lagos no existe diferencia estadísticamente significativa $\alpha=0.05$

Realizando la separación de cada lago a lo largo de los años es observable como van aumentando las concentraciones en los lagos que cuentan con conexiones superficiales, así el caso de Balantetic, Bosque Azul, Chimpotrero y La Encantada que a lo largo de los años mantienen un aumento más constante; Chaj Chaj, Chenmayo, y San Lorenzo tienen incrementos y descensos con un gran aumento hacia los años finales, mientras que los aislados mantienen números constantes a lo largo del tiempo con pequeñas variaciones en los promedios. (Figura 14).

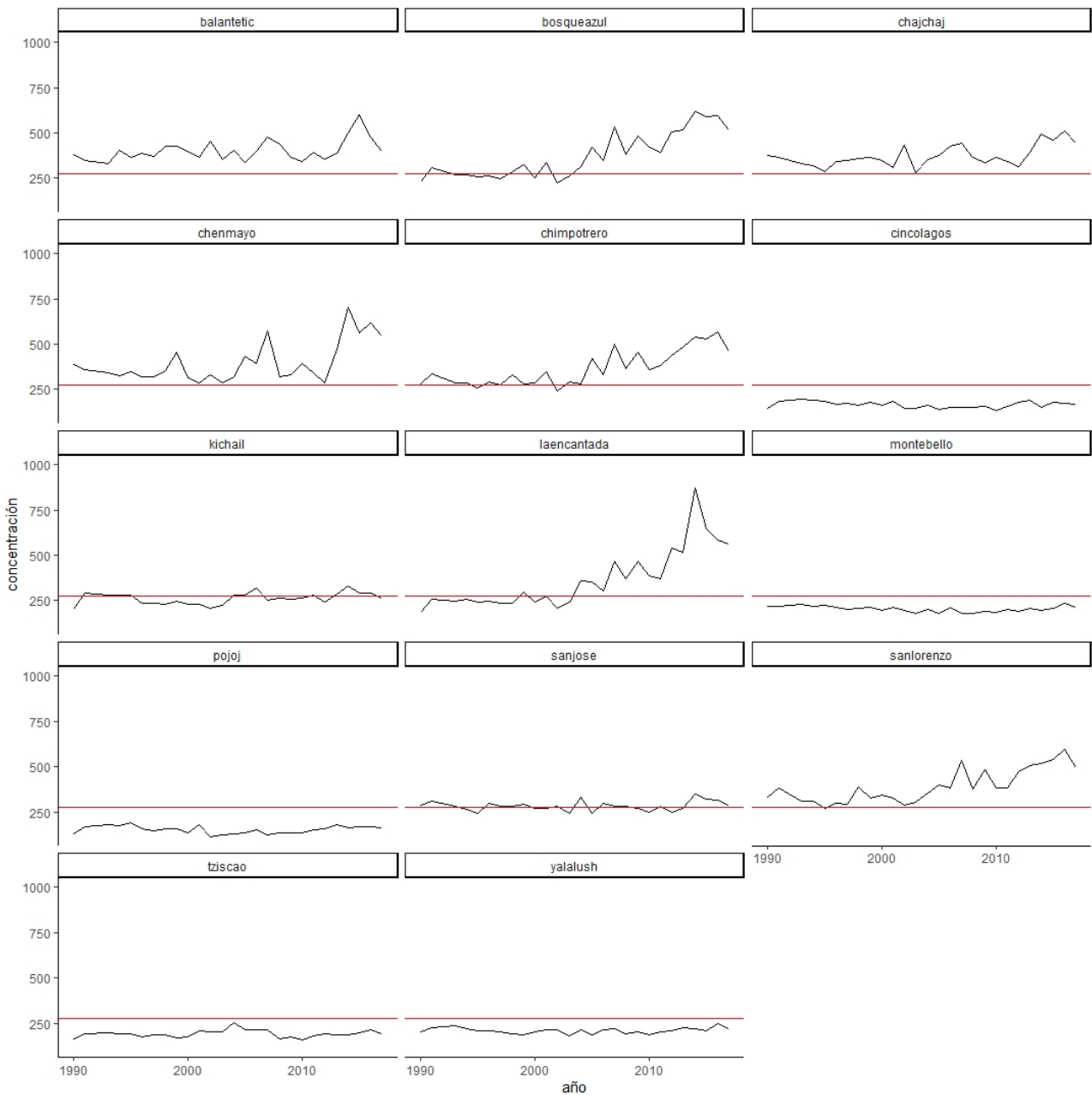


Figura 14. Comparación entre los lagos a lo largo de los años. Las líneas negras representan el promedio de cada uno de los lagos y la línea roja indica el promedio general de Chl-a

Para los meses (Tabla 9), sucede que a final de año se encuentran los valores mínimos de concentración y a medida que transcurren los meses estas concentraciones aumentan encontrando su pico máximo entre los meses de abril-mayo, esto debido a que el término del periodo de lluvias finaliza a finales de año lo que provoca que la suma de nutrientes arrastrados hacia el fin de la cuenca se concentre y empiece el aumento de concentraciones.

Tabla 9*Concentraciones estimadas de Chl-a en µg/L por mes*

MES	IMÁGENES	PROMEDIO	MAXIMO	MINIMO
ENERO	8	274,78	2051,98	25,76
FEBRERO	15	290,38	1565,68	11,92
MARZO	14	270,71	720,55	32,76
ABRIL	16	272,99	904,6	55,92
MAYO	5	340,86	951,48	117,19
JUNIO	1	251,1	452,23	122,88
JULIO	1	278,13	666,17	26,18
AGOSTO	2	238,83	448,83	59,52
SEPTIEMBRE	1	234,04	419,35	115,86
OCTUBRE	1	234,54	607,82	16,47
NOVIEMBRE	6	274,96	753,64	31,74
DICIEMBRE	10	236,86	720,55	3,77

Cabe destacar que se podrían excluir los meses de mayo a octubre por el bajo número de imágenes obtenidas debido a que era cuando las nubes aparecían en las escenas y no se podía trabajar con ellas (Figura 15).

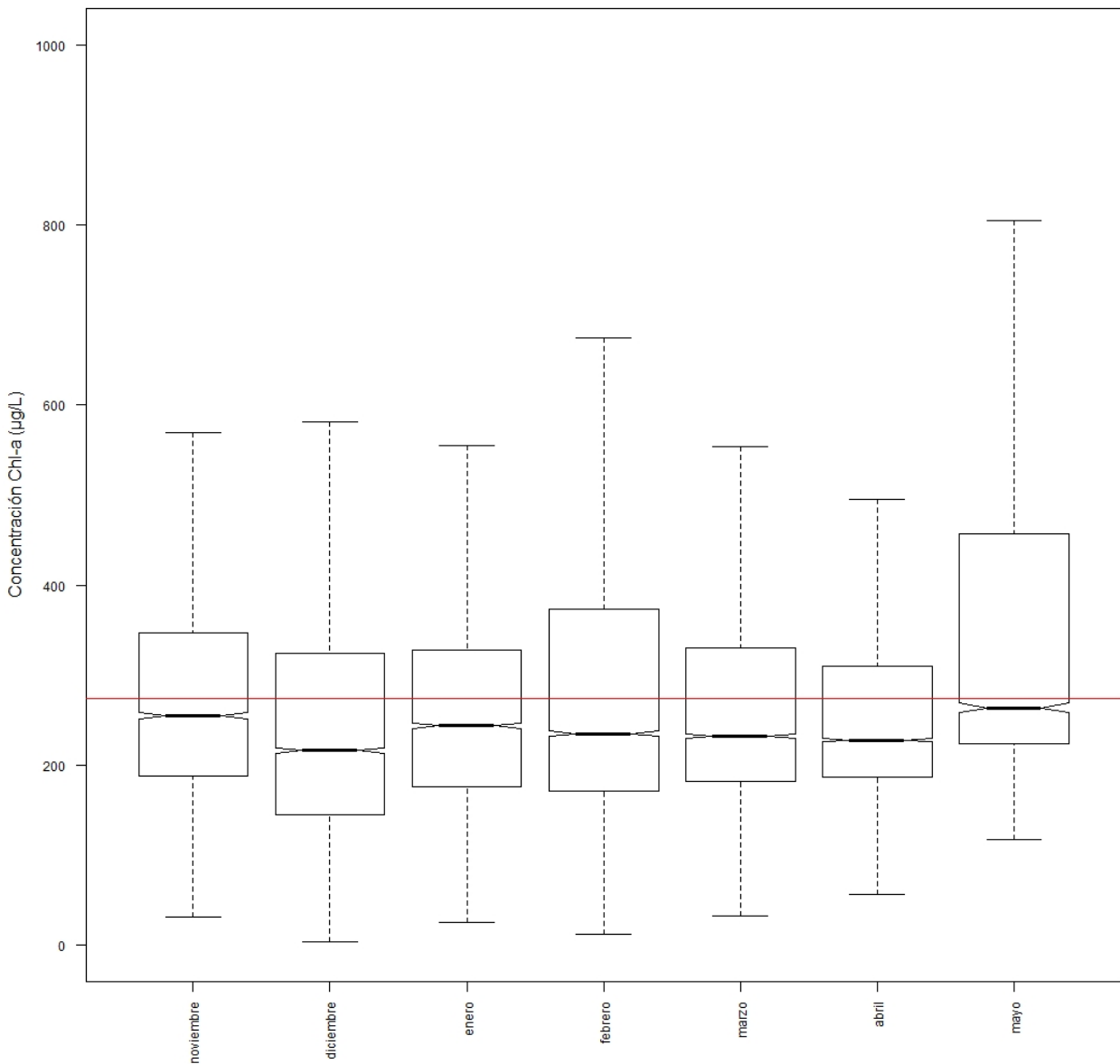


Figura 15. *Boxplot de las concentraciones de Chl-a en $\mu\text{g/L}$ por mes. La línea roja que atraviesa el boxplot indica el promedio general de Chl-a*

De la misma manera al separar los meses por estado de conexión, los aislados mantienen valores estables debajo del promedio y sin grandes fluctuaciones mientras que los conectados fluctúan mucho más a través de los meses con aumento por encima del doble en el promedio hacia el final de la temporada de estiaje ocasionado por la concentración de las aguas debido a la mínima disolución de nuevas aguas por lluvias (Figura 16).

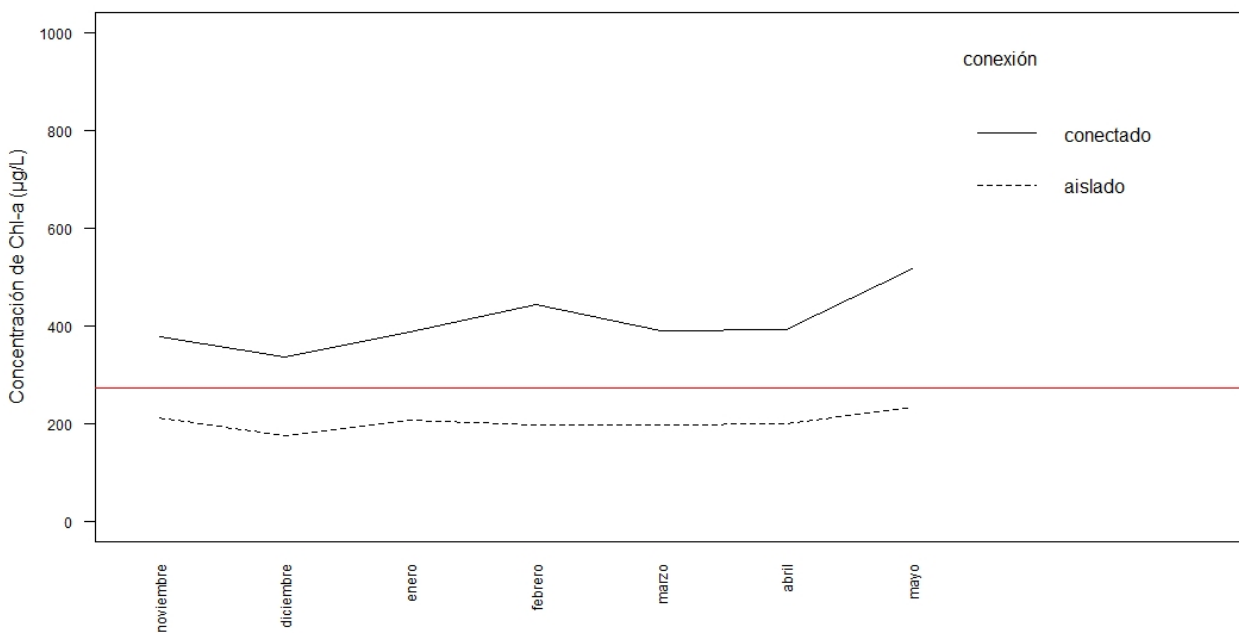


Figura 16. Comparación entre los estados de conexión a lo largo de los meses. Las líneas negras representan el promedio de los lagos que presentan cada estado de conexión a lo largo de los meses y la línea roja indica el promedio general de Chl-a

El MC-KW marca que los meses de noviembre y diciembre son completamente diferentes al grupo de enero a abril. (Tabla 10)

Tabla 10

Relación de diferencias significativas entre los meses

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	NOV	DIC
ENERO	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
FEBRERO	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
MARZO	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
ABRIL	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
MAYO	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
NOVIEMBRE	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
DICIEMBRE	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red

Nota. El color rojo significa que entre esos lagos no existe diferencia estadísticamente significativa $\alpha=0.05$

Ante esto se observa de igual manera cuando separamos las imágenes en temporadas de secas y lluvias, el número imágenes obtenidas son mayores en secas que en lluvias por el mismo motivo de las nubes (Tabla 11).

Tabla 11

Concentraciones estimadas de Chl-a en $\mu\text{g/L}$ por temporadas

TEMPORADA	PROMEDIO	MAXIMO	MINIMO
LLUVIAS	266,6	951,48	3,77
SECAS	277,58	2051,98	11,92

De la misma forma, el promedio total de secas es superior al promedio general y al total de lluvias (Figura 17).

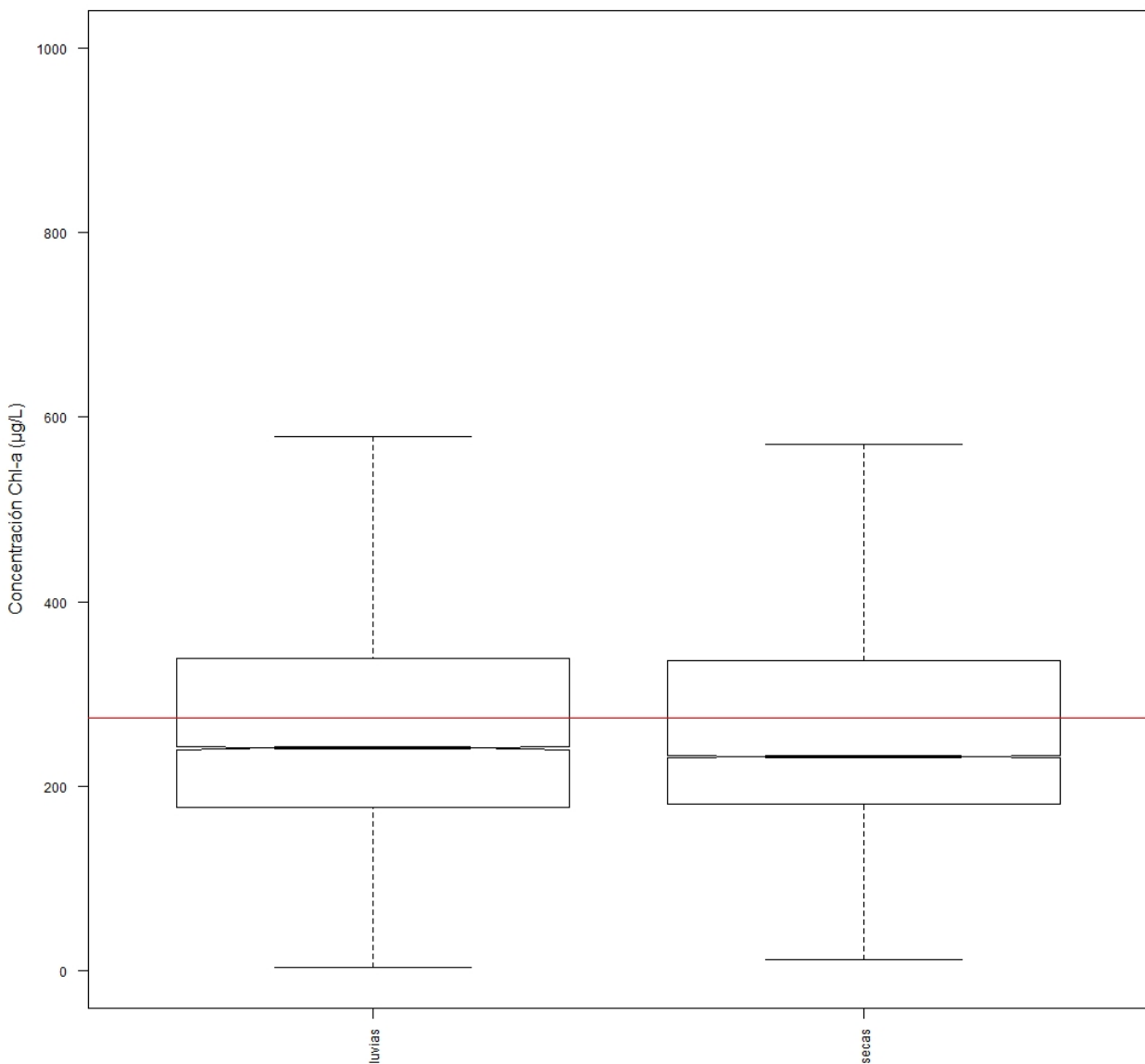


Figura 17. *Boxplot de las concentraciones de Chl-a en $\mu\text{g/L}$ por temporada. La línea roja que atraviesa el boxplot indica el promedio general de Chl-a*

y las temporadas son significativamente diferentes de acuerdo al TW.

Wilcoxon rank sum test with continuity correction

data: concentración by temporada

W = 552807814, p-value = 0.003163

alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0

Las estimaciones obtenidas fueron contrastadas con datos de concentraciones *in situ* de Hernández, Maya, Vera, Villalpando y Alcocer, para cada grupo de datos se sacó la R^2 y el RMSE, en donde la mejor r^2 fue en las concentraciones obtenidas por Alcocer y el menor RMSE fue con las de Vera Franco (Tabla 12). A resaltar que los únicos estudios en los que se tomó a consideración lagos tanto conectados como aislado fueron el de Maya García y el de Alcocer donde se obtuvieron los dos mayores r^2 , mientras que Hernández Victoria y Villalpando Alaníz solo obtuvieron muestras de los lagos conectados y Vera Franco solo de los aislados. Otro punto a considerar es que solo para los datos de Villalpando y los de Vera se contaban con las coordenadas exactas del punto de muestreo por lo que se decidió tomar un promedio de las concentraciones de Chl-a en todo el lago para los casos de Hernández, Maya y Alcocer, teniendo en cuenta que al tomar el promedio de todo el lago se pasarían por alto fluctuaciones en pequeñas zonas dentro de los lagos.

Tabla 12

Valores de validación de MCC frente a estudios anteriores

AUTOR	r^2	RMSE
Hernández	0.3015	479.509
Maya	0.5036	377.071
Vera	0.0041	210.736
Villalpando	0.4076	823.083
Alcocer	0.9703	339.695

Nota.

Como producto final, se generaron nuevas imágenes clasificadas según los máximos y mínimos estimados obtenidos, así como a la distribución de los datos resultantes (Anexo 1).

11 Discusión

Los datos de concentración de Chl-a separan a los lagos en dos grupos, particularmente, la separación se hace entre el grupo del sector NO del parque y el del SE. Estos dos grupos de lagos pertenecen a unidades geomorfológicas distintas señaladas por Duran en 2014, en el NO son los denominados “lagos de planicie” (LP), Y en el SE los llamados “lagos de alta montaña” (LAM). Los LP está conformado por los lagos Balantetic, Chaj Chaj, Chenmayo, San Lorenzo, Chimpotrero, Bosque Azul y La Encantada, estos se encuentran conectados superficialmente entre ellos y al sistema de drenaje de la cuenca del Río Grande de Comitán y en épocas de lluvias es aún más notable esta conexión al incrementarse el volumen de agua. El Río Grande de Comitán atraviesa amplias zonas de cultivo incluida también la ciudad de Comitán de Domínguez. Una de las causas a las que podría deberse el cambio en la coloración de los lagos es el hecho de que los LP sean el final de la cuenca del Río Grande, el aporte que da las zonas de cultivo a los cuerpos de agua es significativo debido al aporte de compuestos nitrogenados y fosforados. el cambio de uso de suelo cambiando de zonas boscosas a áreas de cultivo también producen un impacto lo cuerpos de agua (Alvarado, 2017) mientras que el no cambio evidente en los LAM sea el aislamiento geográfico, aunque aún sean inciertas las conexiones subterráneas con el complejo de alta montaña. Caso particular es el del lago San José, este se encuentra cercano a la zona NE y tiene conexión con los LP cuando existe temporada de lluvias, pero sus datos muestran un comportamiento intermedio tanto de zona LP como LAM

Separados los lagos por su estado superficial de conexión se observa el gran contraste que existe entre las zonas, Oseguera y Alcocer desde 2015 separan los lagos entre prístinos e impactados en base a la coloración de los lagos y su contenido de carbono coincidiendo con nuestra separación de zonas de aislados y conectados, igualmente concordando con la separación de LP y LAM exceptuando el caso particular del lago San José (adicionalmente mencionan una clasificación aún más detallada haciendo la clasificación entre prístinos profundos, prístinos someros, impactados profundos e impactados someros).

Para el caso de los años CONAGUA y CFE marcan como primer reporte de cambios en la coloración de lagos el año de 2003 en la zona más al noroeste del sistema lagunar, mientras que con los datos estimados se podrían marcar posibles eventos anteriores a este acontecimiento en los años de 1991 y 1998, eventos posteriores en 2007 y 2009, luego

teniendo un periodo de estabilización y nuevamente un repunte notable de 2012 hasta el término del estudio. En casos particulares se observan eventos estimados anteriores en San Lorenzo en 1991, 1998 y 2000, esto se puede observar debido a aumentos destacados en el promedio de la concentración de los lagos, sin embargo, no se puede decir con total seguridad la fecha exacta en la cual ocurrió el primer evento debido a que la presencia de nubosidad sobre los lagos a lo largo de extensos períodos de tiempo evita un monitoreo con mayor frecuencia.

De acuerdo a los datos de estaciones meteorológicas en la cuenca de Comitán los meses más lluviosos para la zona son de junio a octubre registrando un promedio de hasta 221 mm*m² esto podría ocasionar que las concentraciones de Chl-a se vean disminuidas debido a una dilución de esta en un mayor volumen de agua en el lago provocado por las lluvias, produciendo que los valores tiendan a disminuir hacia los meses de noviembre y diciembre, iniciando la época de secas en enero aumentaría paulatinamente las concentraciones hasta su mayor punto en el mes de abril, esto debido a que el aporte directo de agua se vuelva escaso y el arrastre de los nutrientes a lo largo de las lluvias incrementa esta concentración de Chl-a obtenida en la estimación lograda. Es de tomar a consideración que no se cuenta con un mayor número de imágenes satelitales para la temporada de lluvias ya que la presencia de nubes propias de la temporada vuelve imposible la obtención de datos con las características necesarias para realizar una secuencia de imágenes a lo largo de todos los meses del año que harían posible establecer datos más robustos para el seguimiento de este fenómeno ocurrido en los lagos.

Al no ser constante, periódico y puntual el monitoreo de los lagos del PNLM en lo que respecta a la cuantificación de la concentración de Chl-a el medio de validación se vio restringido a datos que no contaban con el suficiente detalle necesario para darle mayor precisión, aunque con ellos se permite hacer observaciones exactas y relevantes para próximos trabajos, sin embargo, los datos obtenidos fueron altamente parecidos con los que reporta Alcocer en 2018 acercándose la tendencia hasta una r² de 0.97, siendo este el mejor valor entre nuestros datos estimados y los cuantificados.

12 Conclusiones

El uso, procesamiento y análisis de imágenes satelitales aplicando el Modelo de Cuantificación de Clorofila permitió reportar variaciones en concentraciones de Clorofila-a dentro de los lagos del Parque Nacional Lagunas de Montebello, haciendo notar que:

El conjunto de los lagos de planicie son los mayormente afectados, a excepción de San José que se encuentra con valores cercanos a los lagos de alta montaña los cuales se encuentran exentos de conexiones superficiales con el otro conjunto, aunque se mantiene incierta conexión alguna de forma subterránea.

No se pudo conocer con exactitud cuál fue la fecha en la que los cambios aparecieron en la zona reportada por trabajos anteriores, pero puede notarse un alza a partir de mediados de los 2000 lo que correspondería con reportes de la problemática de los lagos y el inicio de los trabajos enfocados en conocer las causas y posteriormente resolver el deterioro del sistema.

Es de hacer notar que el modelo de cuantificación de clorofila con el que se realizó este trabajo tiende a sobrestimar la cantidad de Clorofila-a presente en los cuerpos de agua, por lo que es de suma importancia para futuros trabajos el tomar a consideración estos apuntes que incluirían el realizar muestreos para la generación de un modelo mejorado tanto en los lagos de planicie como en los de alta montaña, de igual manera estos inconvenientes abren las puertas para nuevas investigaciones con otro tipo de imágenes satelitales en las que se consideren estos métodos y sean perfeccionados para obtener cada vez una mejor validación de los resultados acercándonos a la mayor certeza de realidad posible que nos pueda dar el uso de la percepción remota en el estudio de las dinámicas que tienen los fenómenos que ocurren en la zona de estudio y afectan a la población directa e indirectamente que se encuentra alrededor del parque.

13 Referencias Bibliográficas

- Alcocer J, Oseguera LA, Sánchez G, González CG, Martínez JR & González R. (2016). Bathymetric and morphometric surveys of the Montebello Lakes, Chiapas. *Journal of limnology*, 75(1), 56-65.
- Alcocer J, Merino-Ibarra M, Oseguera LA, Escolero O. (2018). Anthropogenic impacts on tropical karst lakes: "Lagunas de Montebello", Chiapas. *Ecohydrology*, 11(2029).
- Alvarado-Velázquez J. (2015). Evaluación espacial de la contaminación potencial puntual y difusa en la Cuenca del Río Grande de Comitán, Chiapas. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. 90p
- Alvarado-Velázquez J. (2017). Evaluación del transporte de sedimentos y la calidad del agua, utilizando swat, en el Rio Grande de Comitán, Chiapas. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. 53p
- Ángeles-Rivera, MI. (2019). Detección de cambios de la cobertura de manglar en la Barra de Tecoaapa Guerrero aplicando técnicas de percepción remota. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. 125 p
- Bahena-Bahena, J. (2014). Cartografía temática de la Cuenca Hidrográfica del Sistema Lagunar de Montebello, Chiapas. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Guerrero. 88 p.
- Barajas-García, F. A., (2017). Análisis de nutrientes en río, pozos y norias de la cuenca del Río Grande de Comitán, Chiapas, México. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. 114 p.
- Brizuela AB, Aguirre CA, Velasco I. (2007). Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para análisis multitemporal. *TELEDETECCIÓN - Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*, Ed. Martin, pp. 207-214
- Chuvieco E. (1995). *Fundamentos de Teledetección*. 2ª edición, Ed. RIALP, Madrid. 449 p.

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2009). Gobierno del Estado de Chiapas, Instituto Estatal del Agua. Plan de Gestión de la Cuenca del Río Grande-Lagunas de Montebello, Chiapas, México. CONAGUA. México:168p.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2016). Conjunto de datos vectoriales de Áreas Naturales Protegidas Federales de México. <http://geoportal.conabio.gob.mx/#!l=anpdic16gw:1@m=mixto>
- Congedo, Luca, (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. Journal of Open Source Software, 6(64), 3172, <https://doi.org/10.21105/joss.03172>
- Dall'Olmo G, Gitelson AA, Rundquist DC, Leavitt B, Barrow T, Holz JC. (2005). Assessing the potential of SeaWiFs and MODIS for estimating chlorophyll concentration in turbid productive waters using red and near-infrared bands. Remote Sensing of Environment, 96(176-187)
- Daniele, D. 2009. Aplicación de sistemas de información geográfica al estudio de acuíferos costeros complejos. Caso del campo de Dalías. Ed. Universidad de Almería. 304 p.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (1959). Decreto que declara necesaria y de utilidad pública la creación de un parque nacional en la región conocida con el nombre de Lagunas de Montebello, ubicada en Independencia y La Trinitaria, Chis. 3 p. https://simec.conanp.gob.mx/pdf_decretos/167_decreto.pdf
- Durán-Calderón J. I. (2013). Análisis geomorfológico del Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. 91 p.
- García, E. (1988). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de geografía UNAM. 217 p.
- Gitelson AA, Schalles JF, Hladik CM. (2007). Remote chlorophyll-a retrieval in turbid, productive estuaries: Chesapeake Bay case study. Remote sensing of Environment, 109(4), 464-472

- González Villarroel MA. (2019). Caracterización cualitativa y determinación de sitios de muestreos en el Sistema Lagunar de Montebello, Chiapas. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. 79 p.
- González Vilas L, Spyrakos E, Torres Palenzuela JM. (2011). Neural network estimation of chlorophyll a from MERIS full resolution data for the coastal waters of Galician rias (NW Spain). *Remote Sensing of Environment*, 115(524-535).
- Hallegraeff, G.M. (1993). A review of harmful algal blooms and their apparent global increase. *Phycologia* 32(2): 79-99.
- Hernández Victoria PP. (2016). Concentración y distribución vertical de la clorofila a fitoplanctónica de los lagos de Montebello, Chiapas, México. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. 49 p.
- Hollander M y Wolfe DA (1973). *Nonparametric Statistical Methods*. New York: John Wiley & Sons. 68–75.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021). Conjunto de datos vectoriales de División política estatal escala 1:250 000. <http://geoportal.conabio.gob.mx/#!l=dest20gw:1@m=mixto>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2022) <https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/imgLANDSAT/>
- Juárez Hernández EL. (2014). Análisis hidrogeoquímico de la cuenca del Río Grande Comitán. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. 107 p.
- Lira J. (2003). La percepción remota. Nuestros ojos desde el espacio. La ciencia para todos
- López-Rivera, S. (2017). Uso de fertilizantes nitrogenados en la cuenca del Río Grande de Comitán, ¿La lixiviación representa un problema ambiental? Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. 116 p.

- Martínez-Ángeles, M. (2015). Caracterización de los suelos de la cuenca del Río Grande, como soporte para entender la dinámica de contaminantes que llegan al Sistema Lagunar de Montebello, Chiapas. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. 139 p.
- Maya García EE. (2017). Estimación del estado trófico de 18 lagos del Parque Nacional "Lagunas de Montebello", Chiapas, México. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. 35 p.
- Melia, J., Gandia, S., & Caselles, V. (1986). Remote sensing and spectral signature. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid. Matemáticas.* 80(1-2). 177-185.
- Mora, P. L., Bonifaz, R. y López-Martínez, R. (2016). Unidades geomorfológicas de la cuenca del Río Grande de Comitán, Lagos de Montebello, Chiapas-México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 68 (3) 337-394 pp.
- O'Reilly JE, Maritorena S, Mitchell BG, Siegel DA, Carder KL, Garver SA, Kahru M, McClain C. (1998). Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFs. *Journal of Geophysical Research*, 103(11), 24937-24953
- Olea-Olea, S. y Escolero, O. A. (2018). Nutrients load estimation to a lake system through the Local Groundwater Flow: Los Lagos de Montebello, México. *Journal of South American Earth Sciences* 84 (2018) 201-207. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.03.016>
- Olea-Olea S. (2015). Análisis del impacto de la actividad Agrícola en el agua subterránea en la zona de la trinitaria, Chiapas. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. 160 p
- Oliveros, J. (2014). Aplicación de percepción remota para la detección de florecimientos de algas en valle de bravo. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. 79 pp.
- Ormeño-Villajos, S. (2006) *Teledetección Fundamental - 3ª edición*. Ed. Universidad politécnica de Madrid. Madrid. 344p.

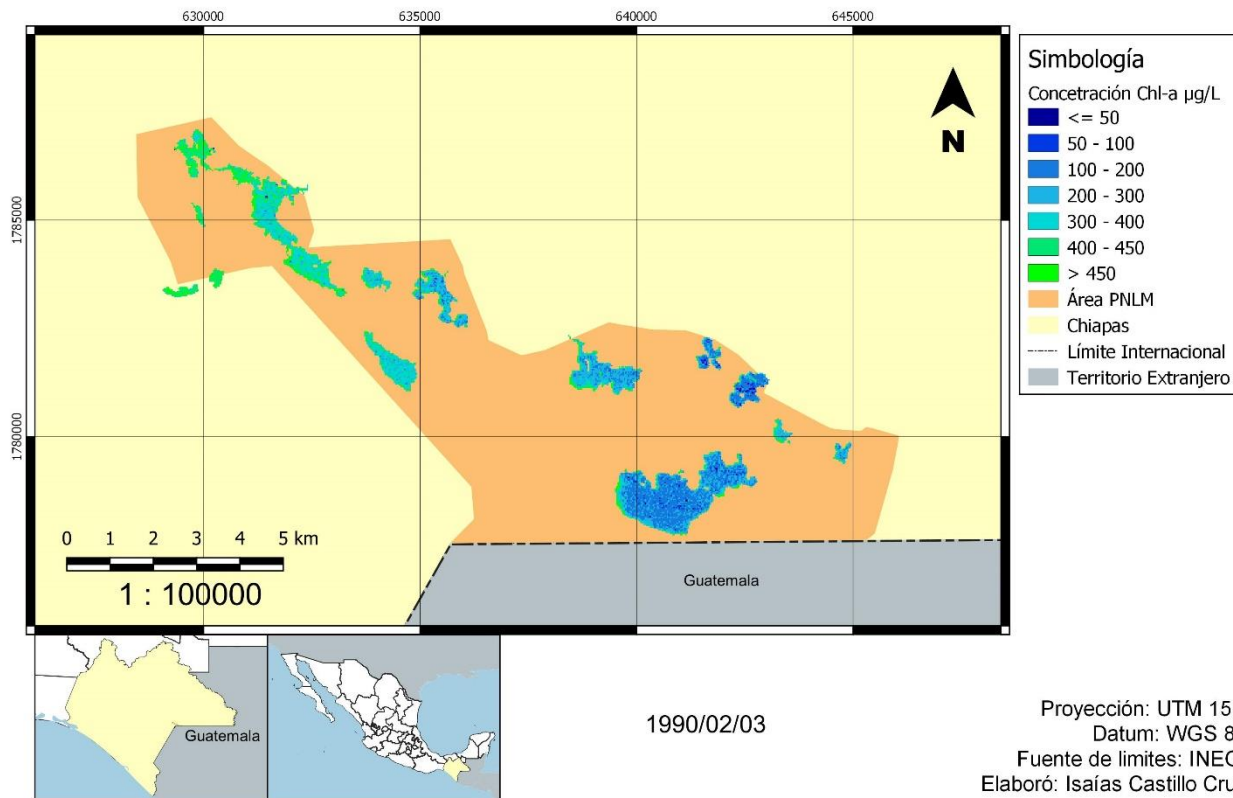
- Oseguera L, Alcocer J (2015) Concentración y distribución vertical del carbono particulado (total y orgánico) en los lagos de Montebello, Chiapas. In "Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014." (F. Paz and J. Wong, eds.), pp. 457–463. Programa Mexicano del Carbono, Texcoco.
- Paerl, H.W. (1996). A comparison of cyanobacterial bloom dynamics in freshwater, estuarine and marine environments. *Phycologia* 35(6): 25-35.
- Parra-Carrillo, L. A. (2017). Caracterización física del suelo y su relación con la infiltración de agua en 2 parcelas agrícolas en la cuenca del Río Grande de Comitán, Chiapas. Tesis de Licenciatura. Instituto Politécnico Nacional. 82 p.
- Ramos, N. R., García, I.B., Duverger, S.G., & Estrada, R.E., Morales, G. M. (2009). Software para corregir los datos inválidos en las imágenes Landsat 7. *Cub@: Medio ambiente y Desarrollo; Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente*, 9(17)
- Scaramuzza P, Micijevic E, Chander G. (2004). SLC gap-filled products phase one methodology. *Landsat Technical Notes*, 5p.
- Siegel y Castellan (1988) *Non parametric statistics for the behavioural sciences*. MacGraw Hill Int., New York. 213-214
- Band-Schmidt CJ, Bustillos-Guzmán JJ, López-Cortés DJ, Núñez-Vázquez E, Hernández-Sandoval FE. (2011). El estado actual del estudio de florecimientos algales nocivos en México. *Hidrobiológicos*, 21(3), 381-413.
- Tristan PM, Wainschenker RS, Doorn JH. (2008). Normalización de imágenes satelitales en el análisis multitemporal
- U.S. Geological Survey (USGS) (2022) <https://www.usgs.gov/landsat-missions/about>
- U.S. Geological Survey (USGS) (2022) <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions>

- Vásquez, M. A. y E. Méndez. (1994). Aspectos generales de la región: Lagos de Montebello. Reporte del trabajo para el curso de conservación de naturaleza y recursos naturales, Maestría en Ciencias: Recursos Naturales y Desarrollo Rural, ECOSUR Chiapas. San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México. 109 p.
- Vera Franco MN. (2017). Concentración y distribución de la biomasa fitoplanctónica en nueve lagos oligotróficos tropicales. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. 51 p.
- Villalpando Alaníz LB. (2015). Uso de percepción remota para la estimación de índice trófico de las Lagunas del Parque Nacional Lagunas de Montebello. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. 72 p.
- Watanabe, F., Alcântara, E., Rodrigues, T., Imai, N., Barbosa, C., & Rotta, L. (2015). Estimation of Chlorophyll-a Concentration and the Trophic State of the Barra Bonita Hydroelectric Reservoir Using OLI/Landsat-8 Images. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(9), 10391–10417.
- Zimba, V.P.; & Gitelson, A. (2006). Remote estimation of chlorophyll concentration in hyper-eutrophic aquatic systems: Model tuning and accuracy optimization. *Aquaculture*, 256, 272-286.

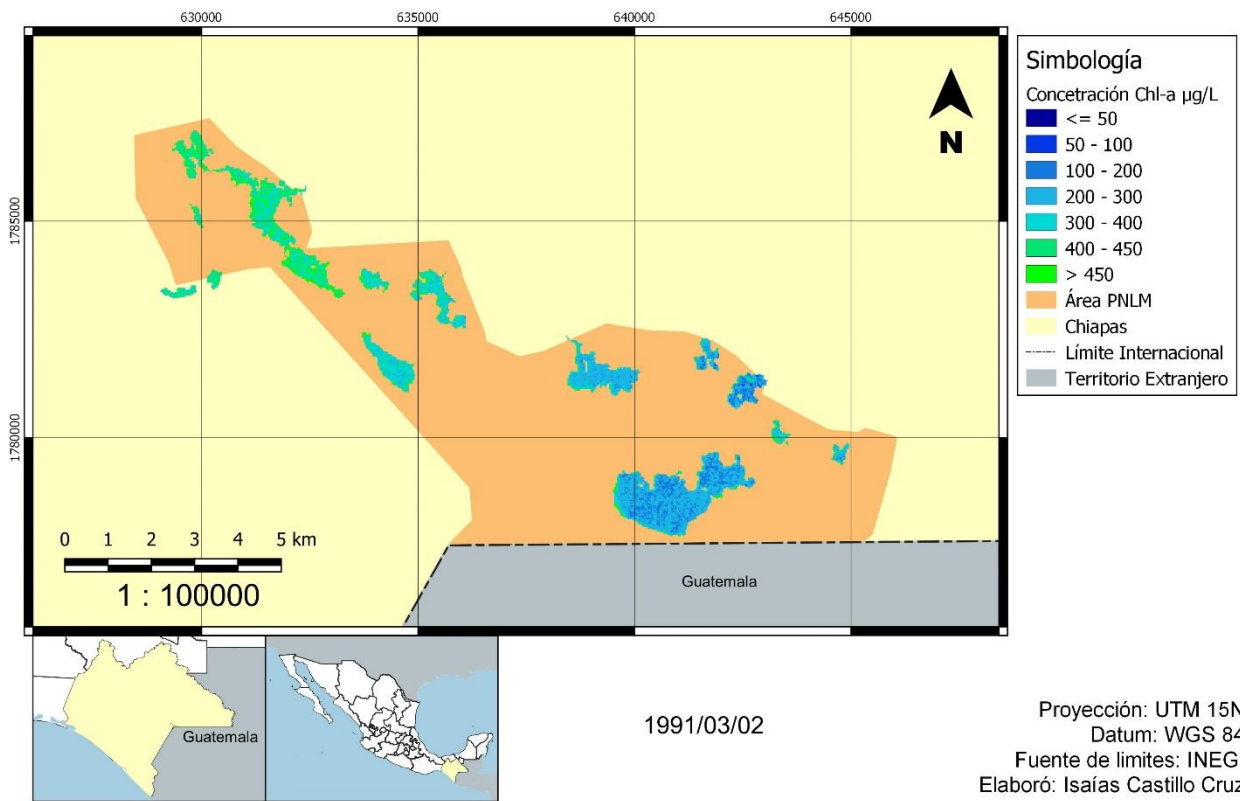
14 Apéndice

Mapas generados a partir de las imágenes satelitales y clasificados después de la aplicación del MCC.

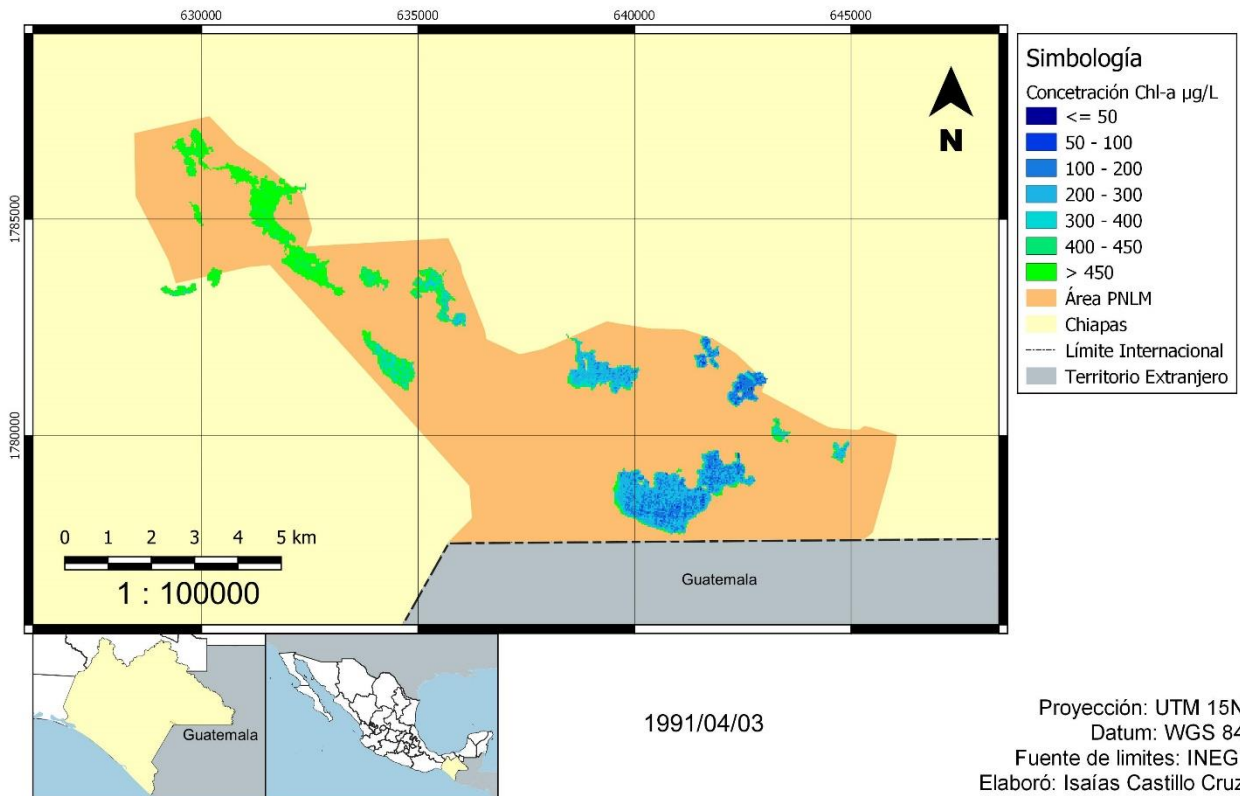
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



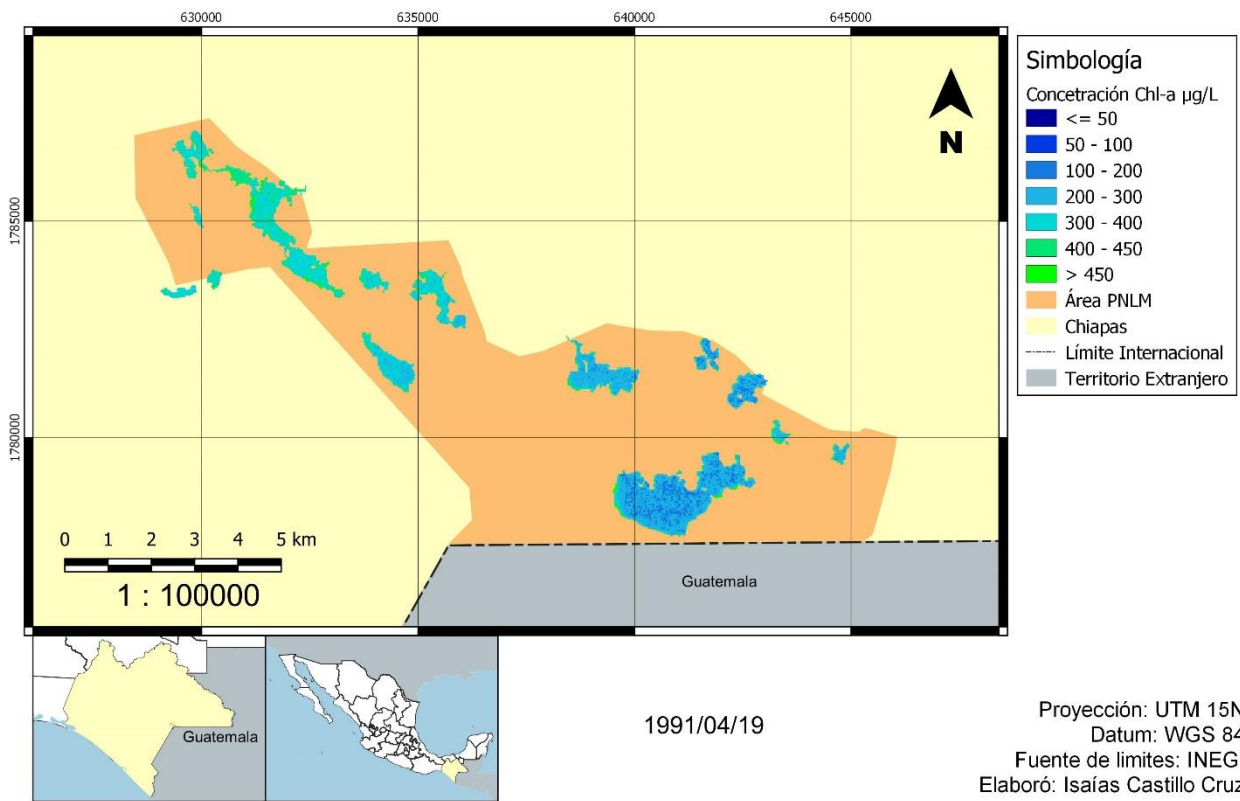
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



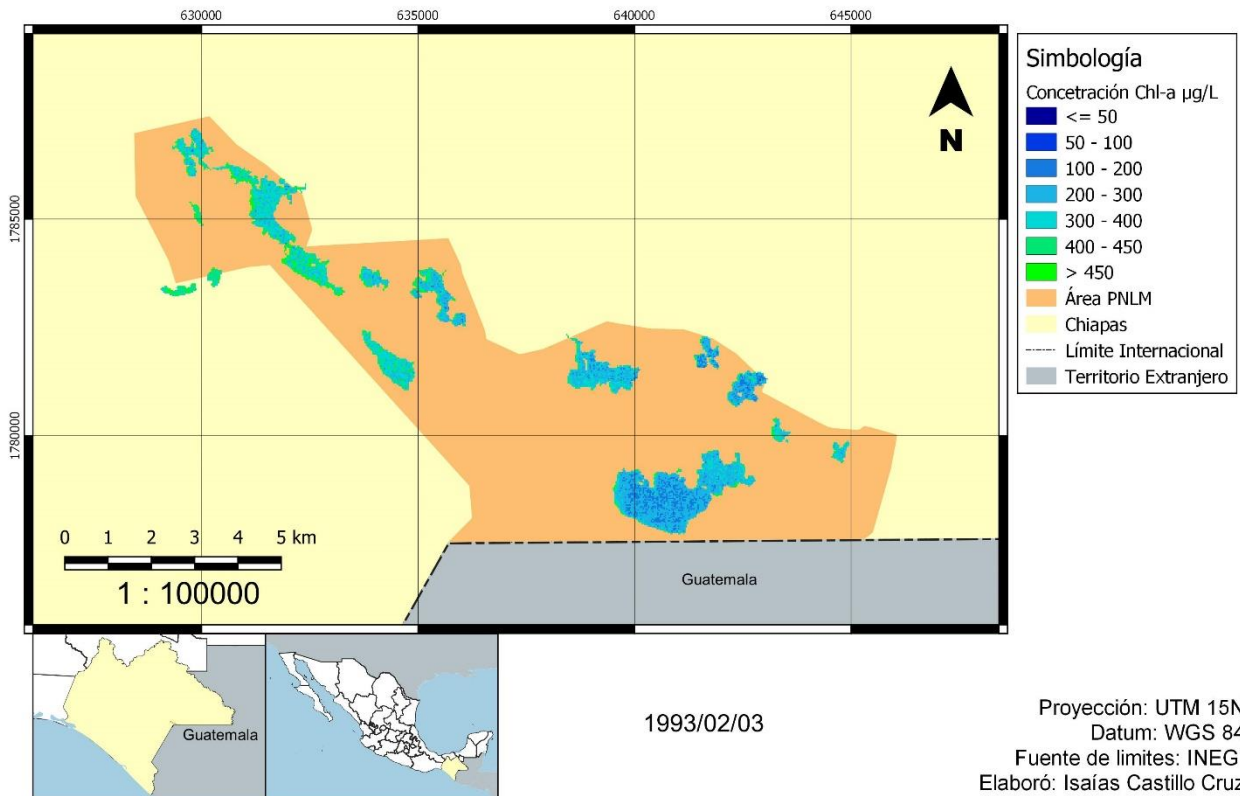
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



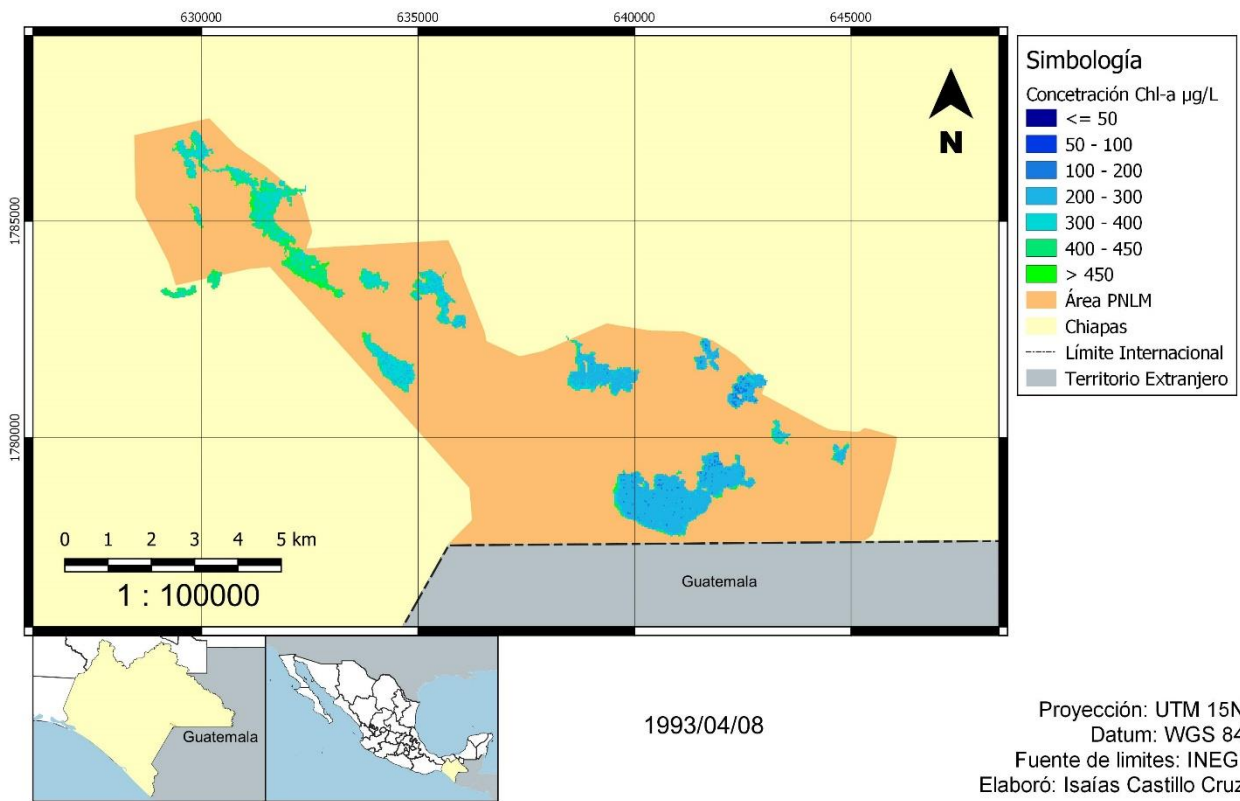
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



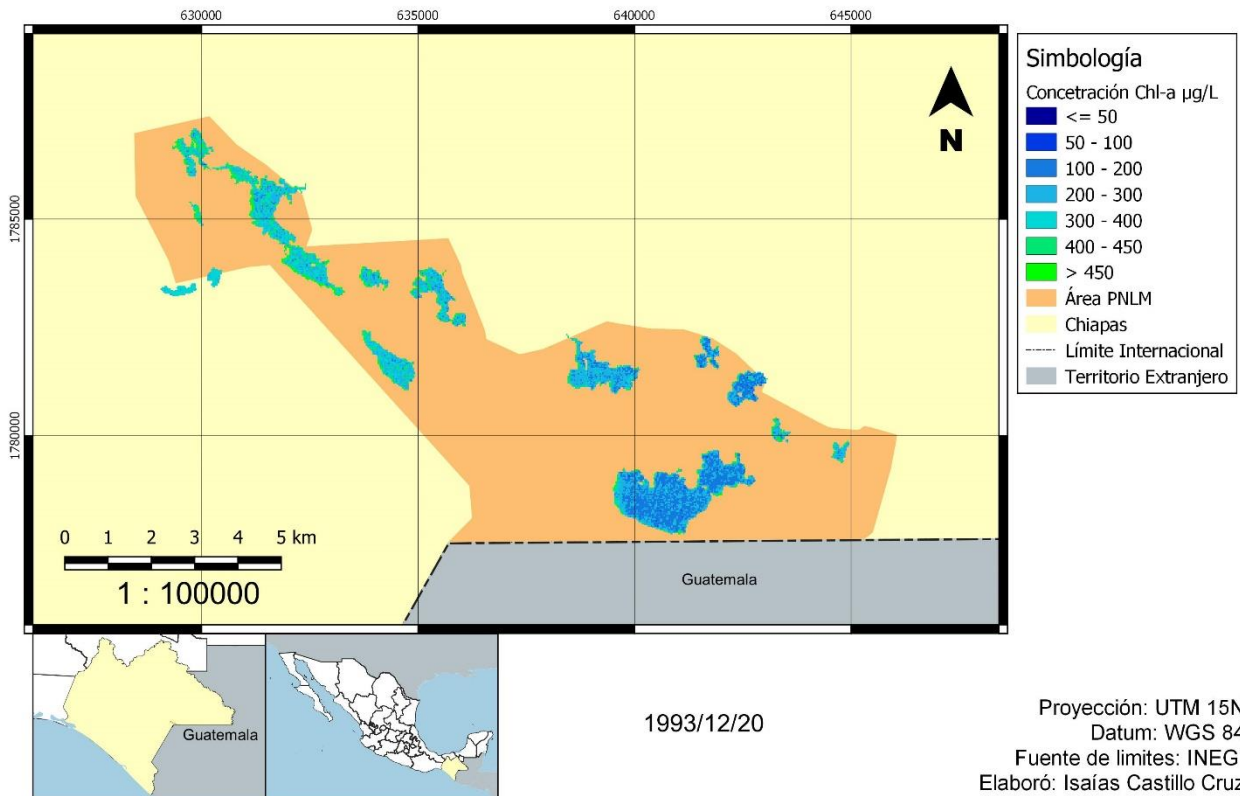
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



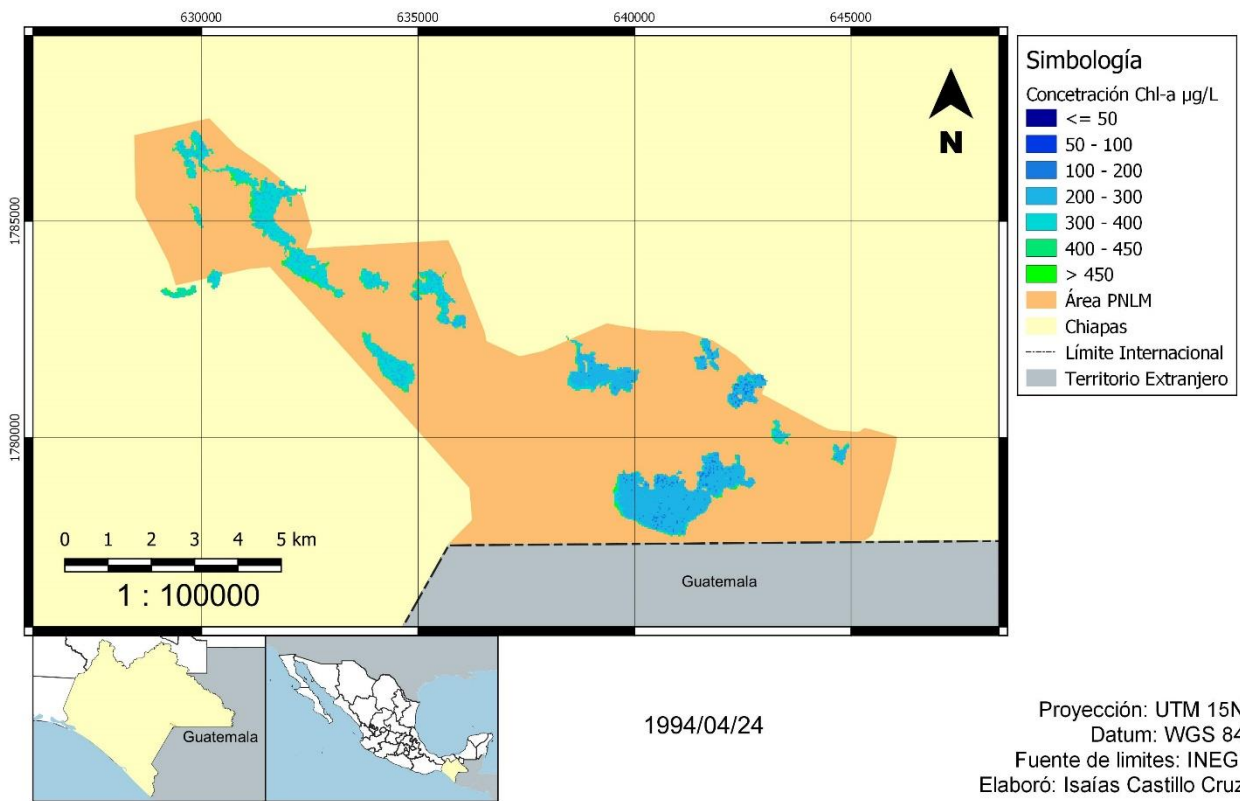
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



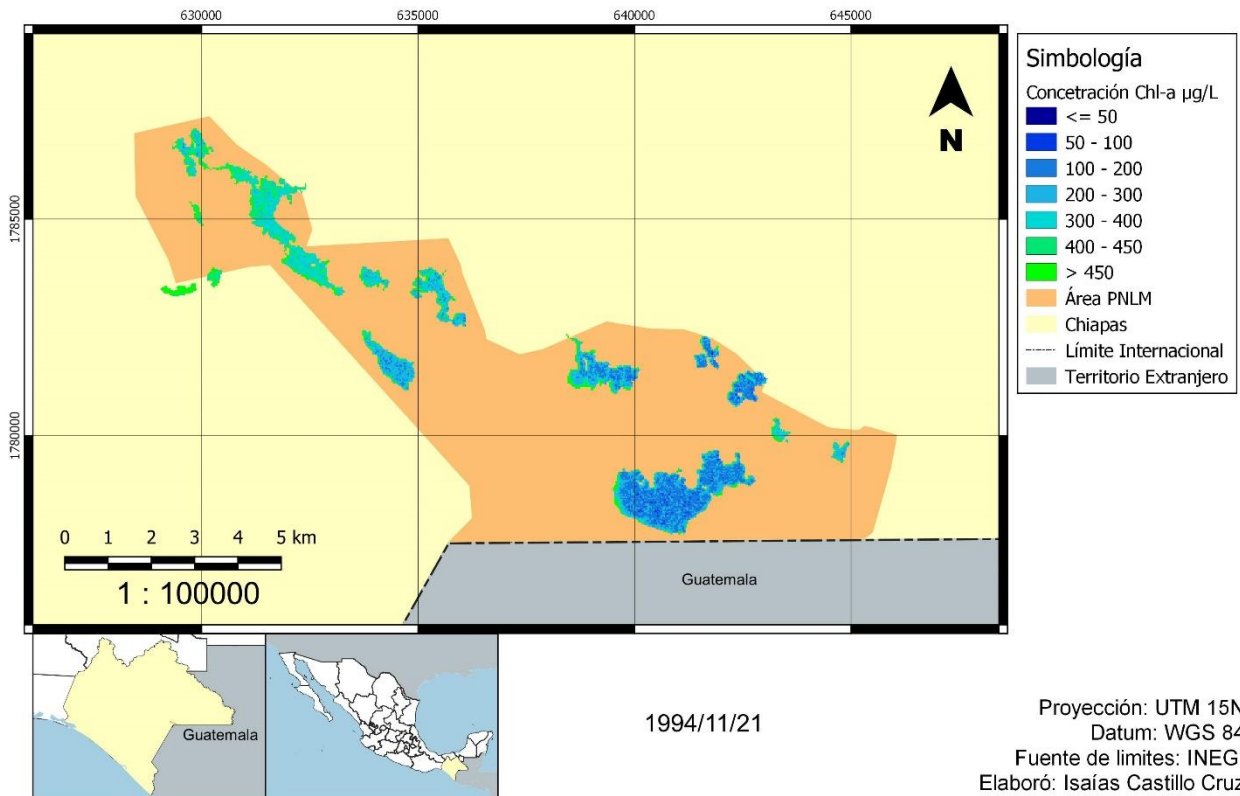
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



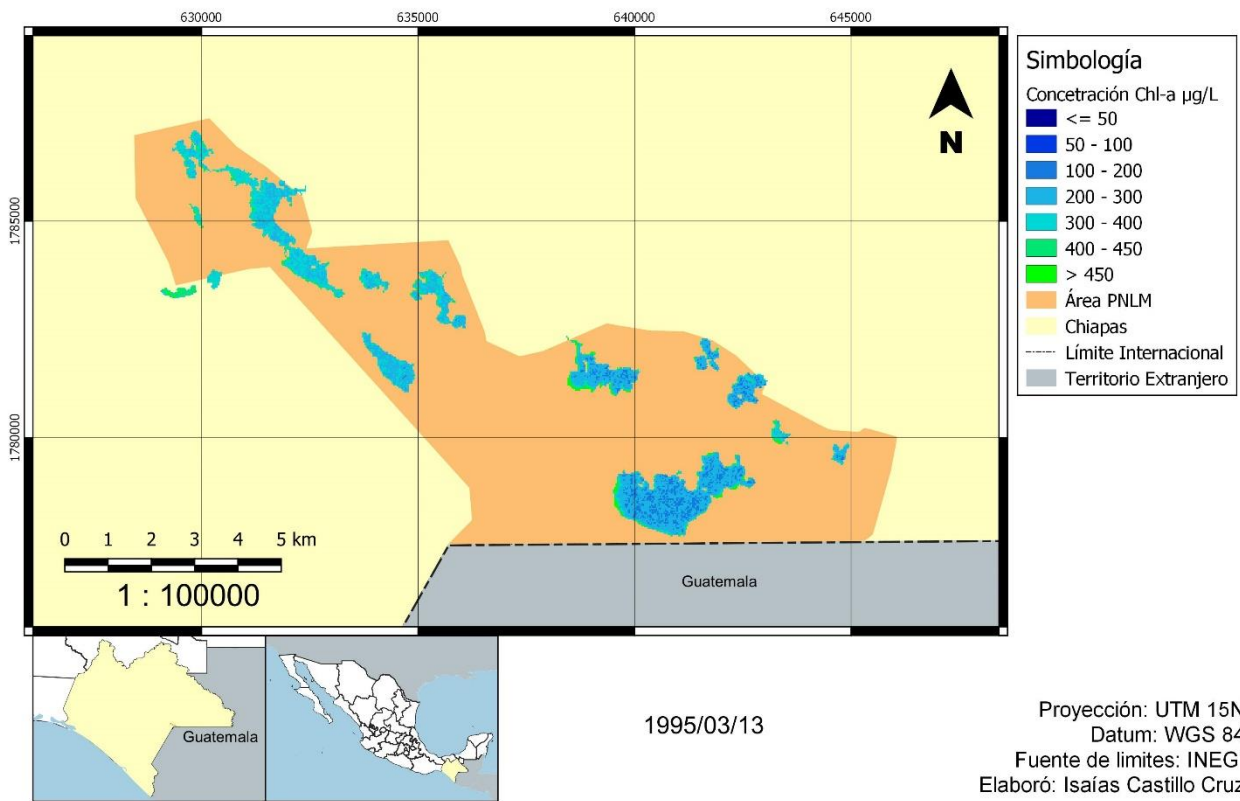
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



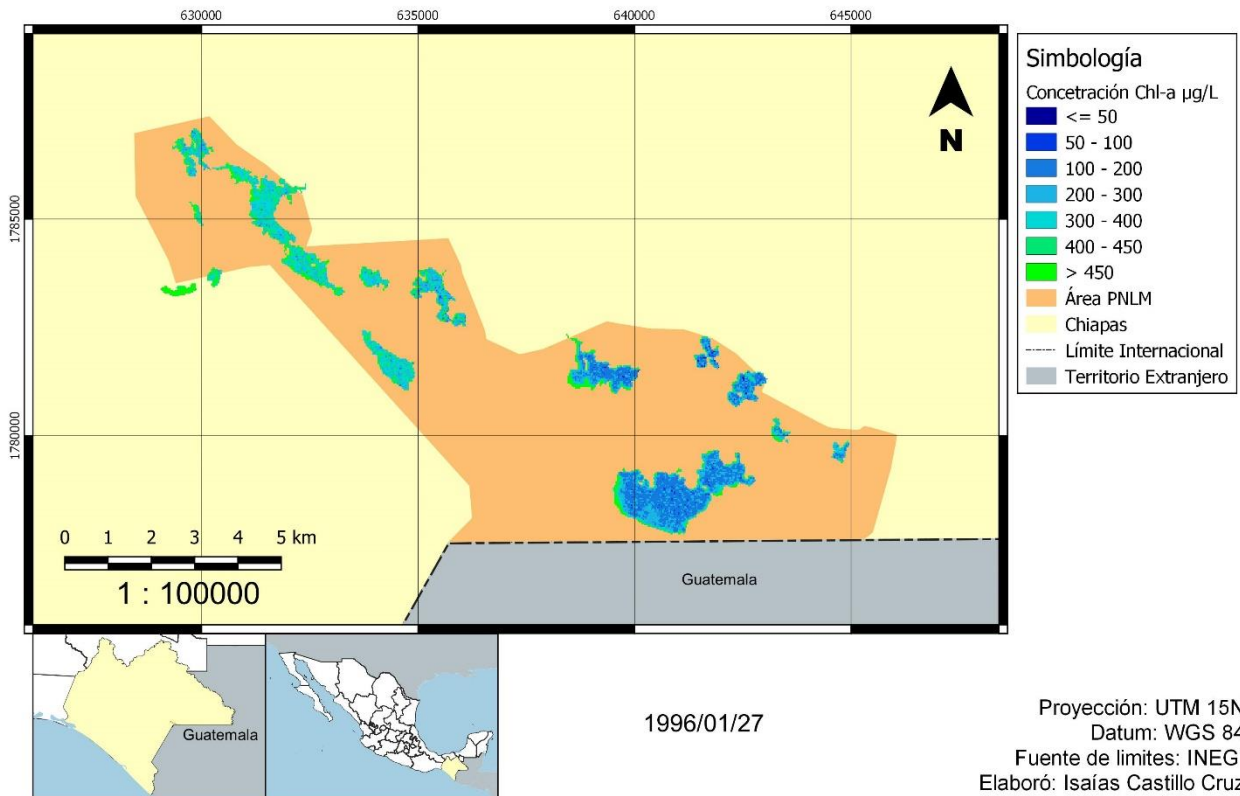
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



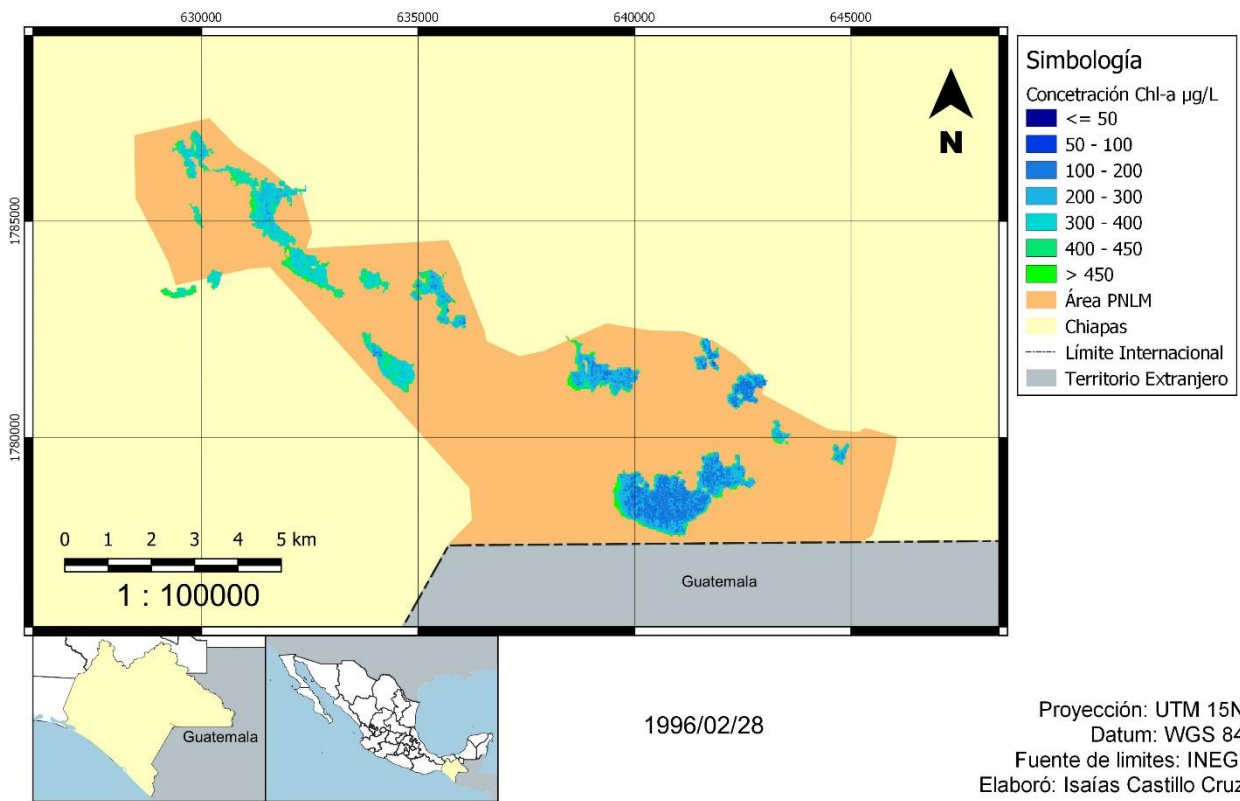
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



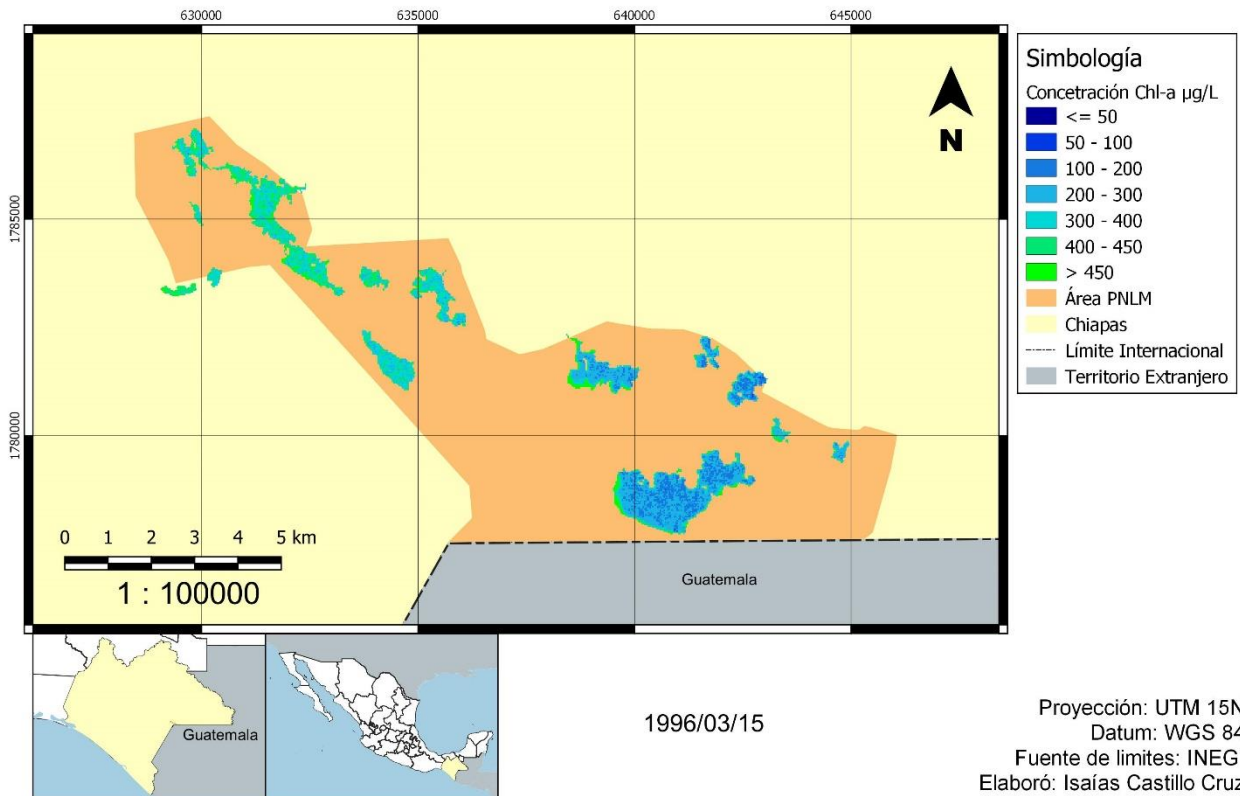
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



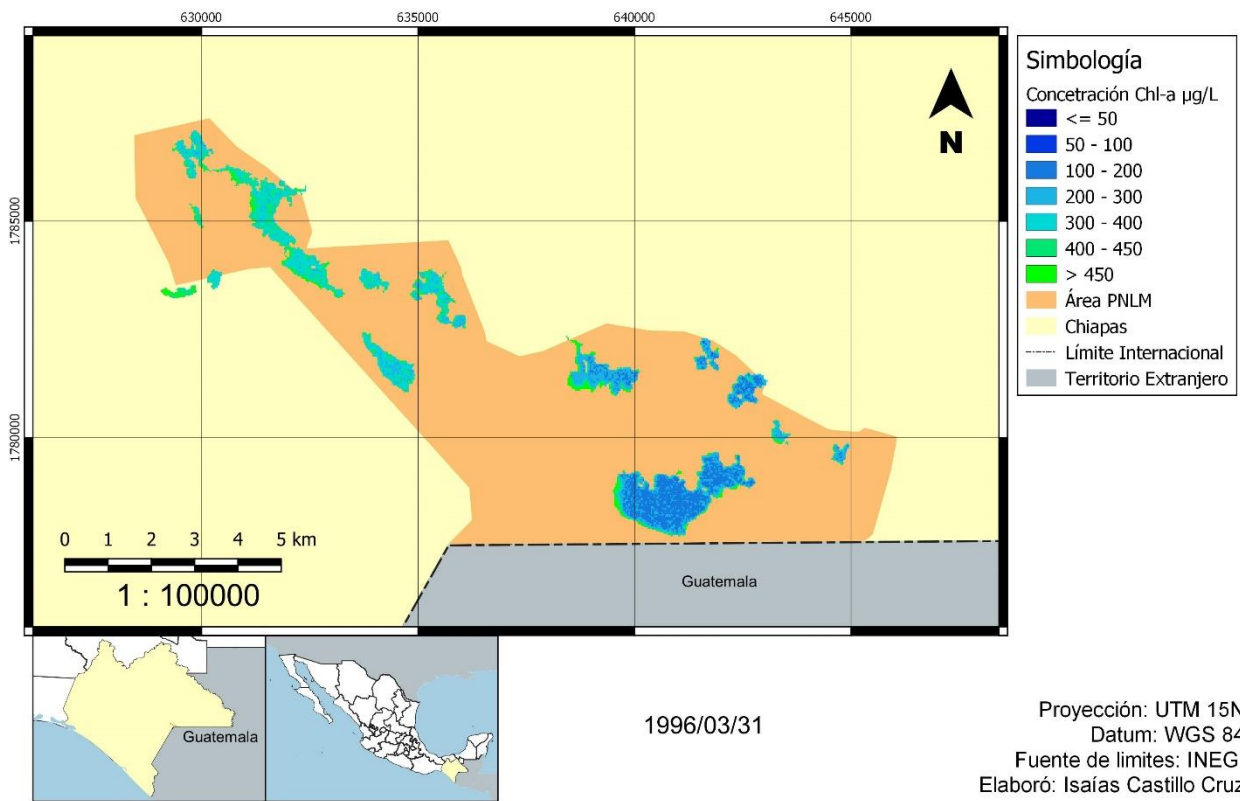
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



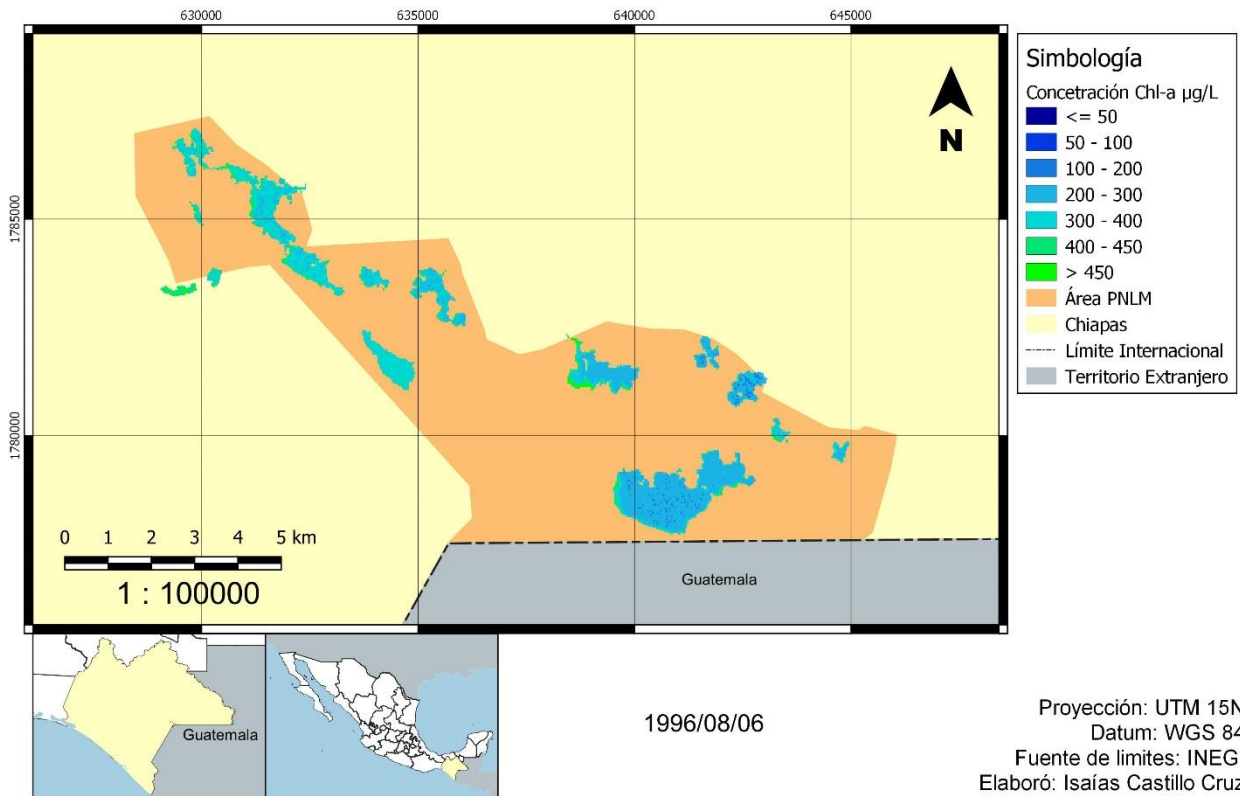
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



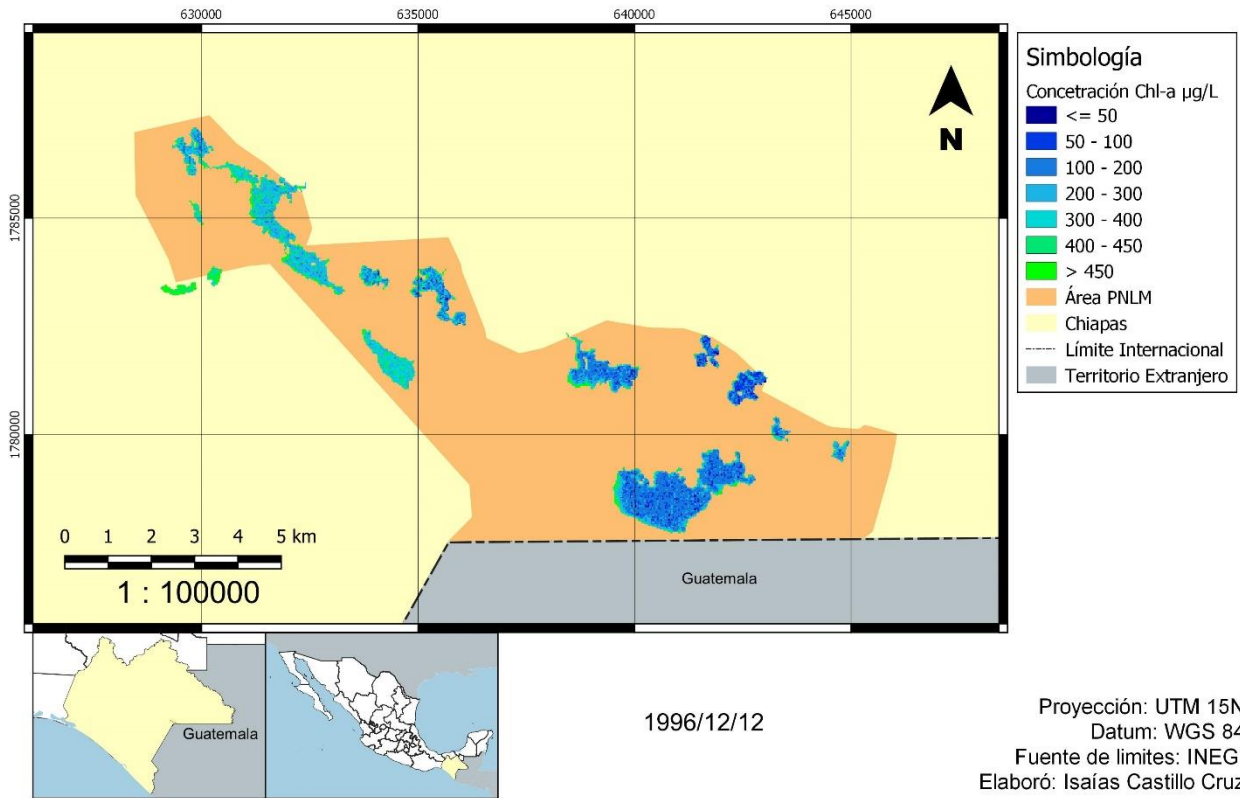
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



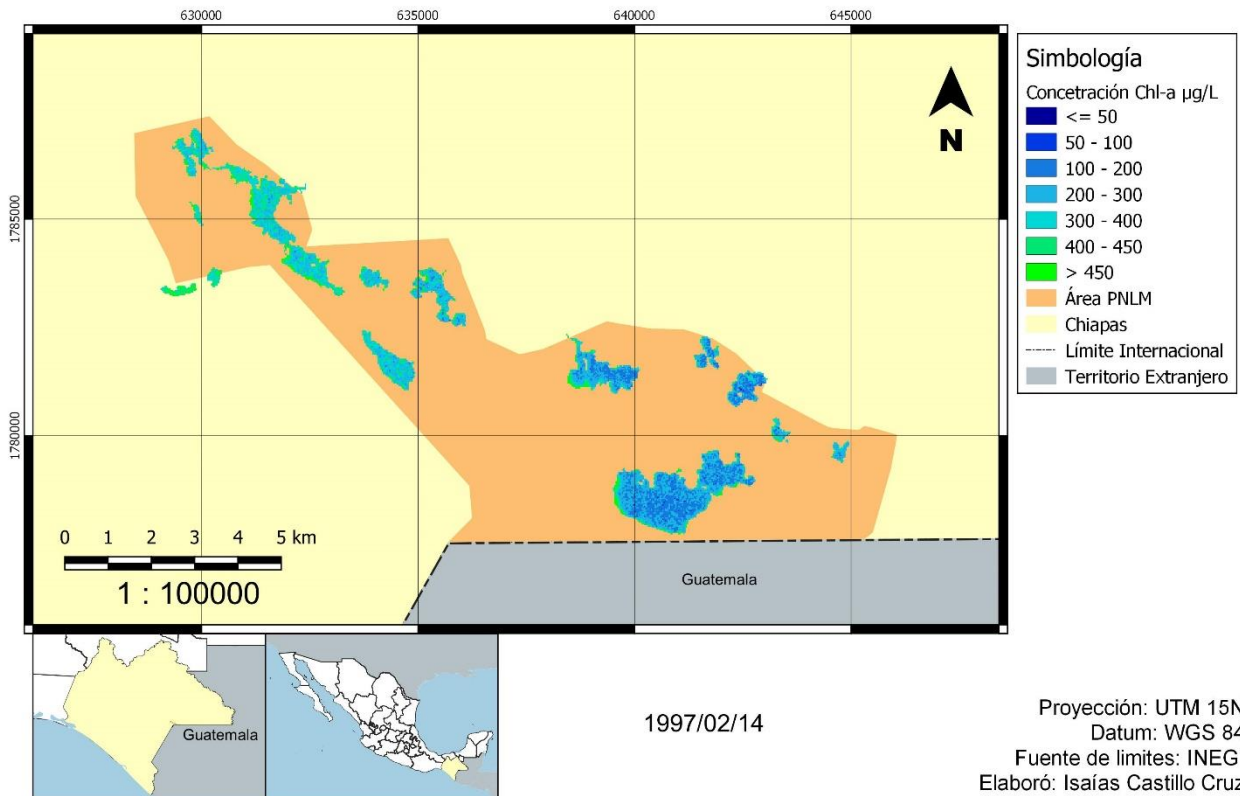
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



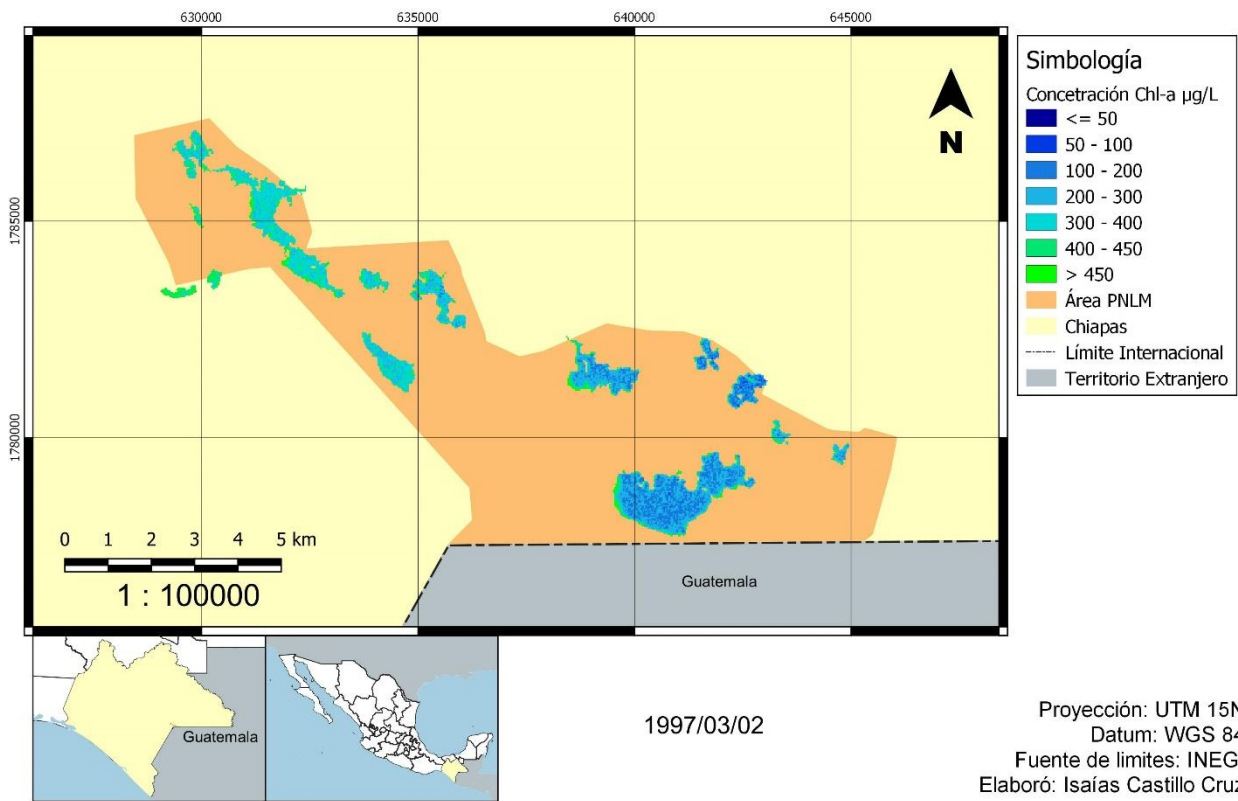
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



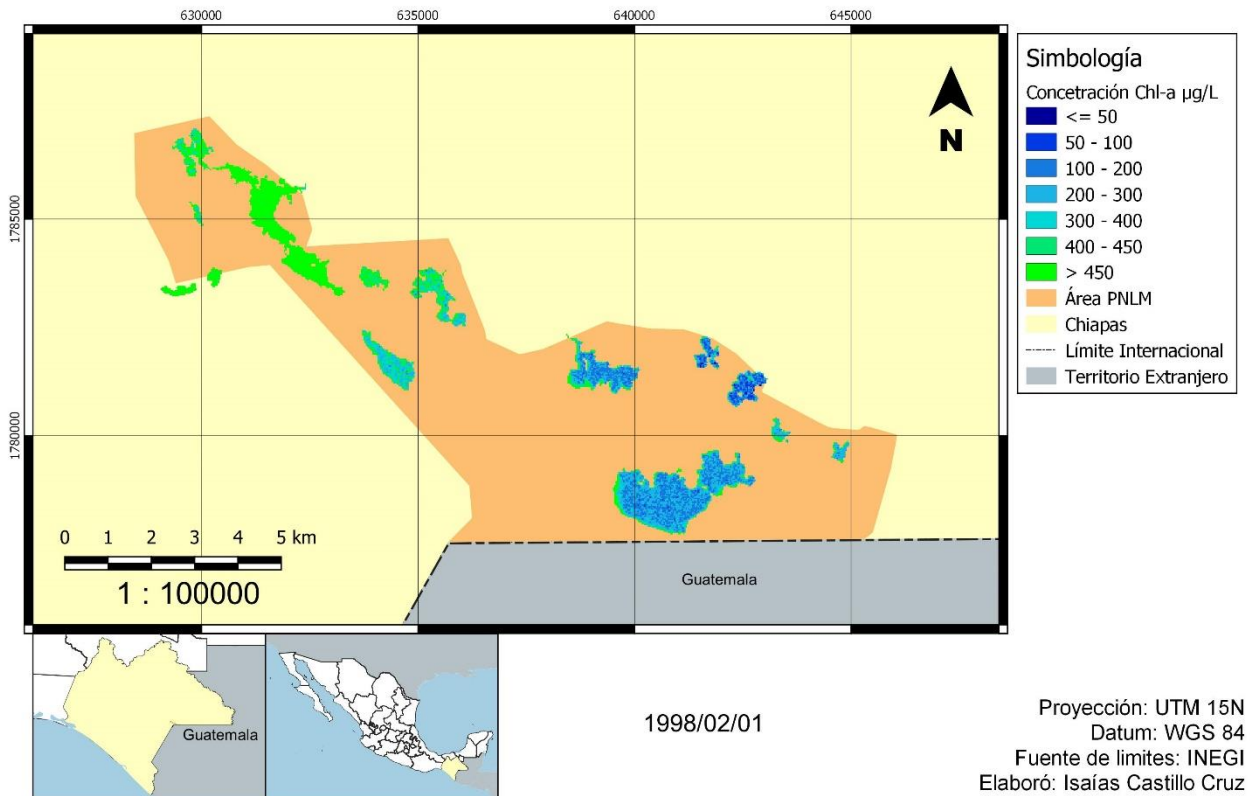
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



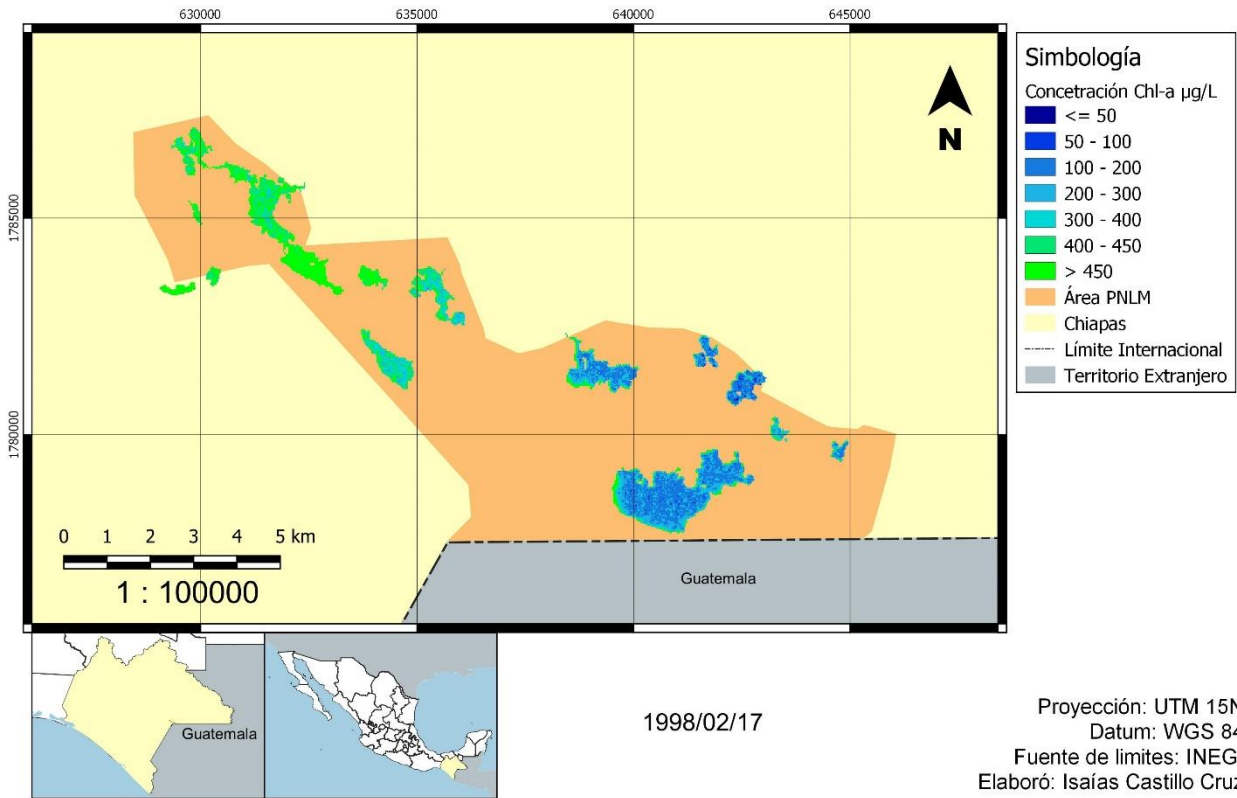
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



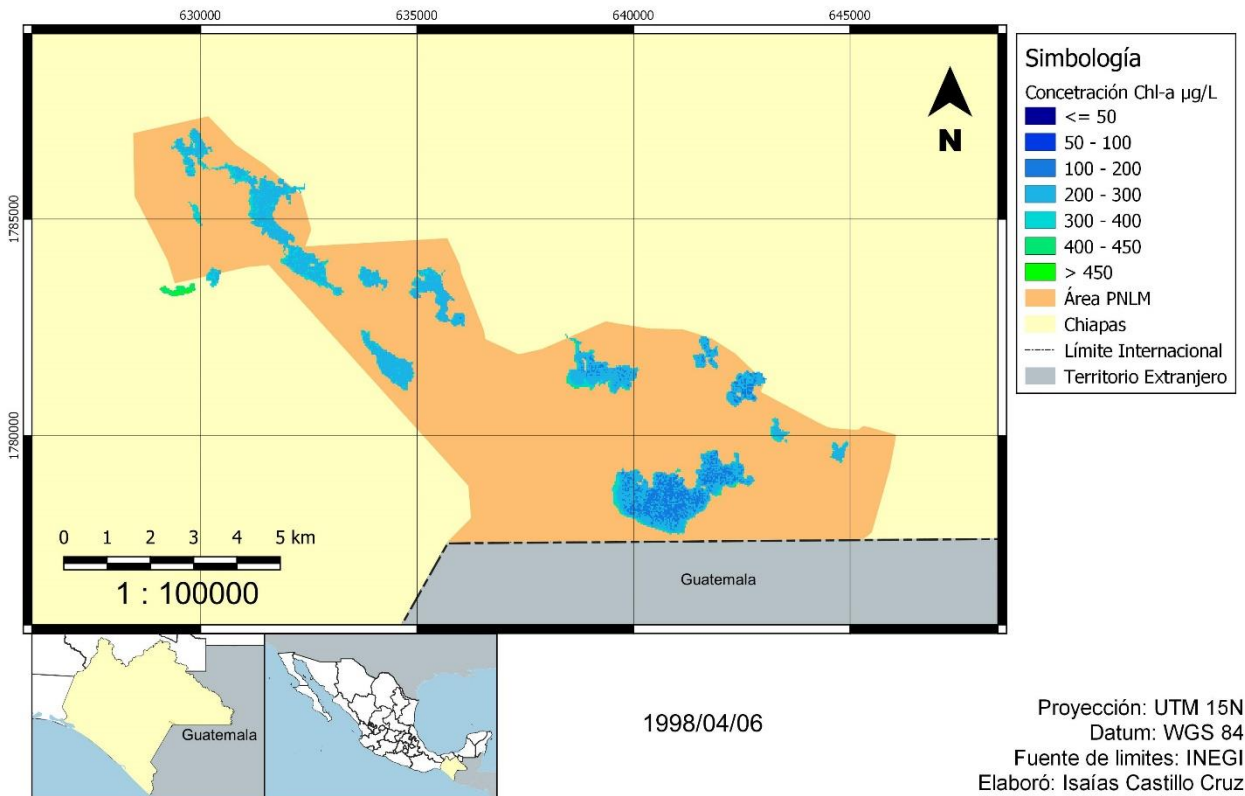
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



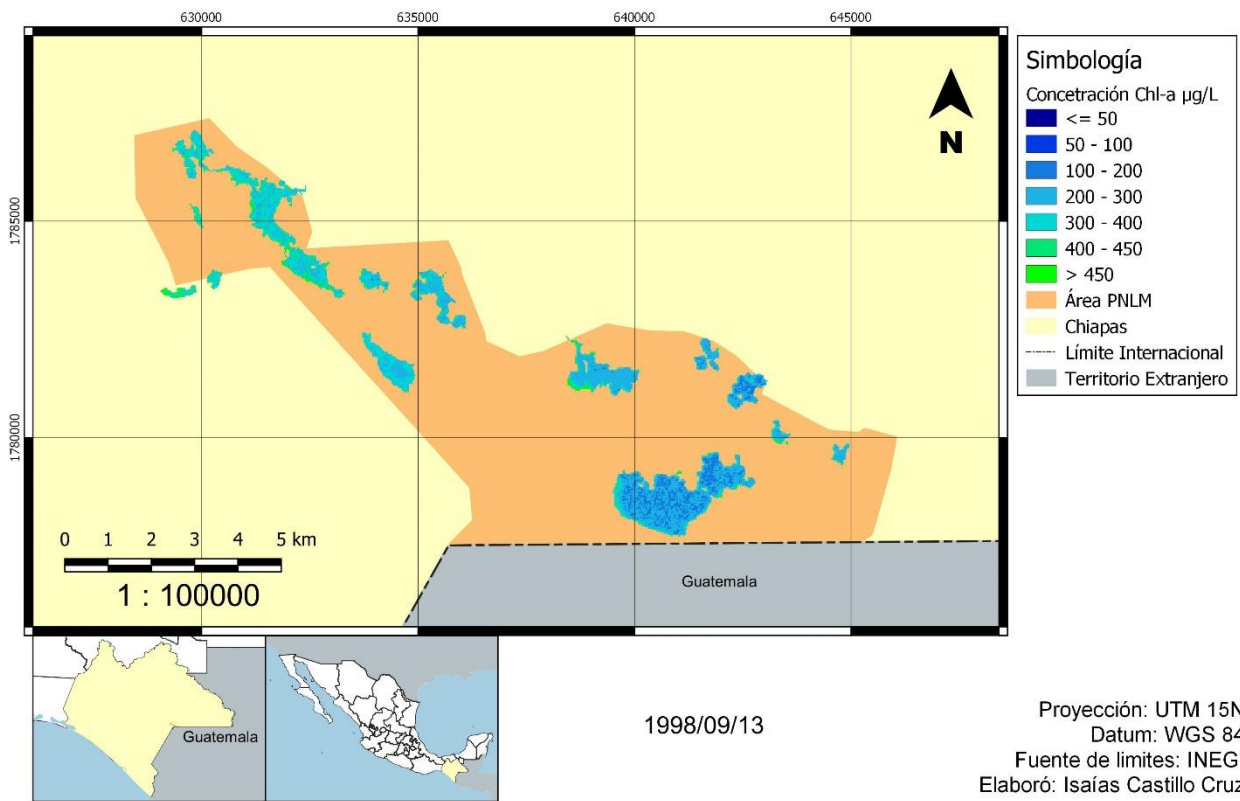
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



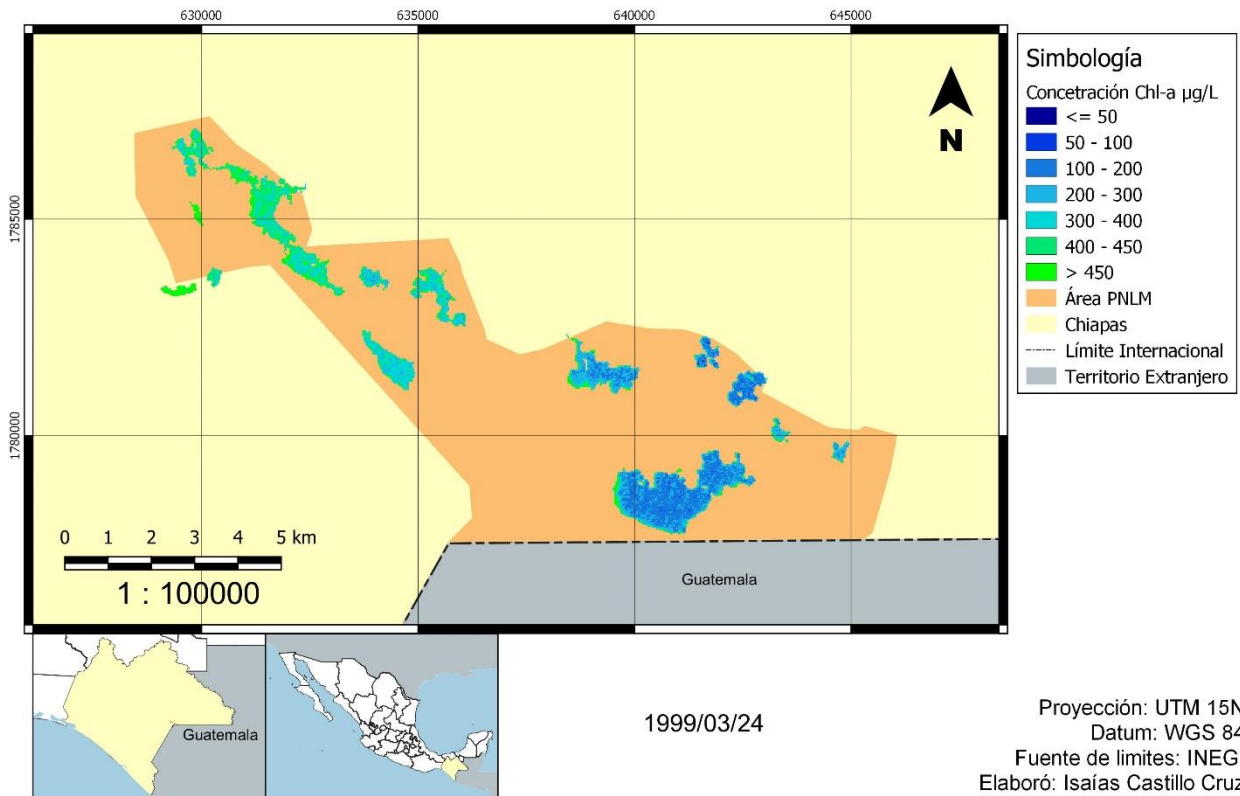
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



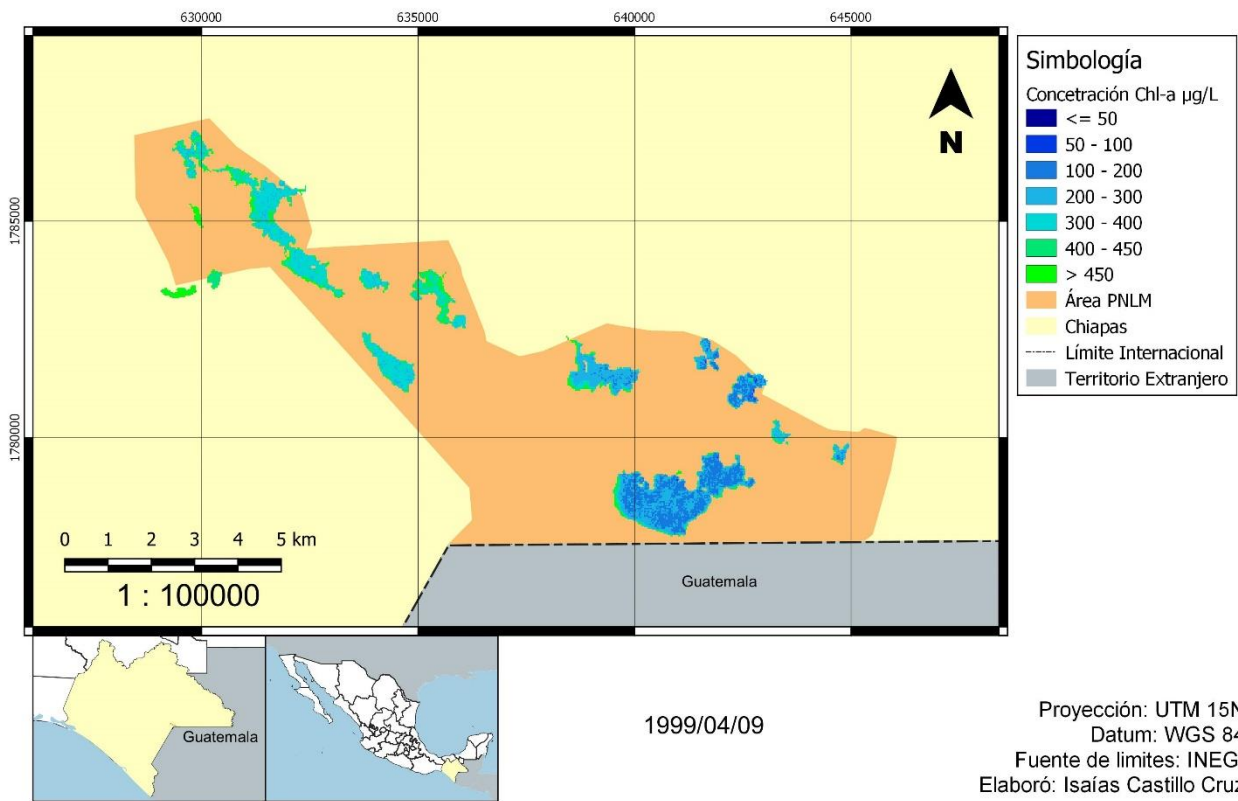
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



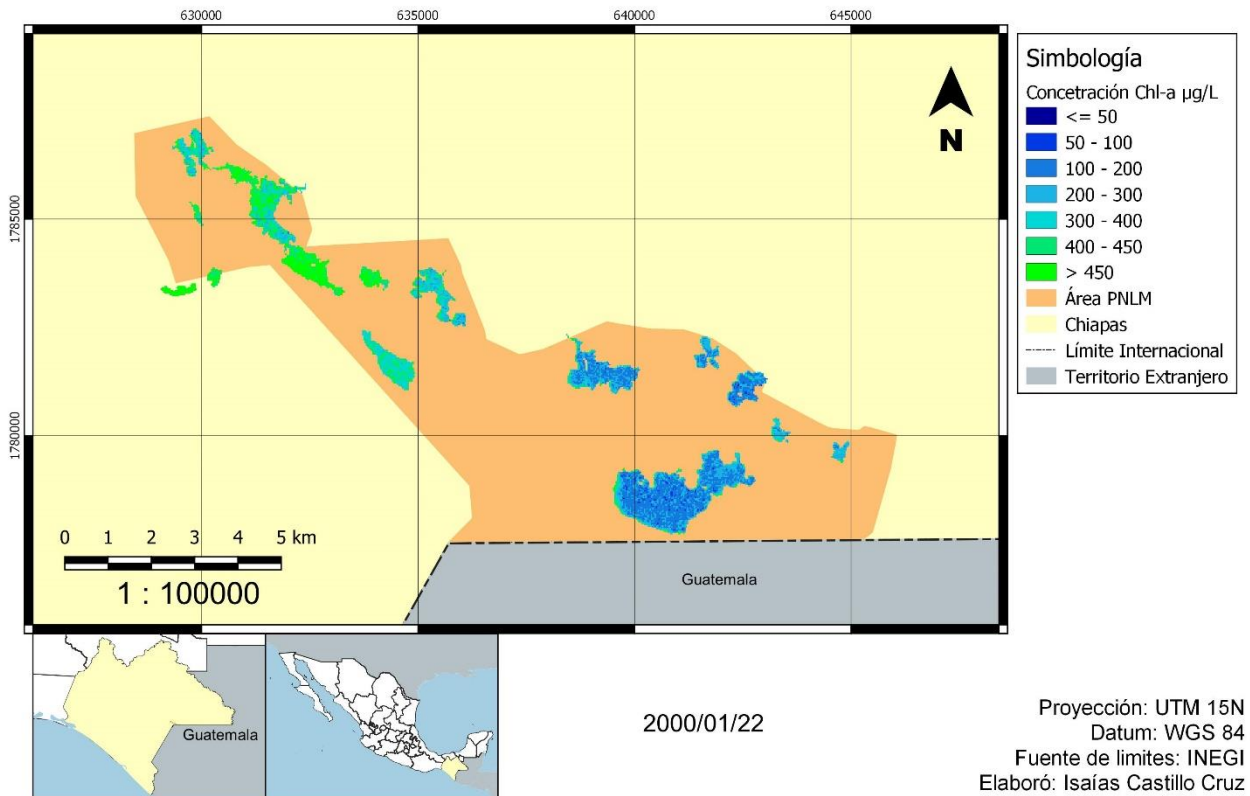
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



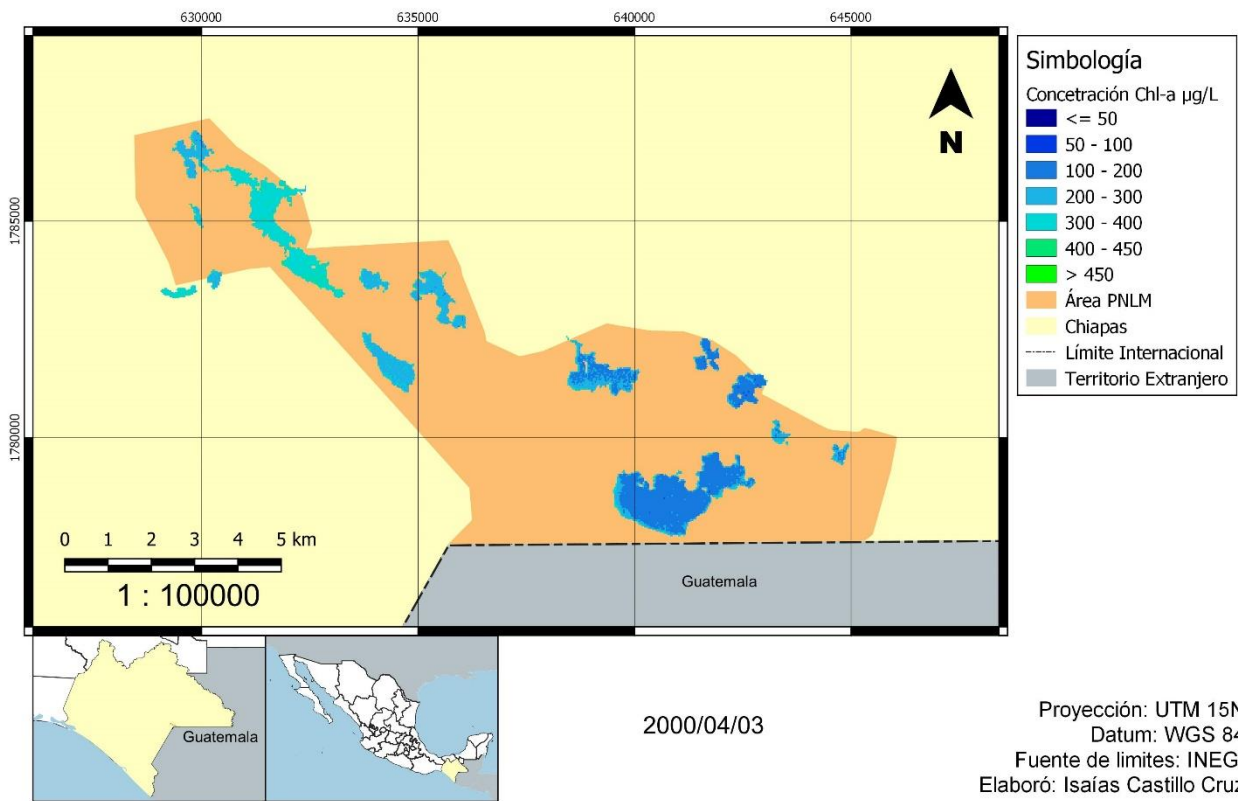
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



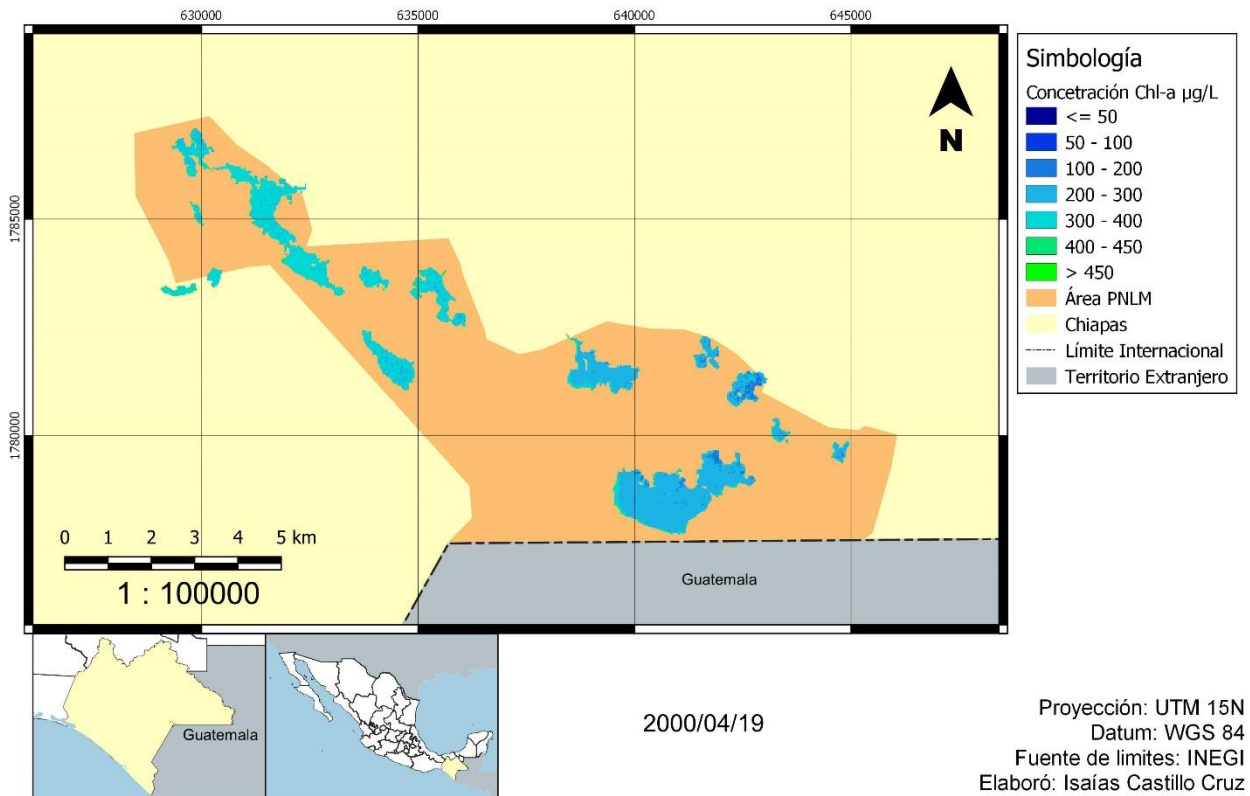
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



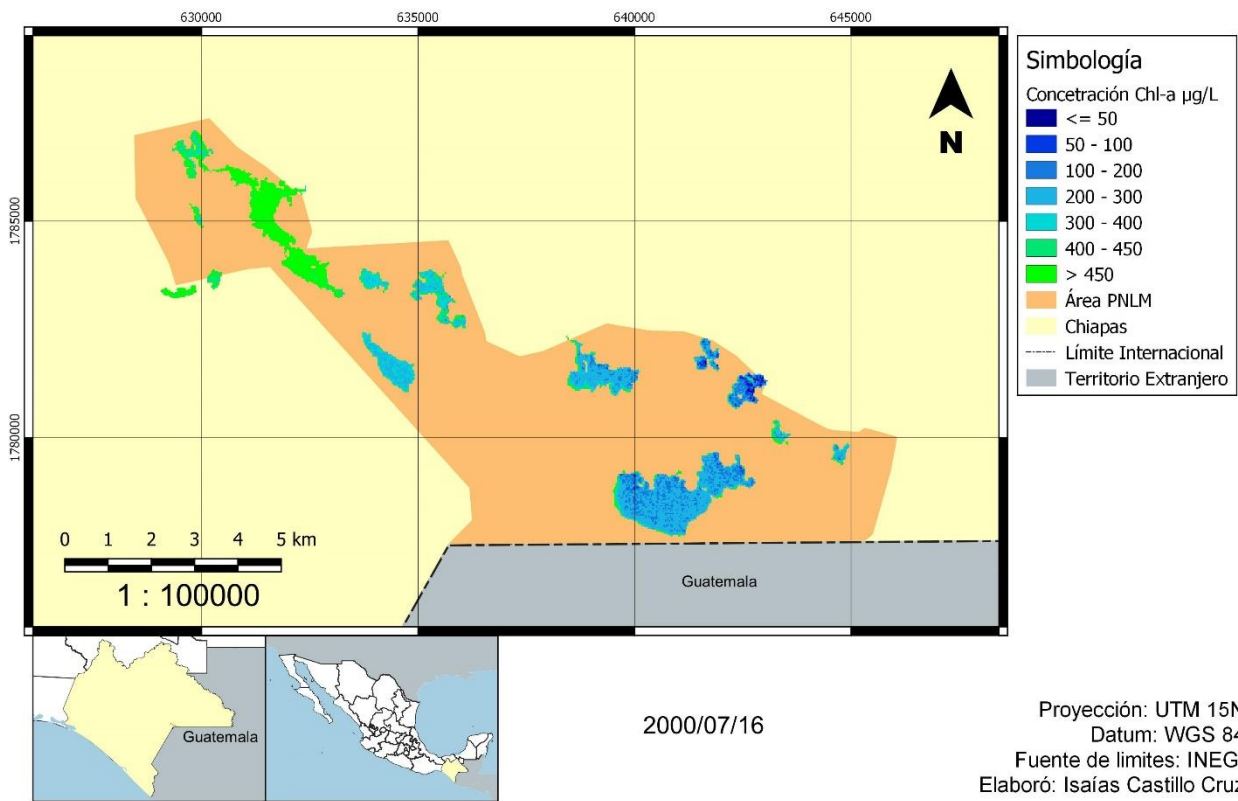
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



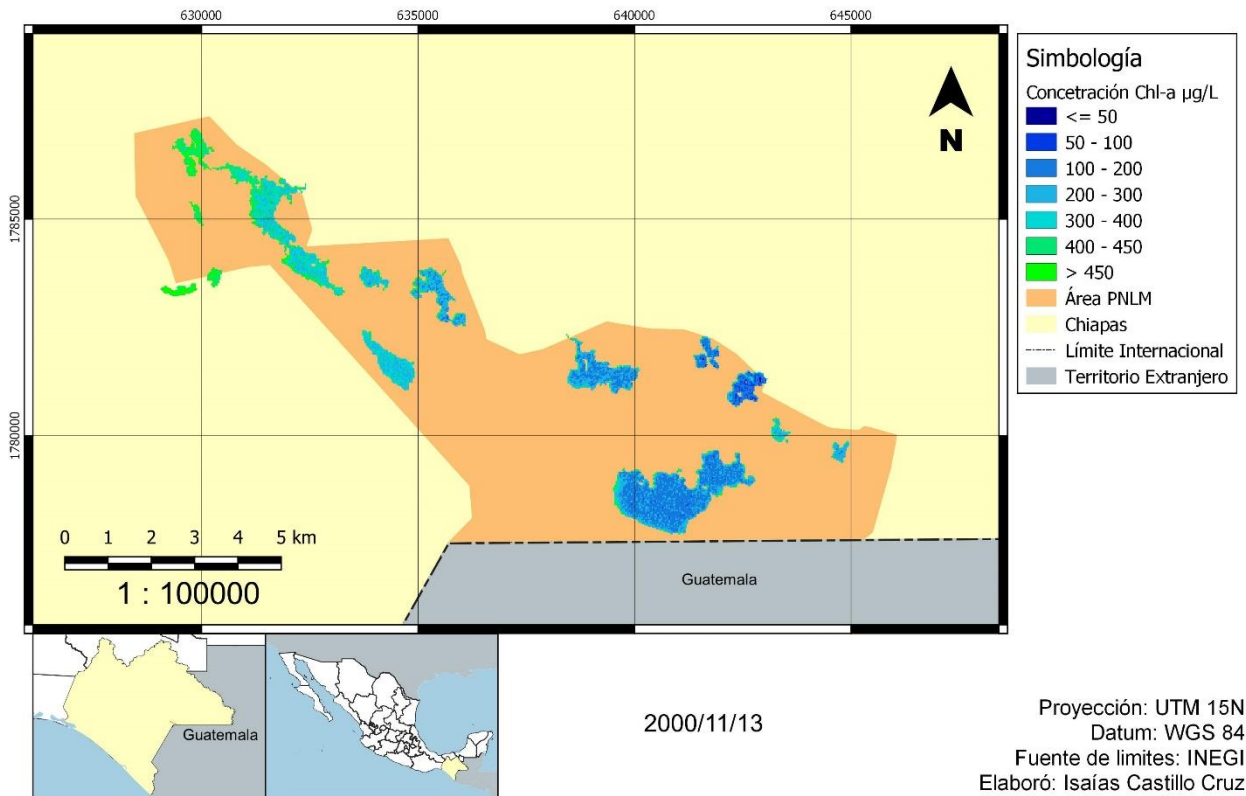
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



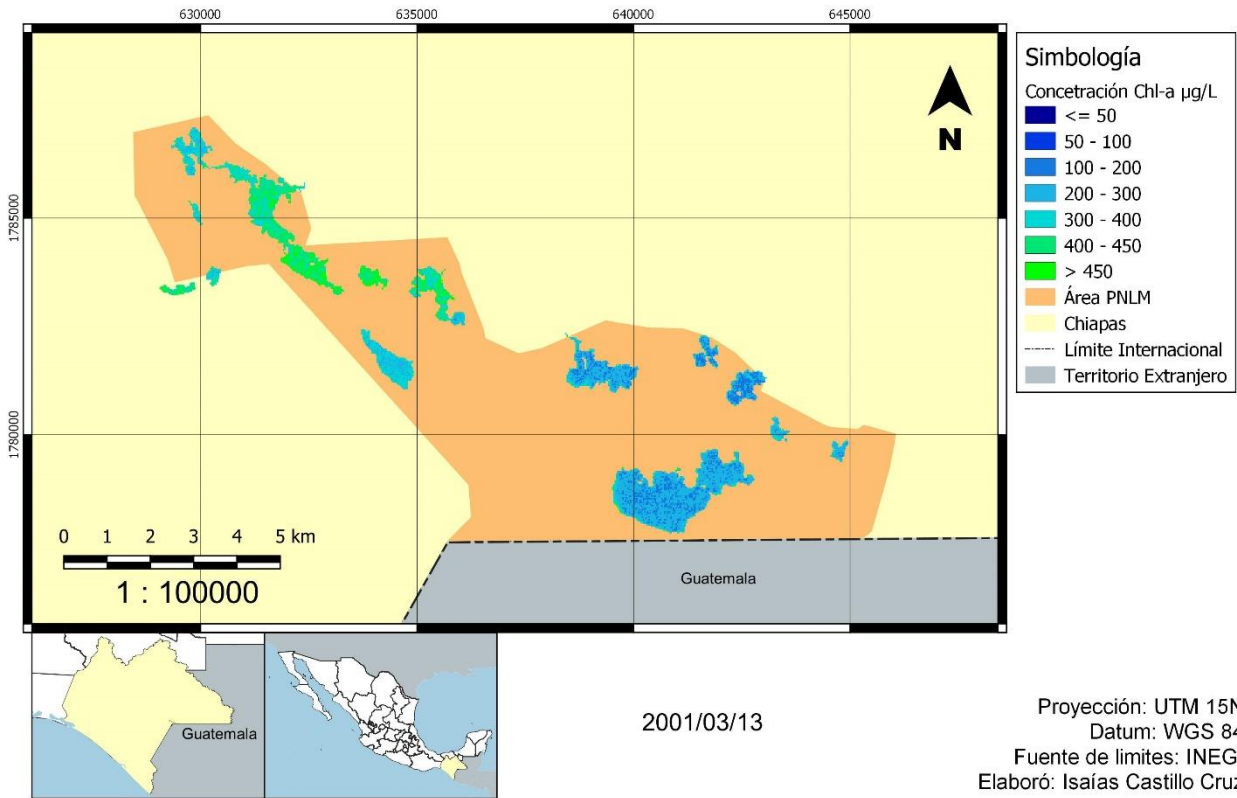
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



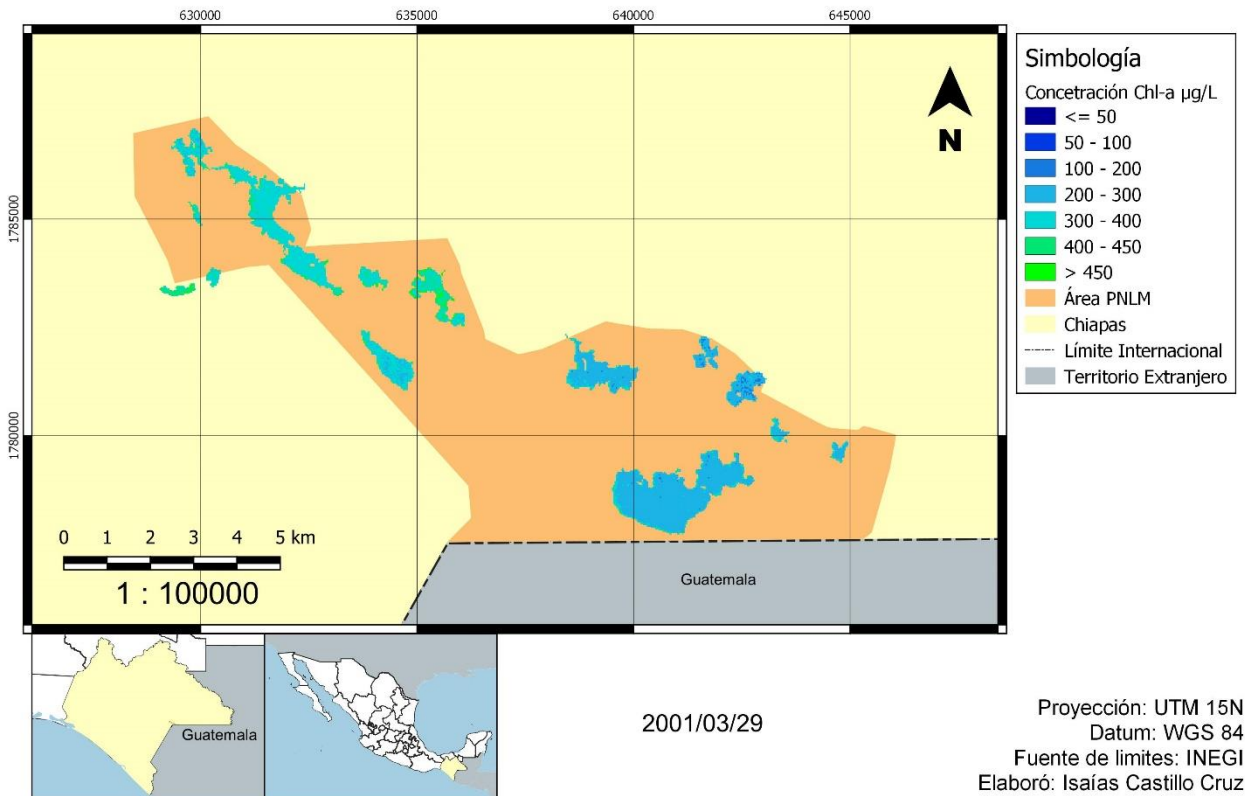
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



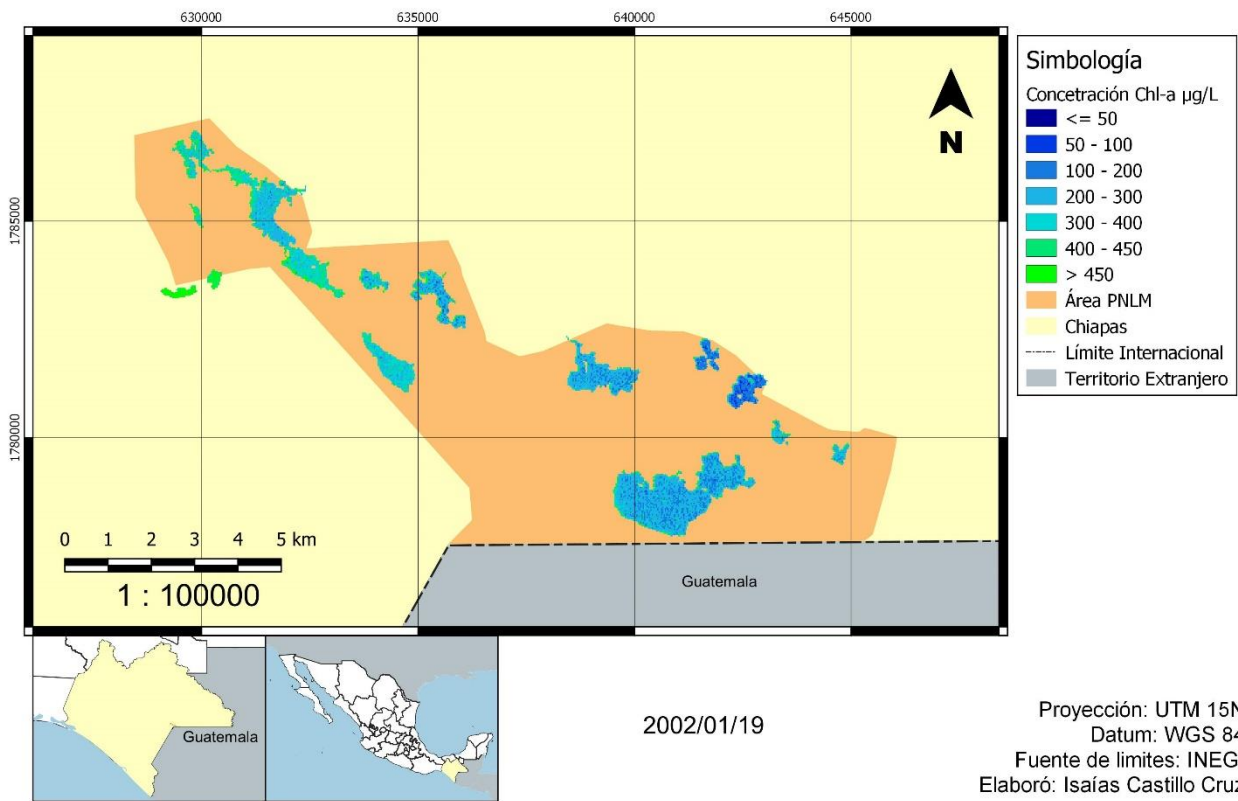
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



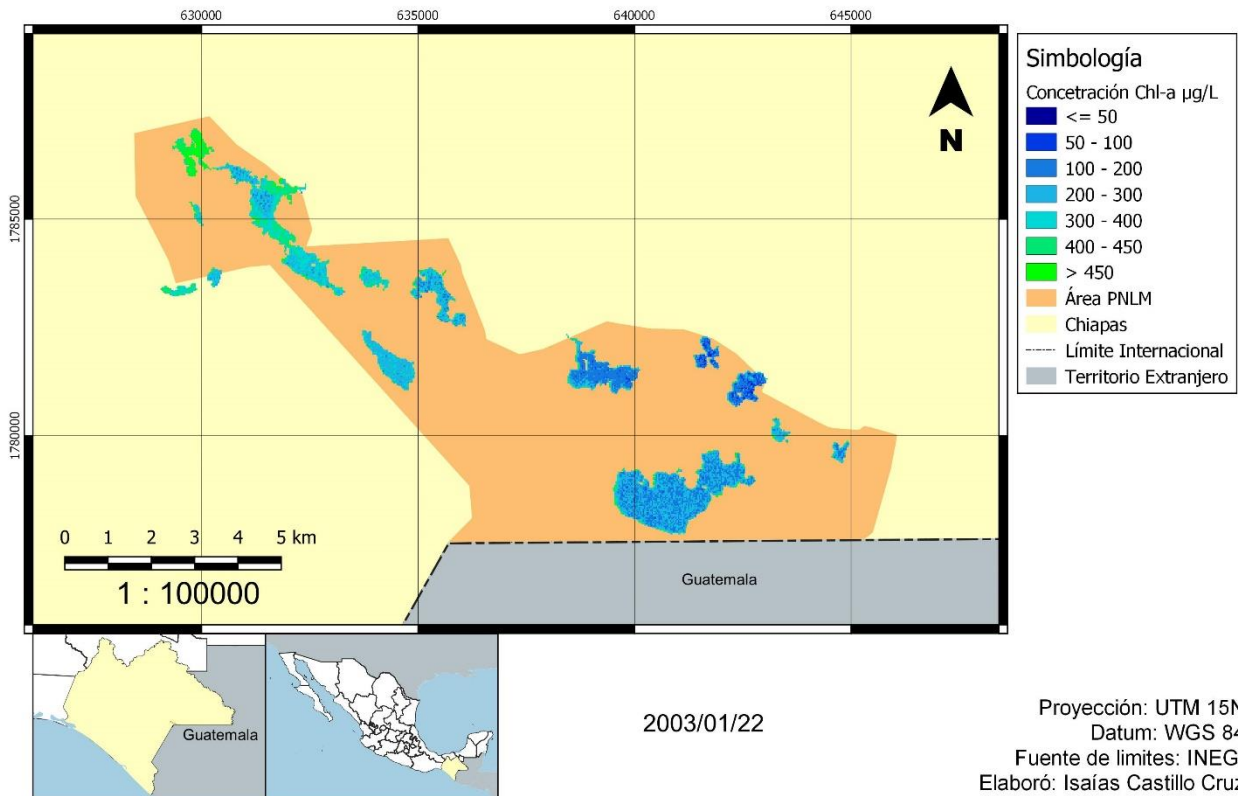
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



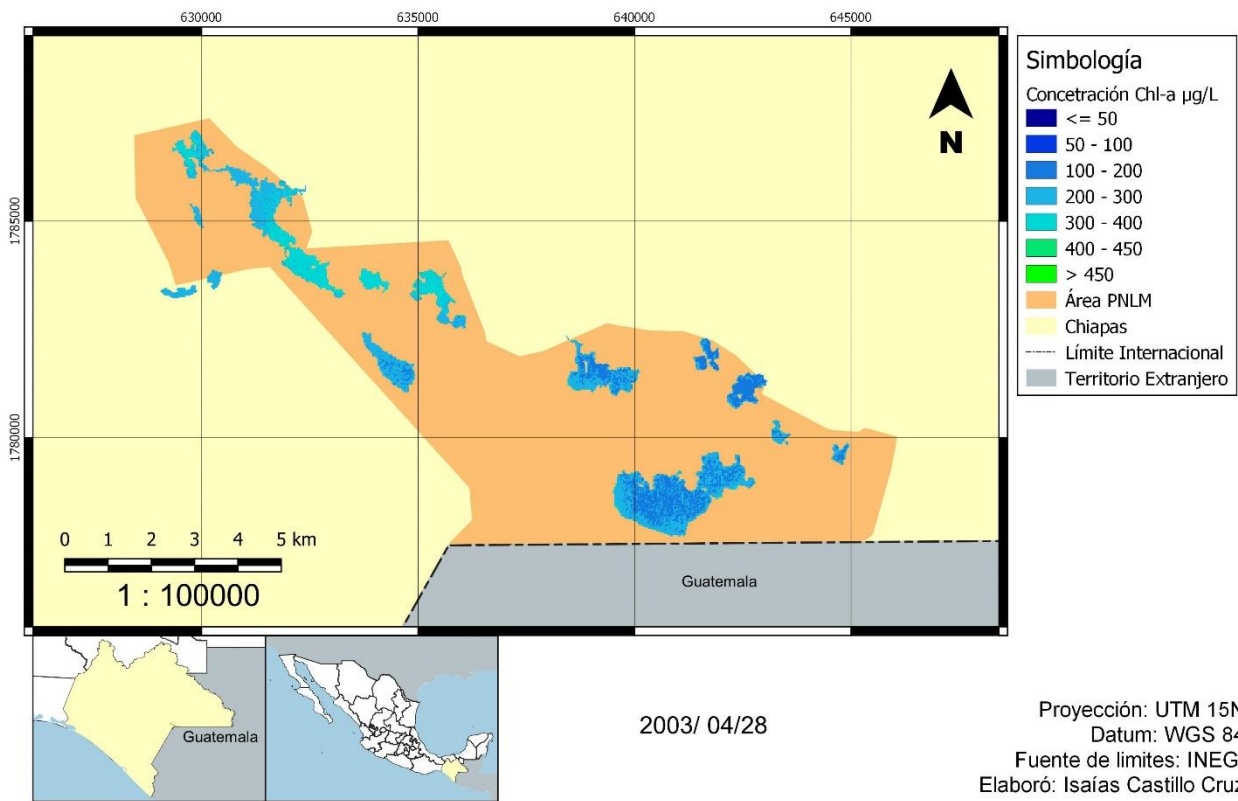
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



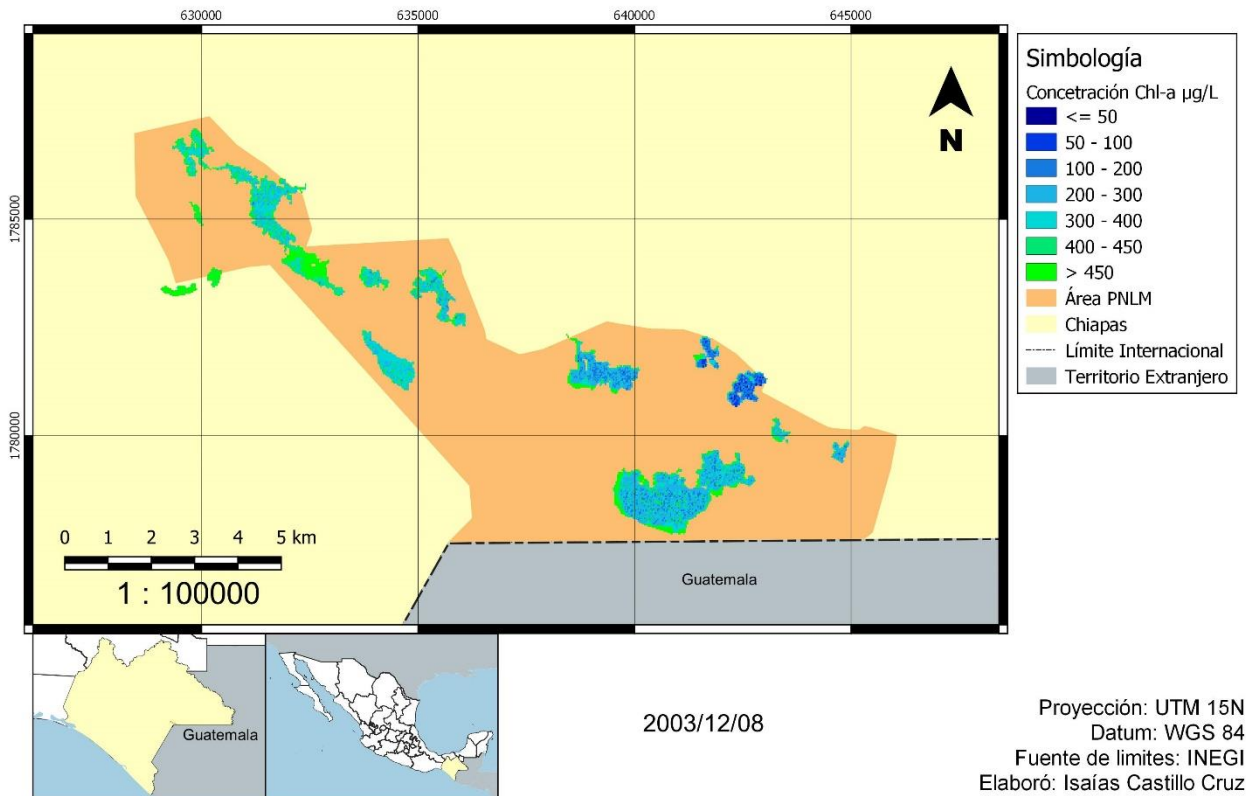
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



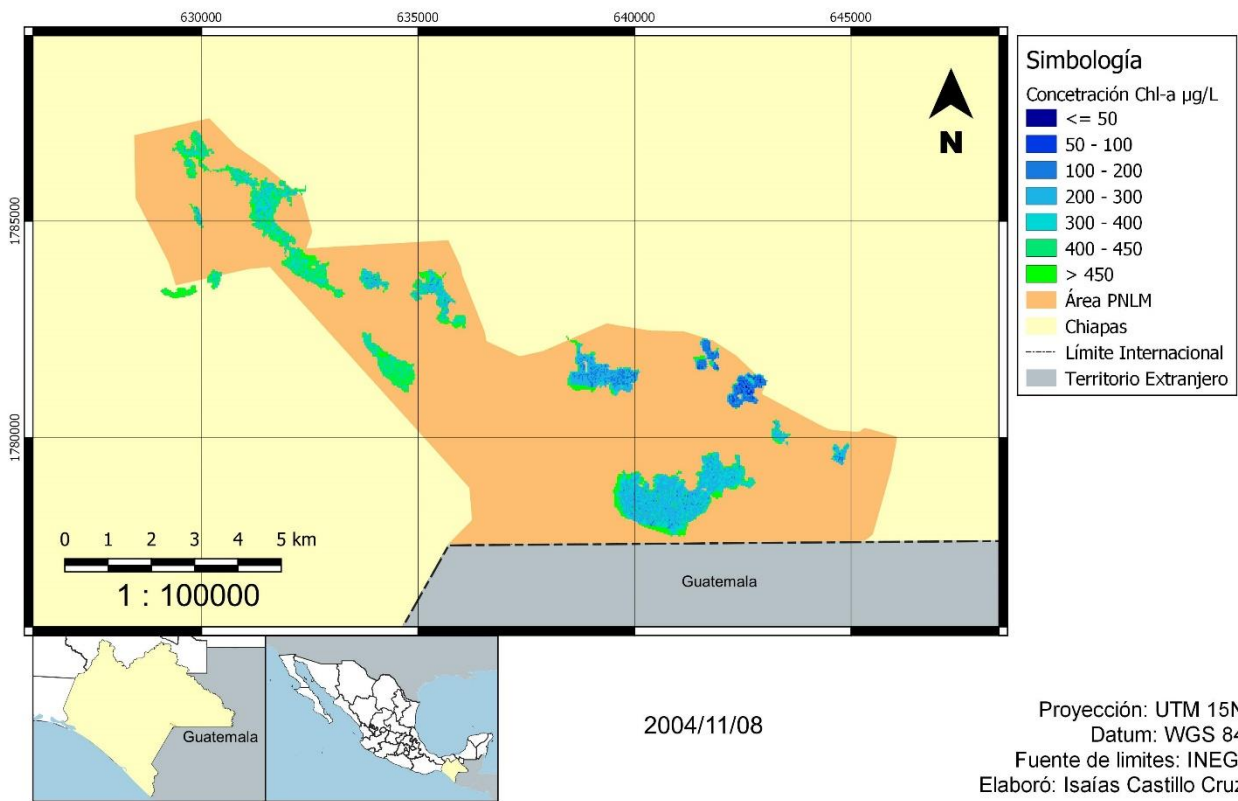
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



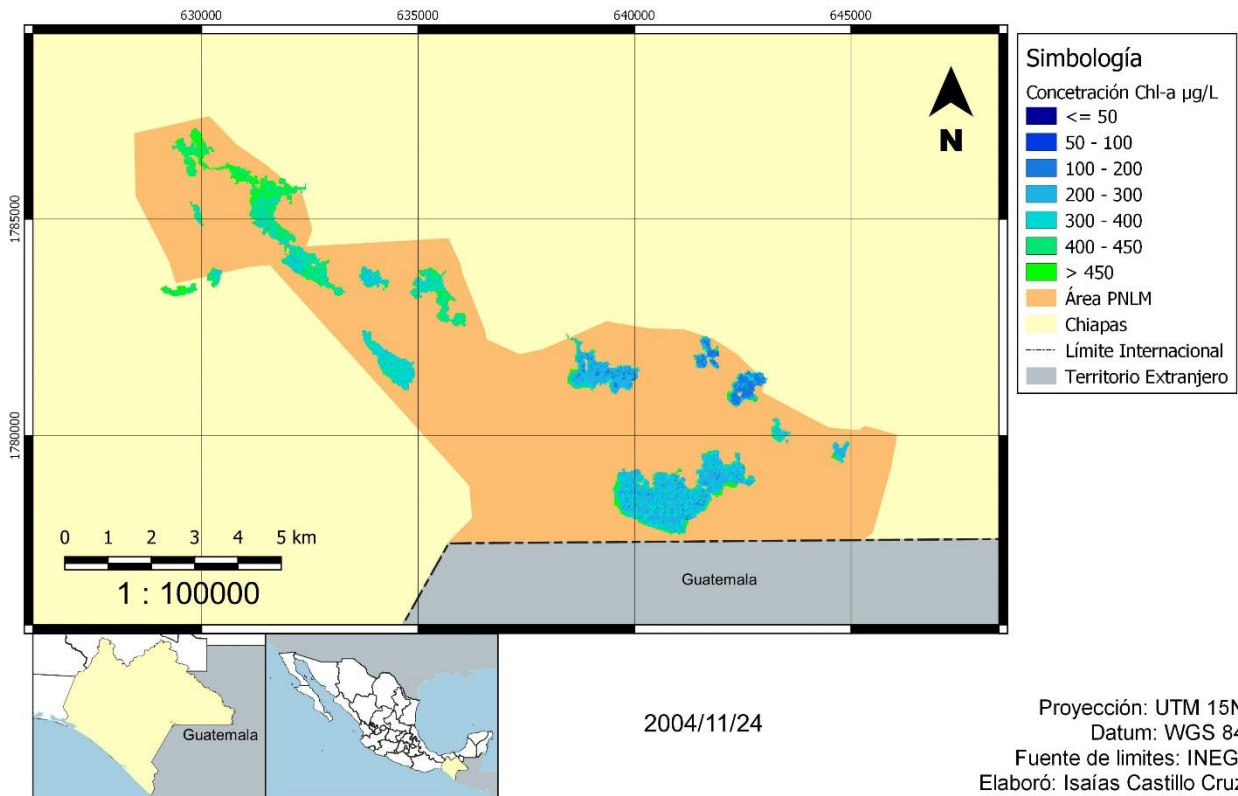
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



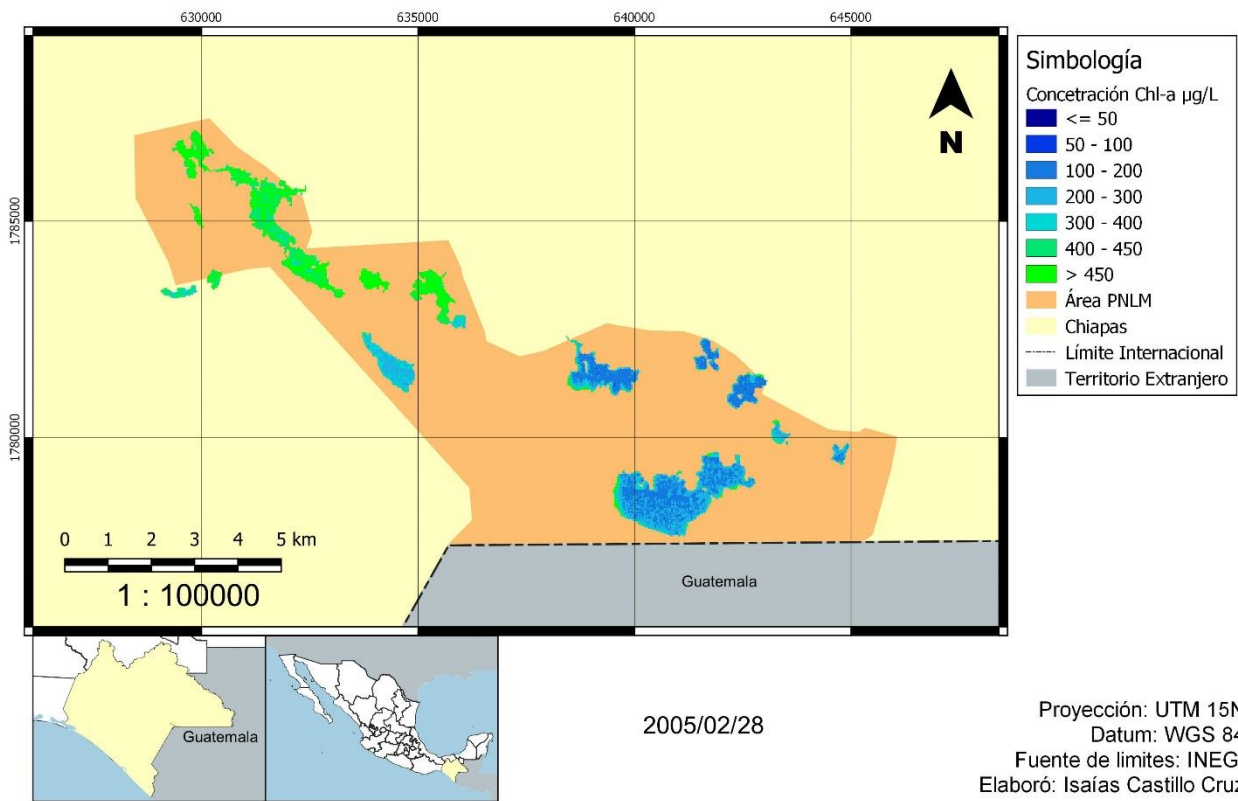
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



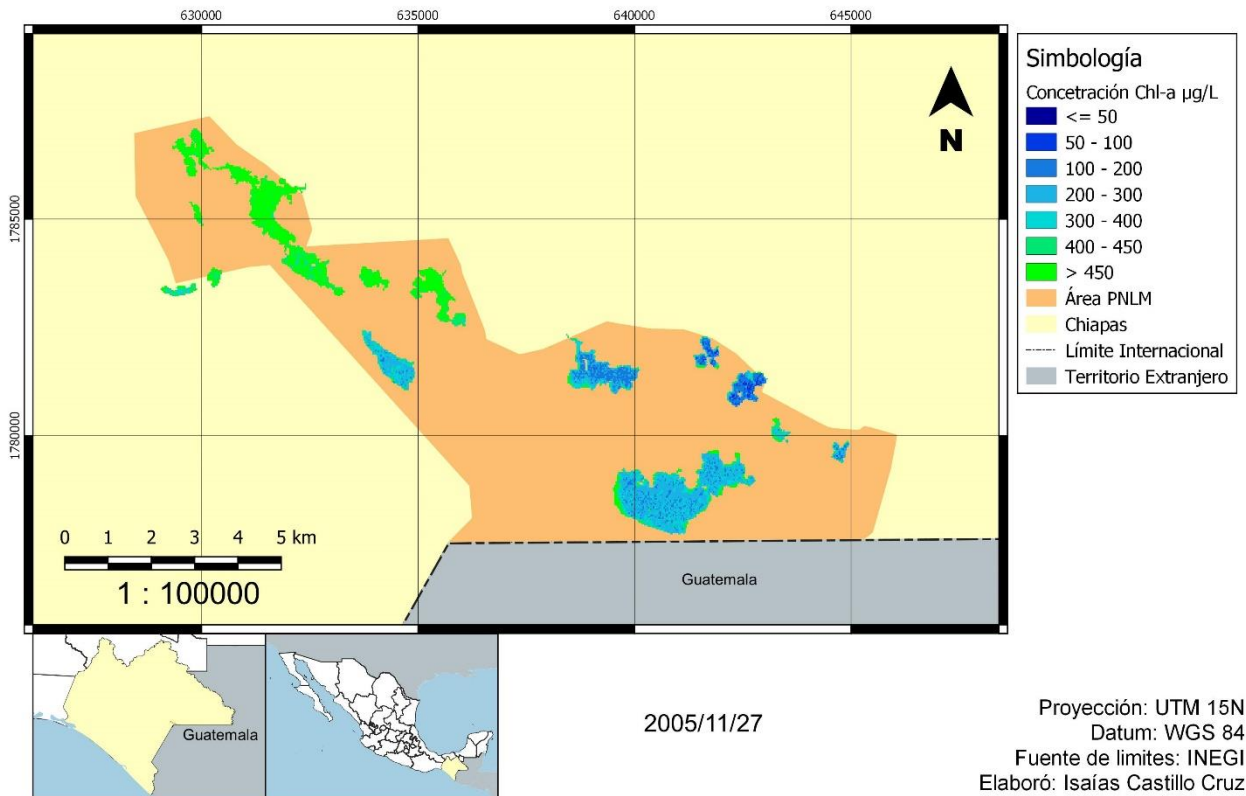
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



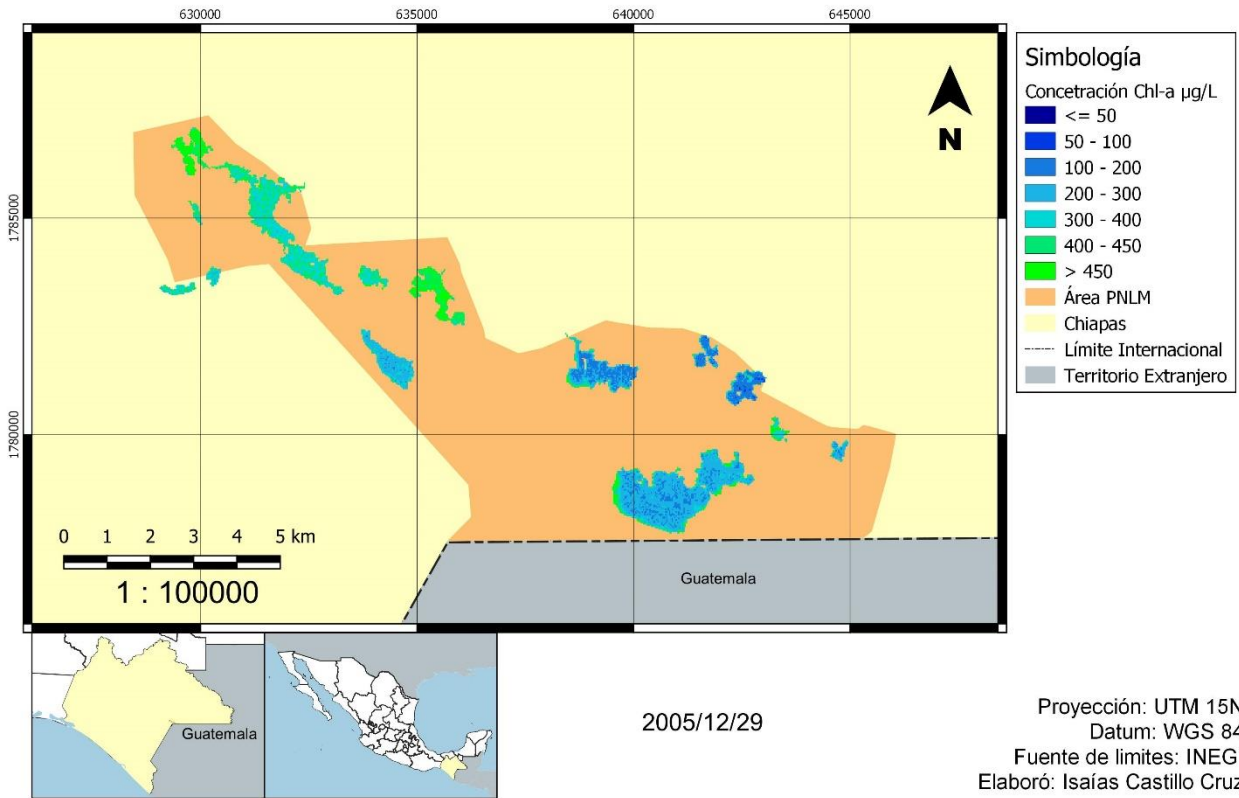
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



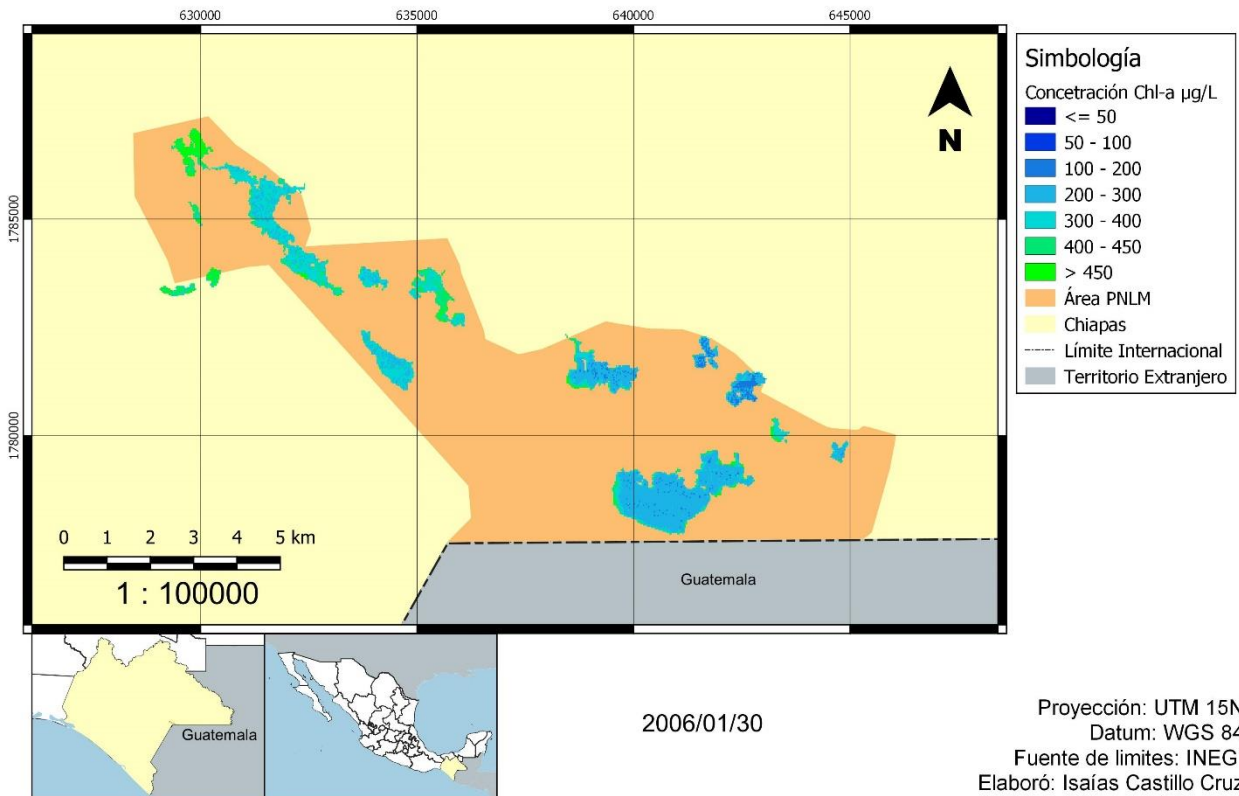
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



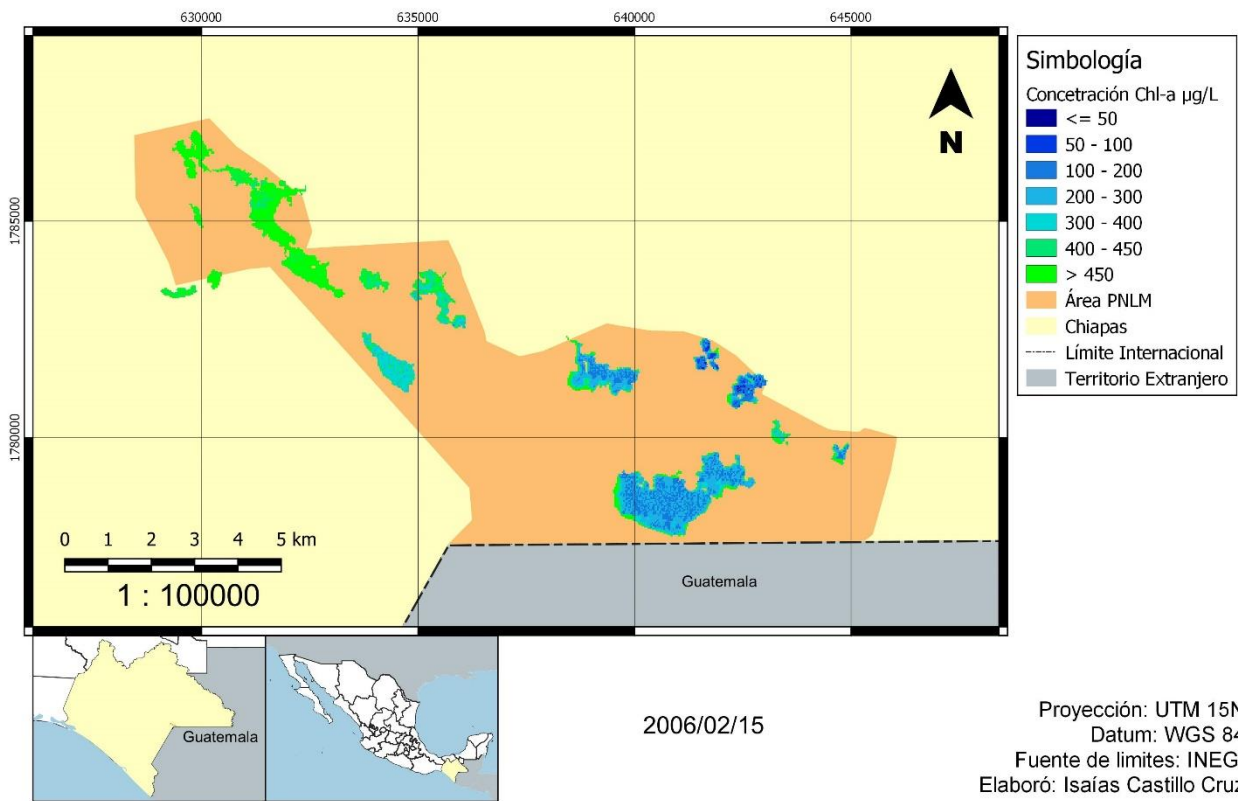
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



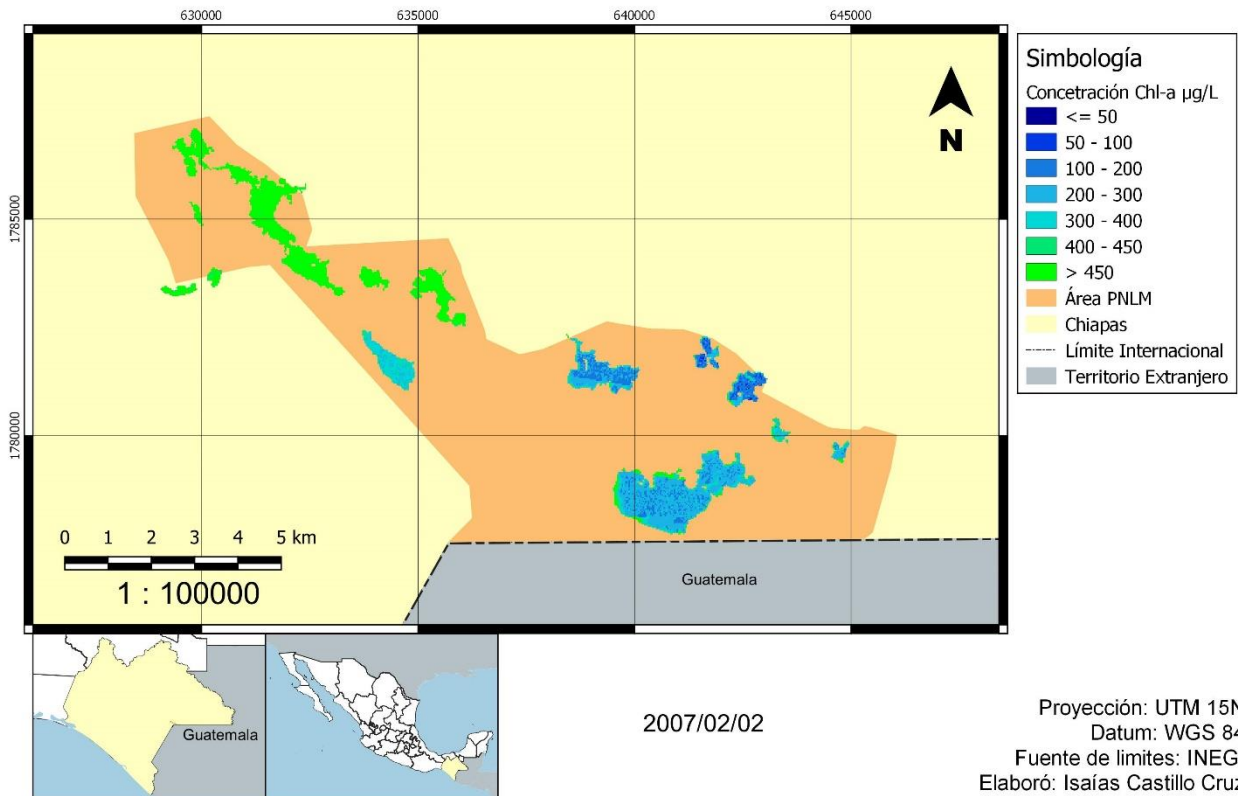
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



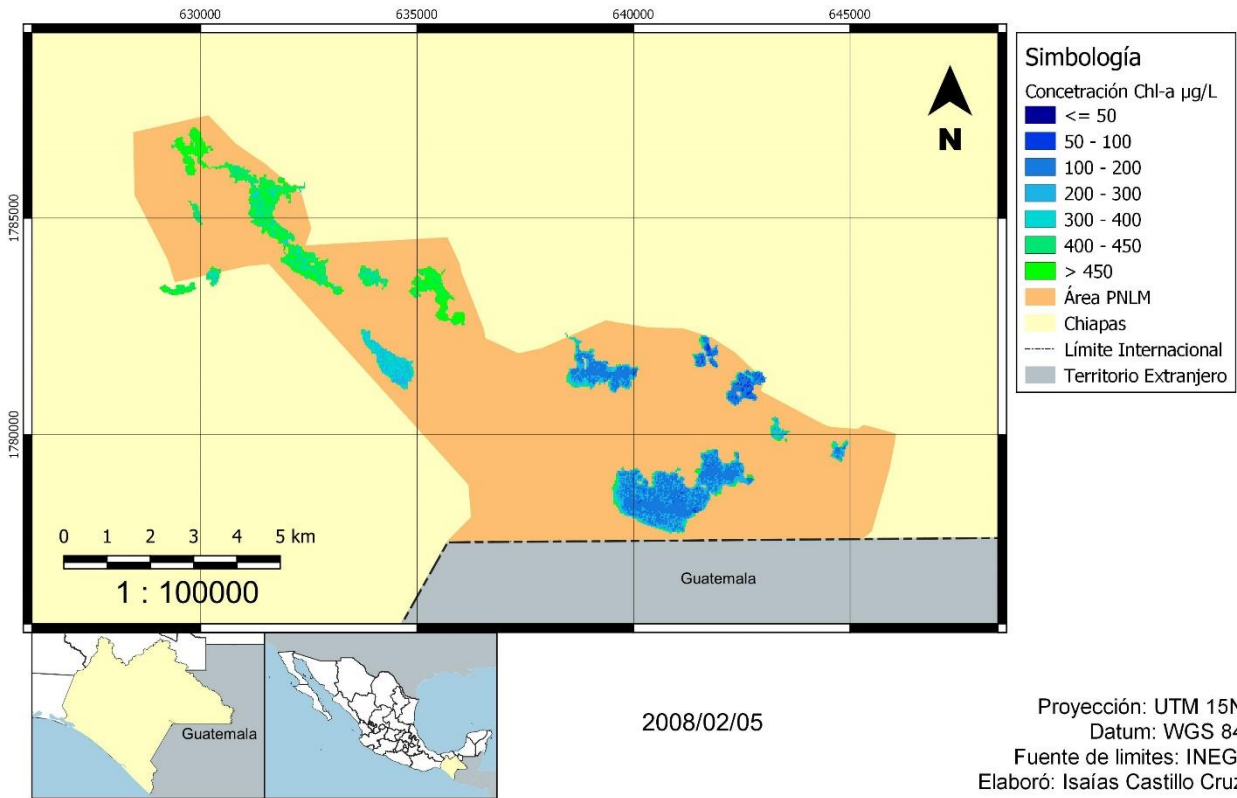
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



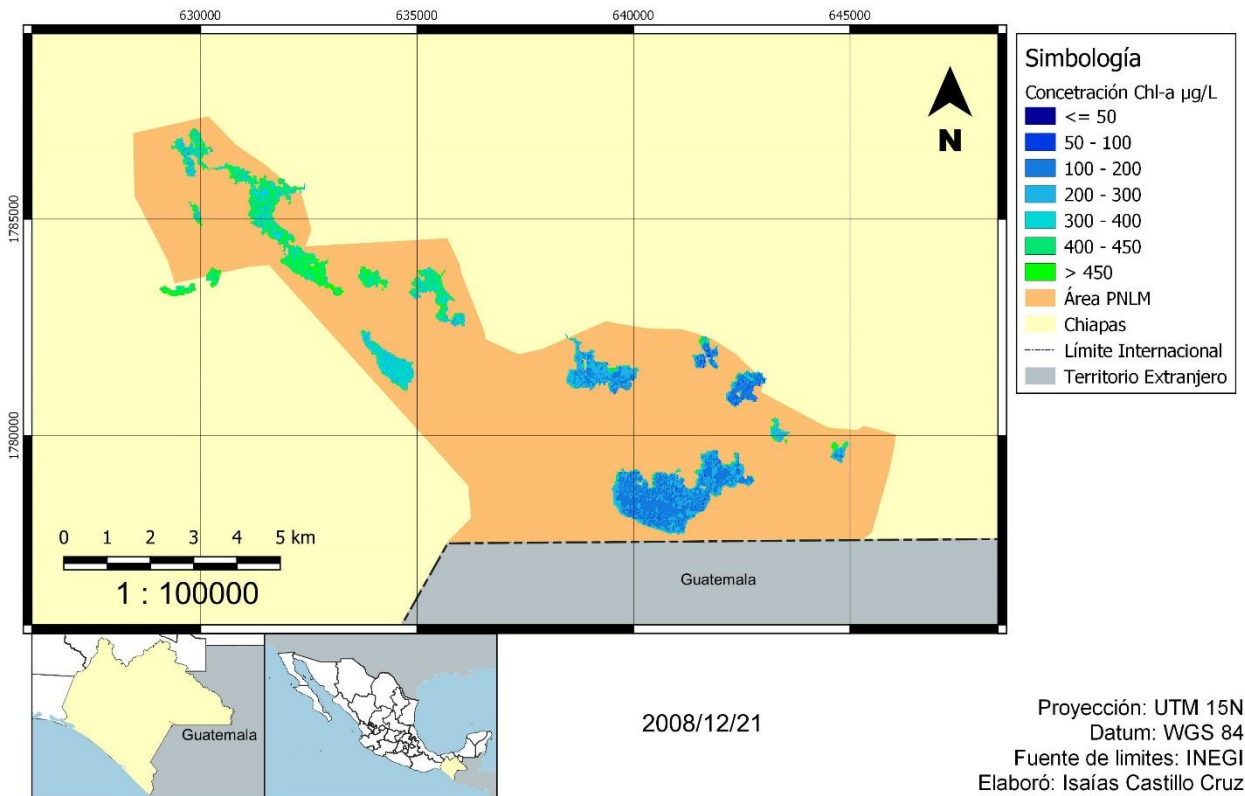
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



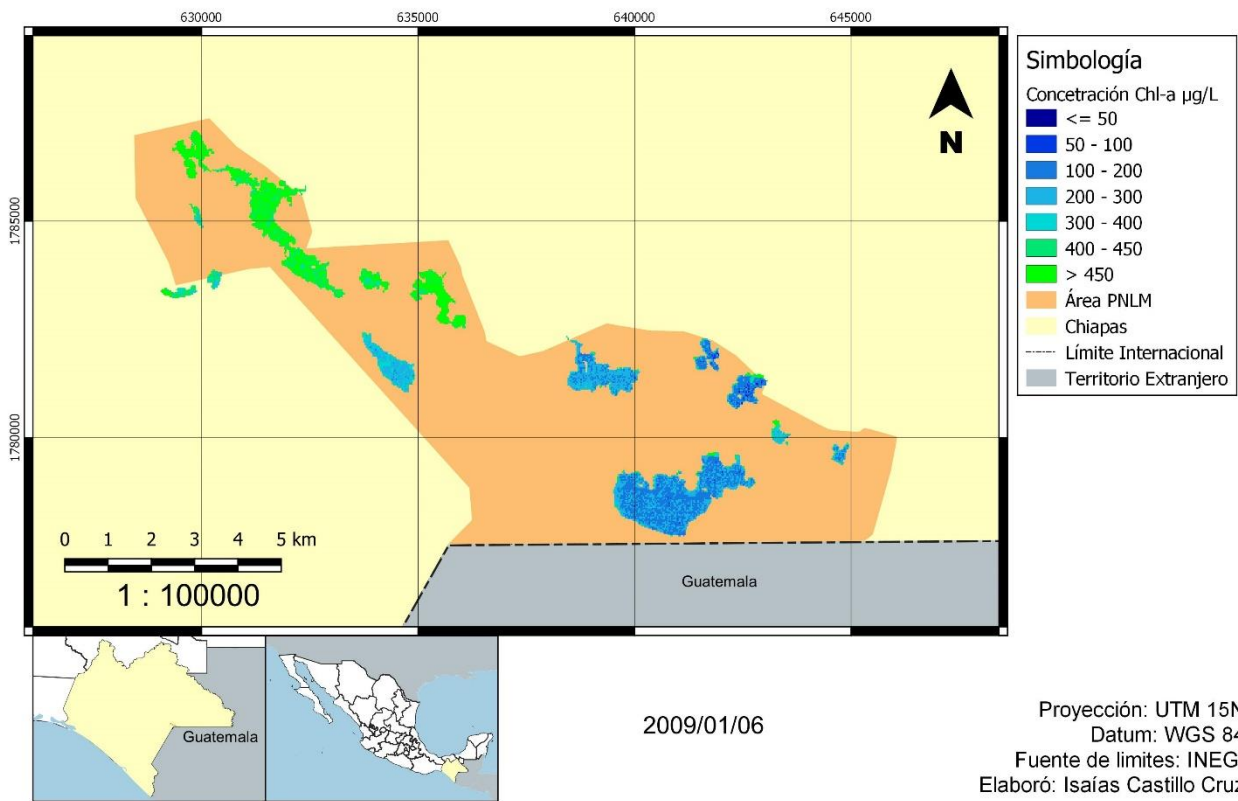
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



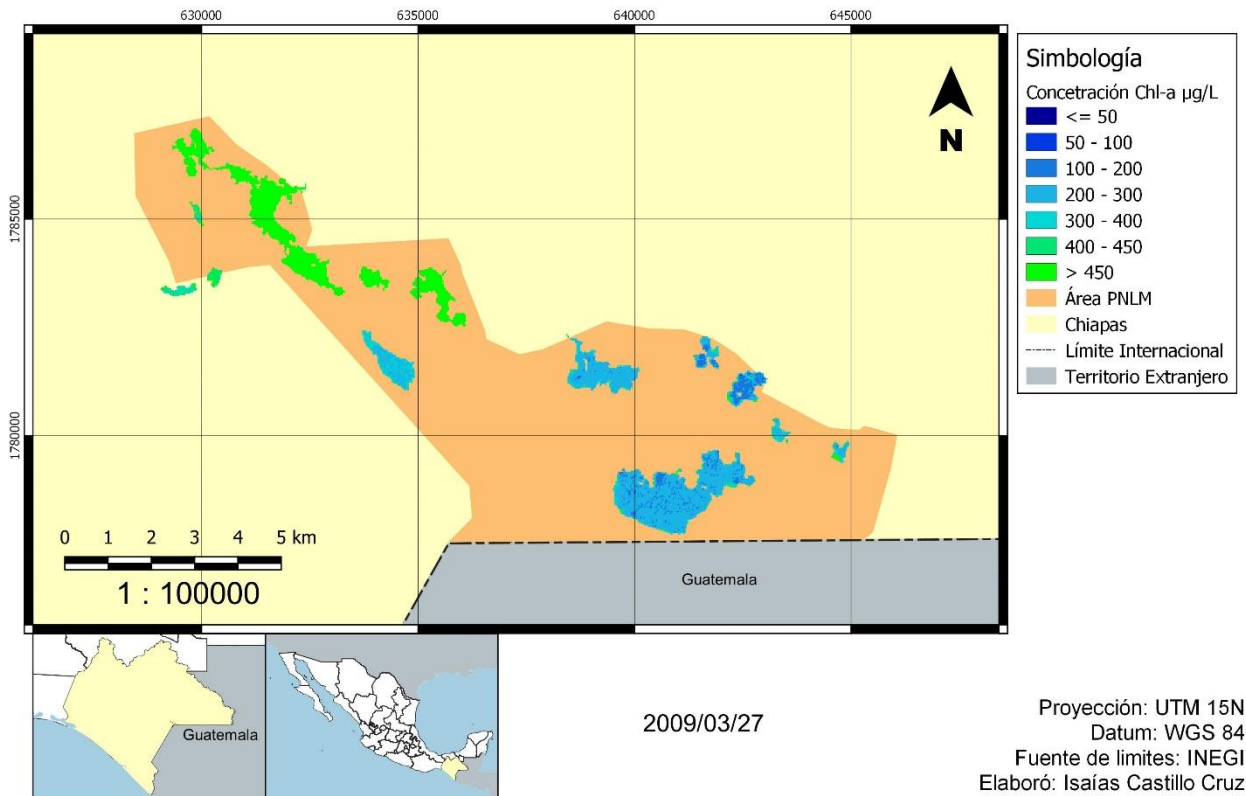
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



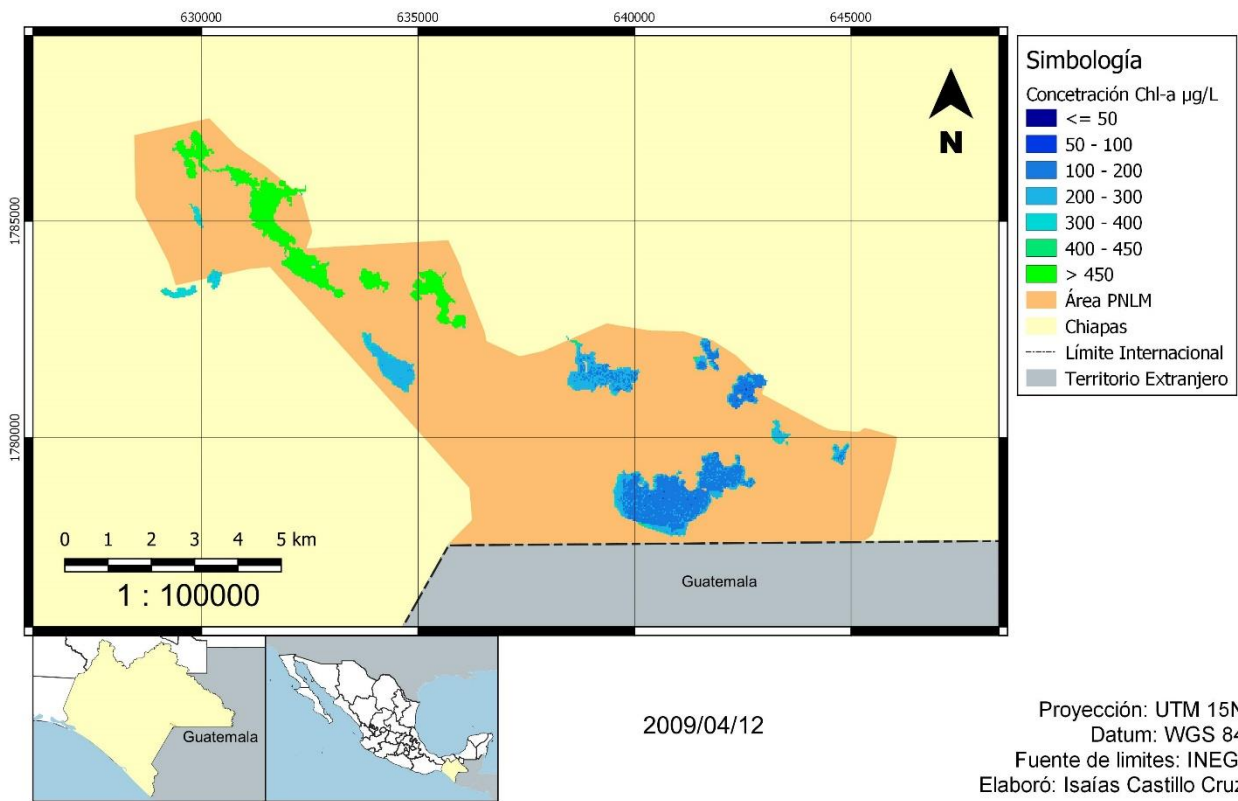
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



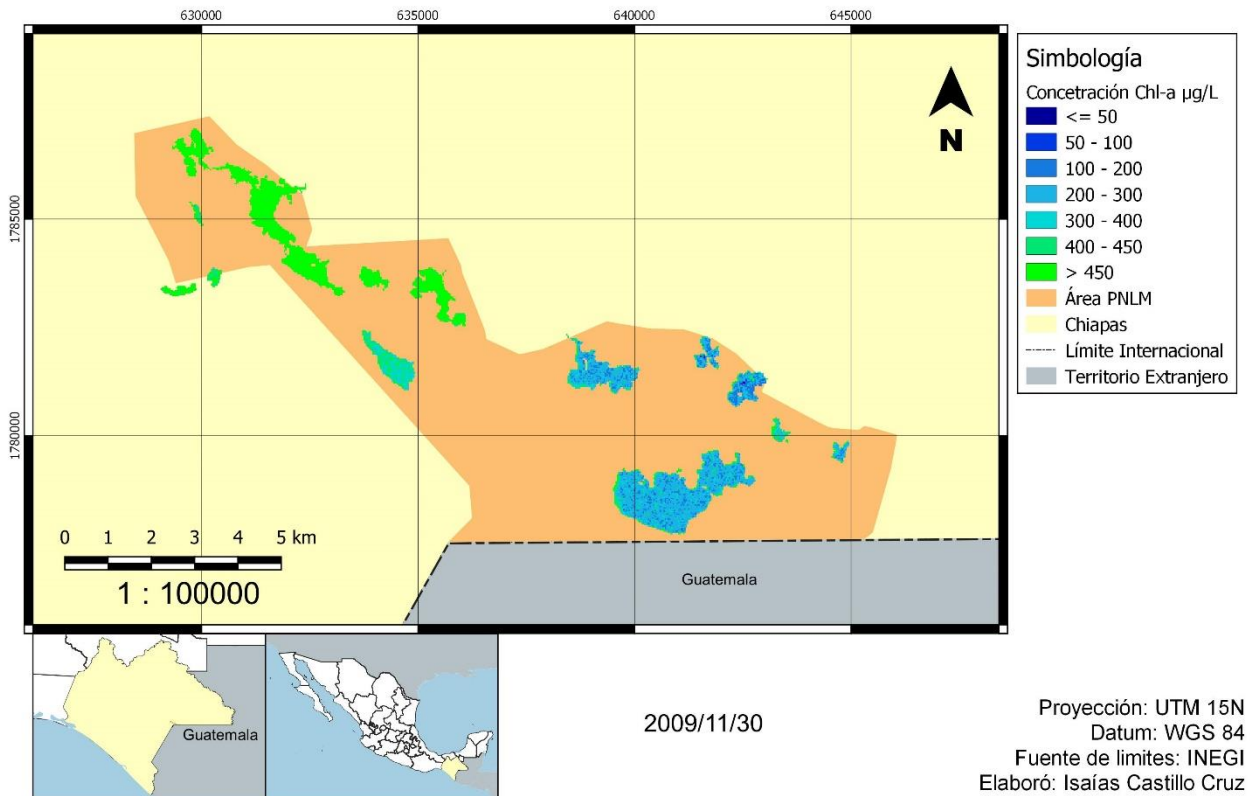
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



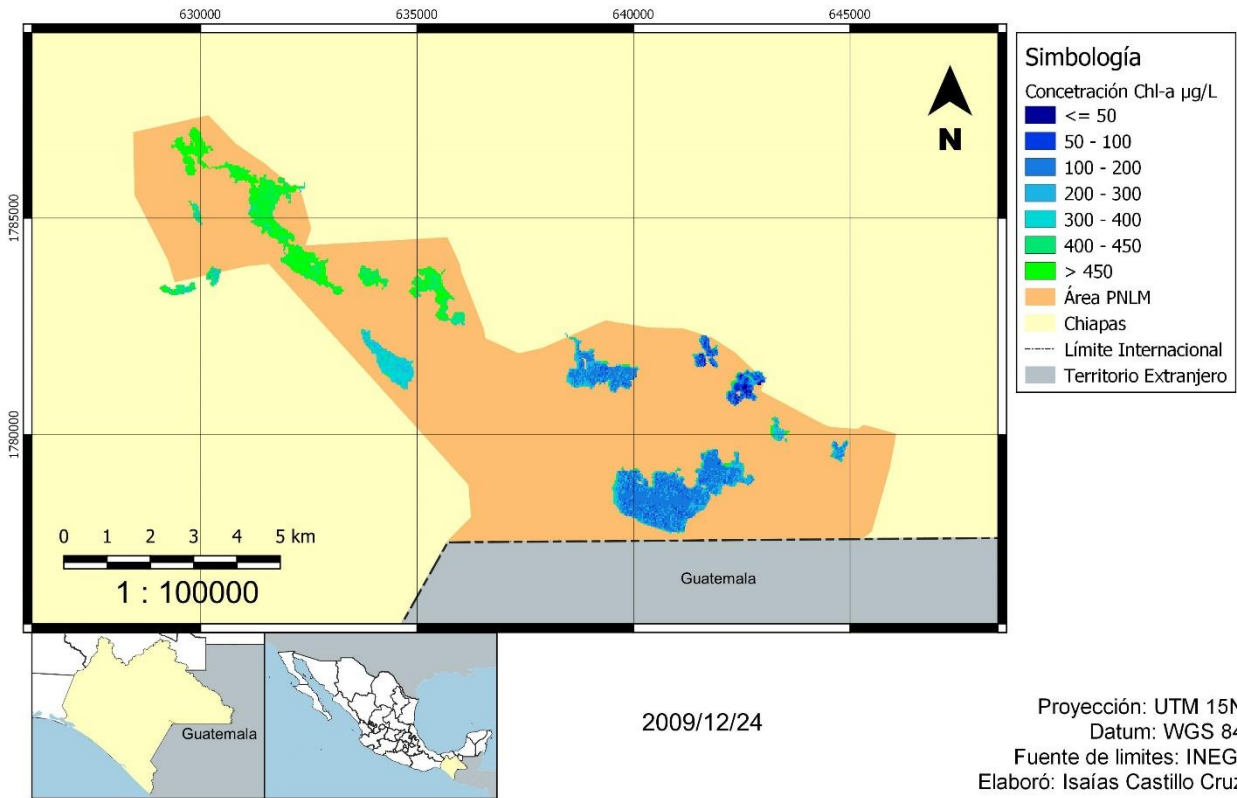
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



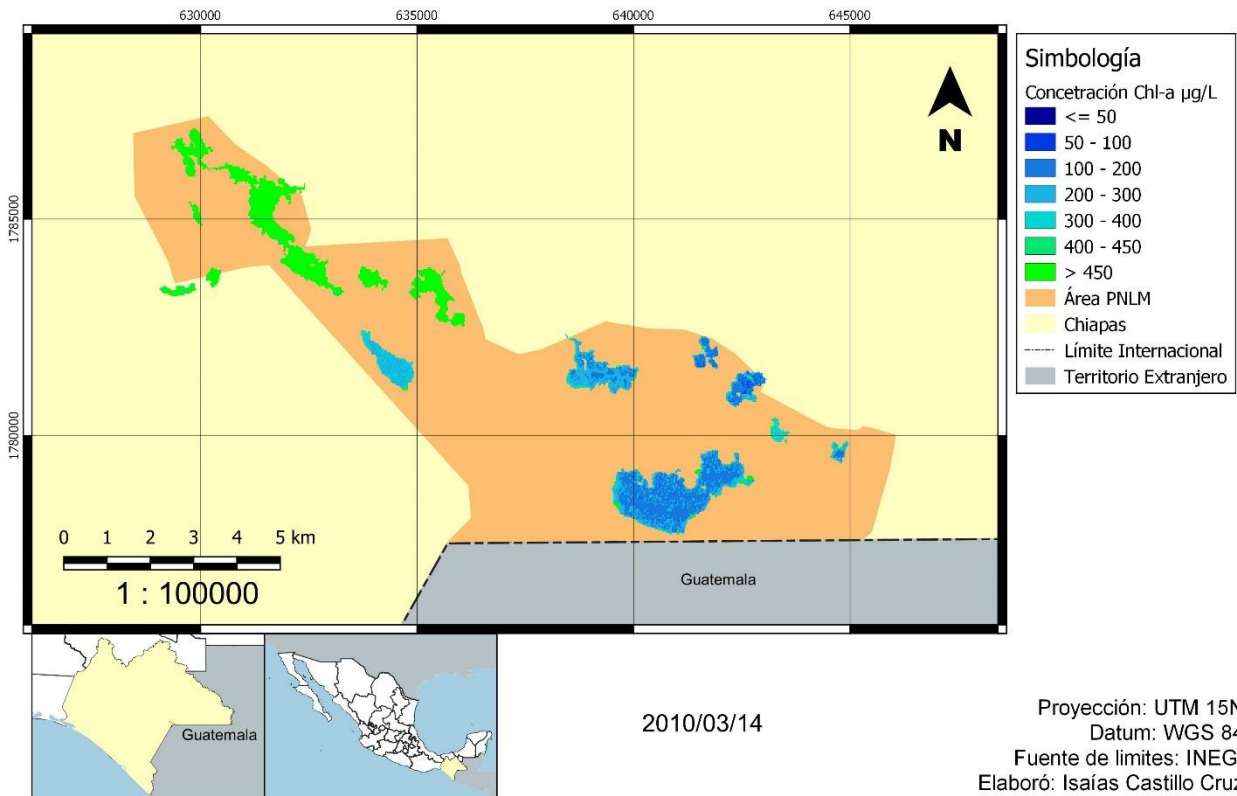
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



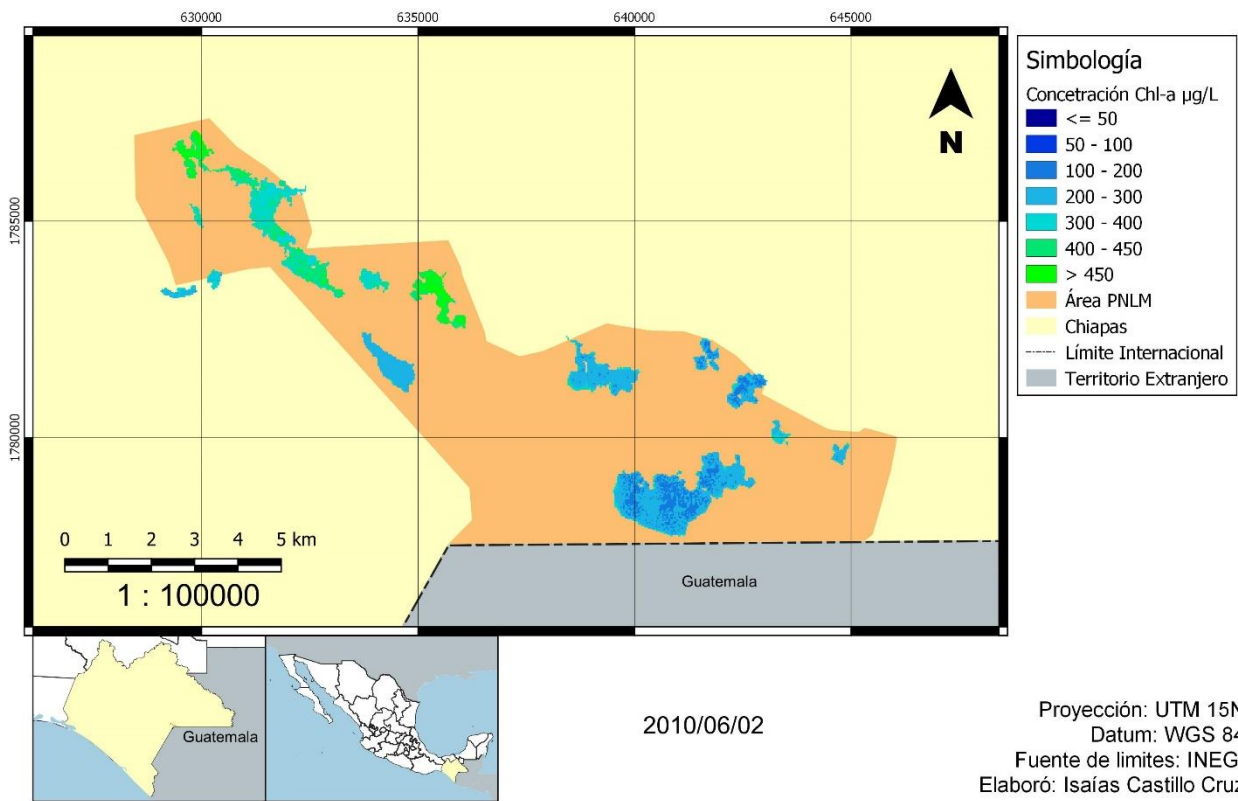
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



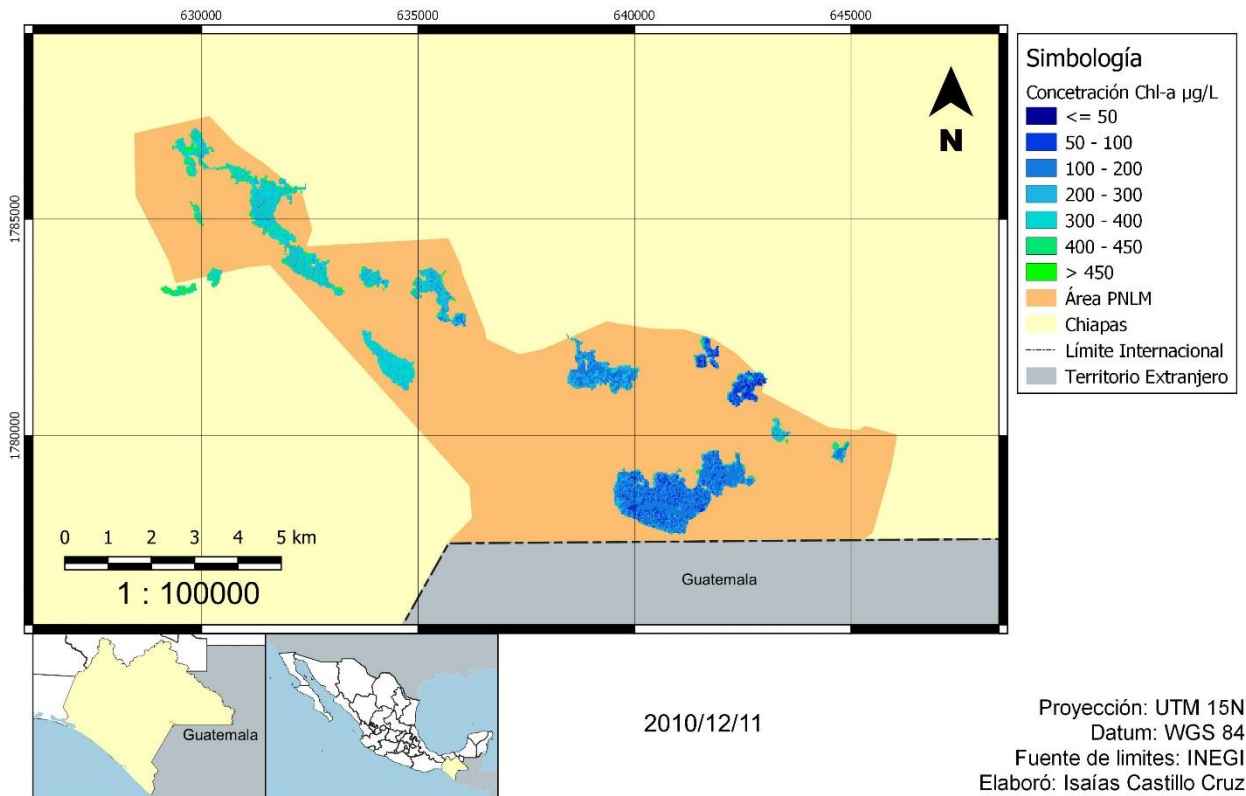
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



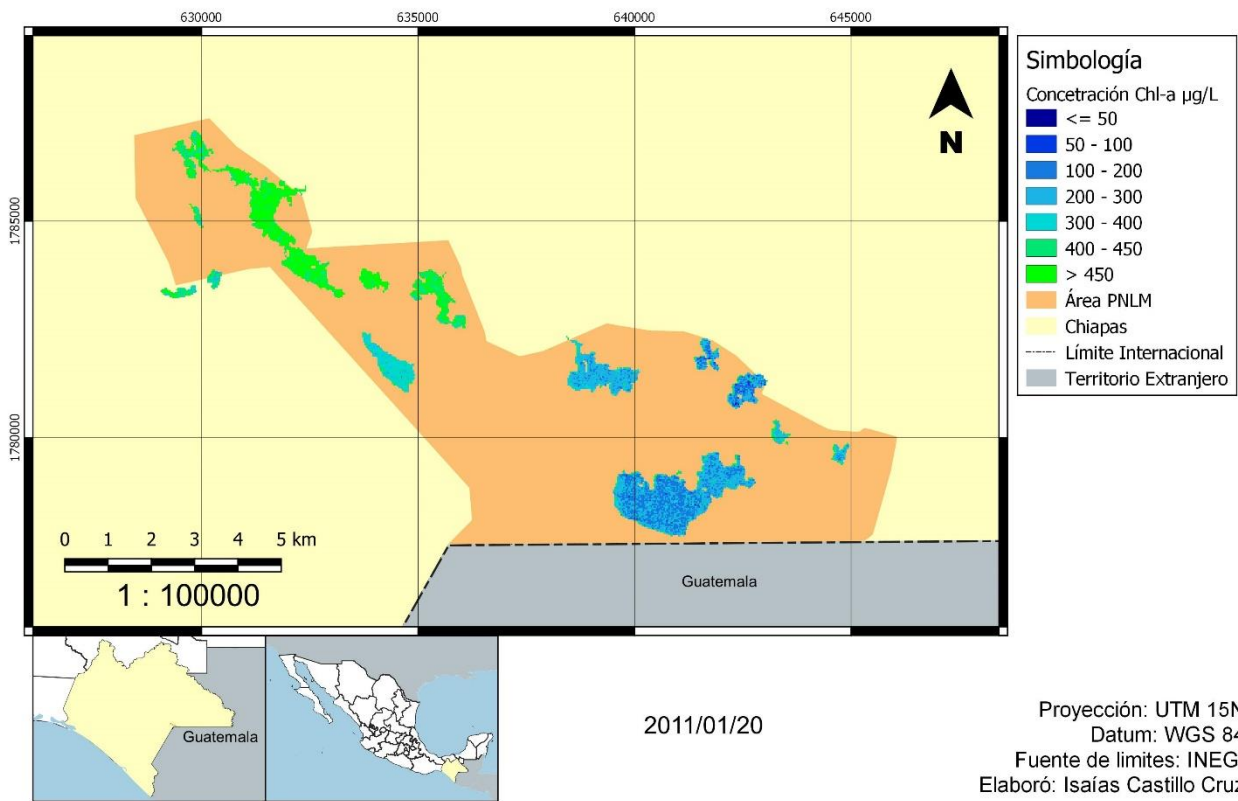
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



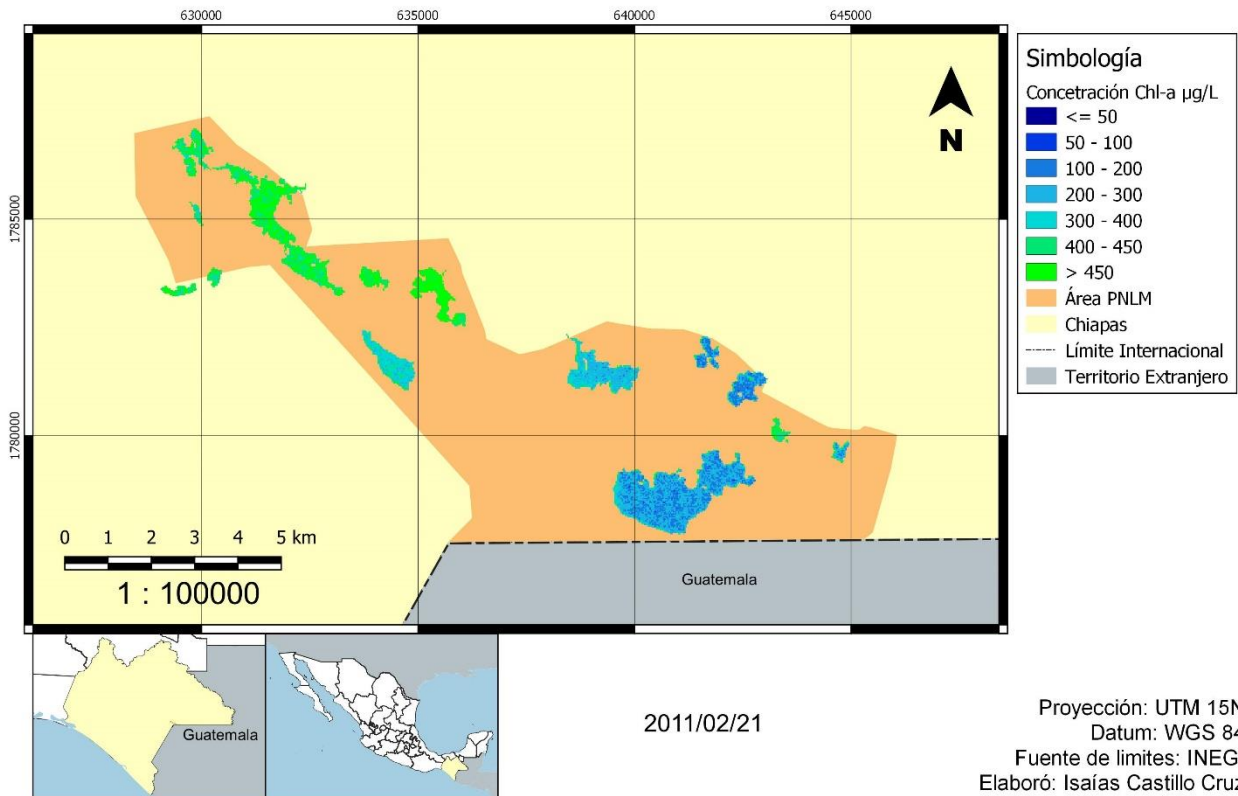
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



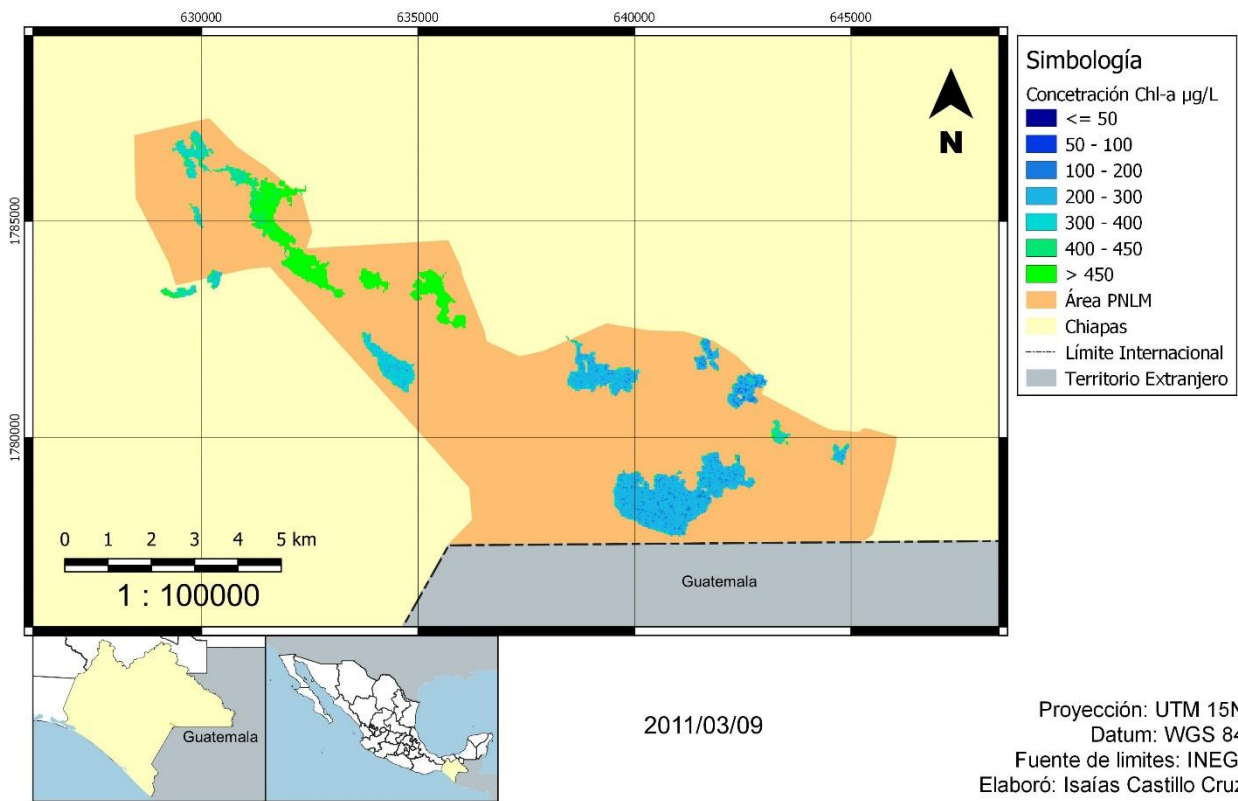
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



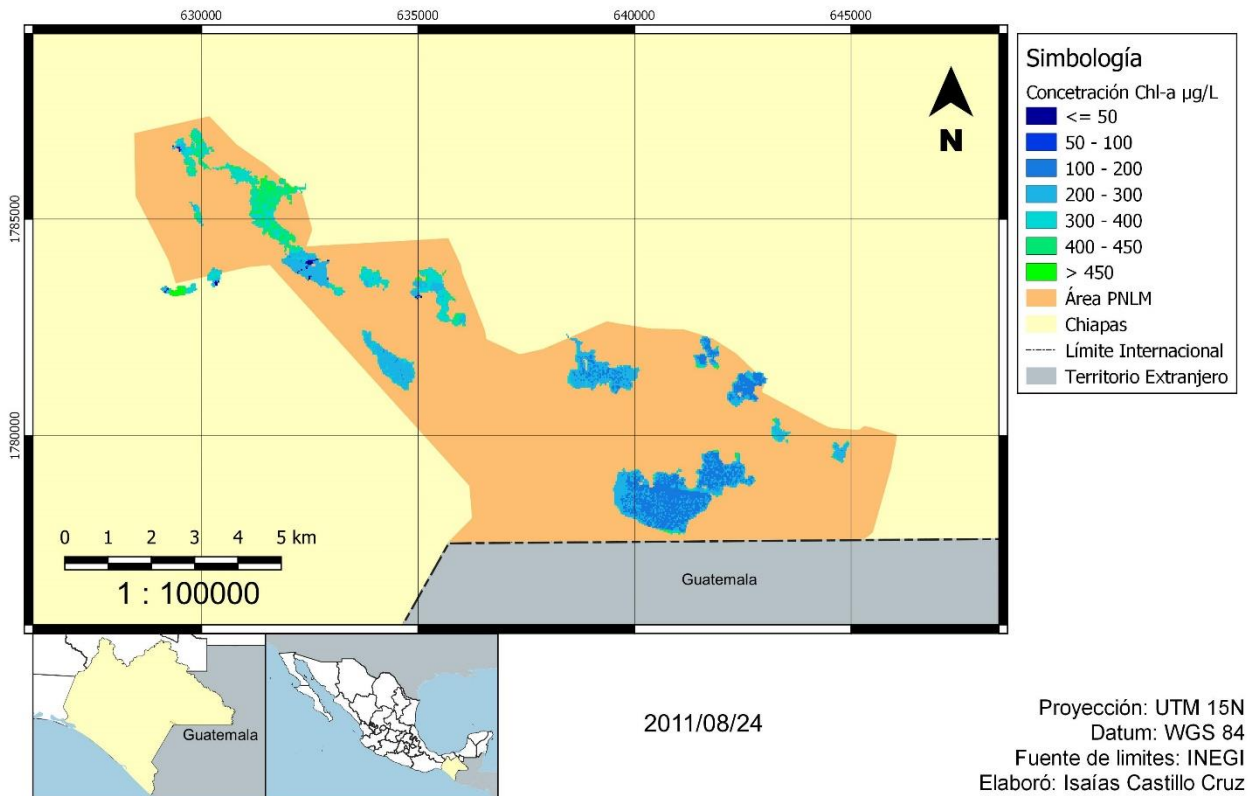
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



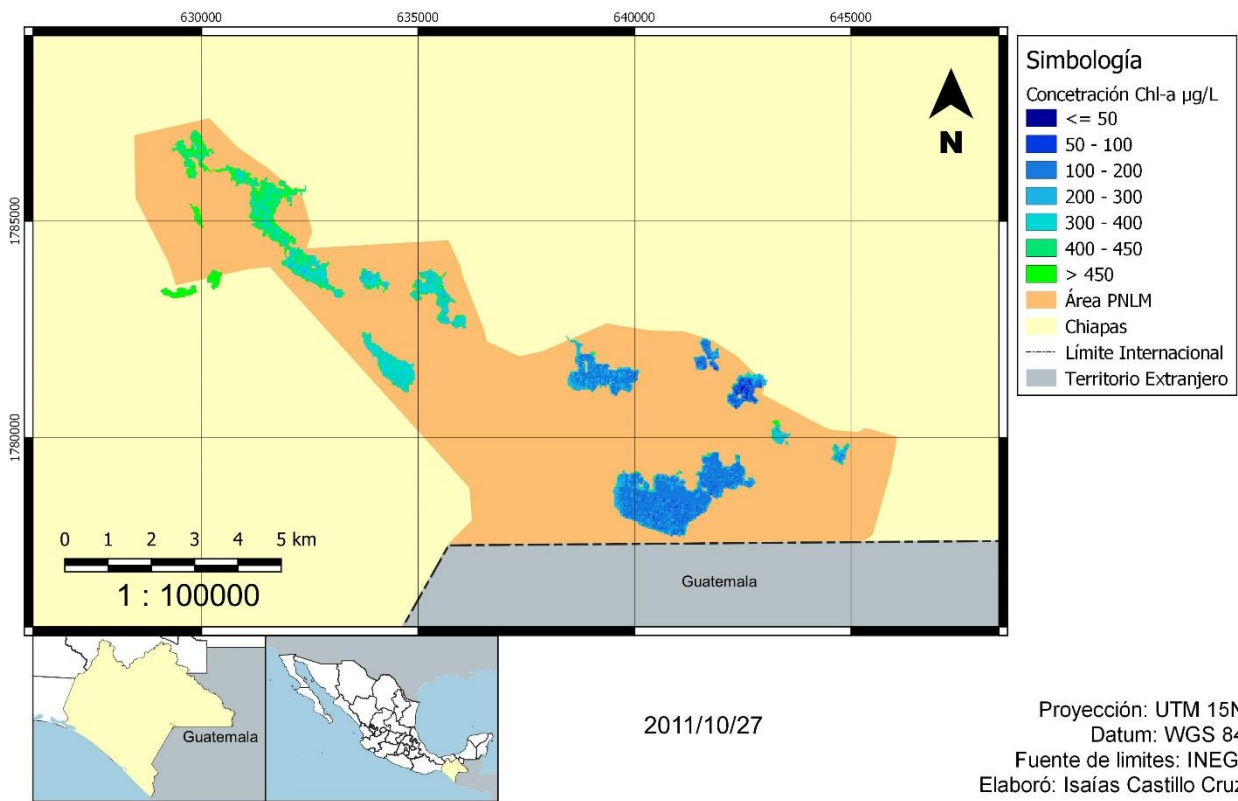
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



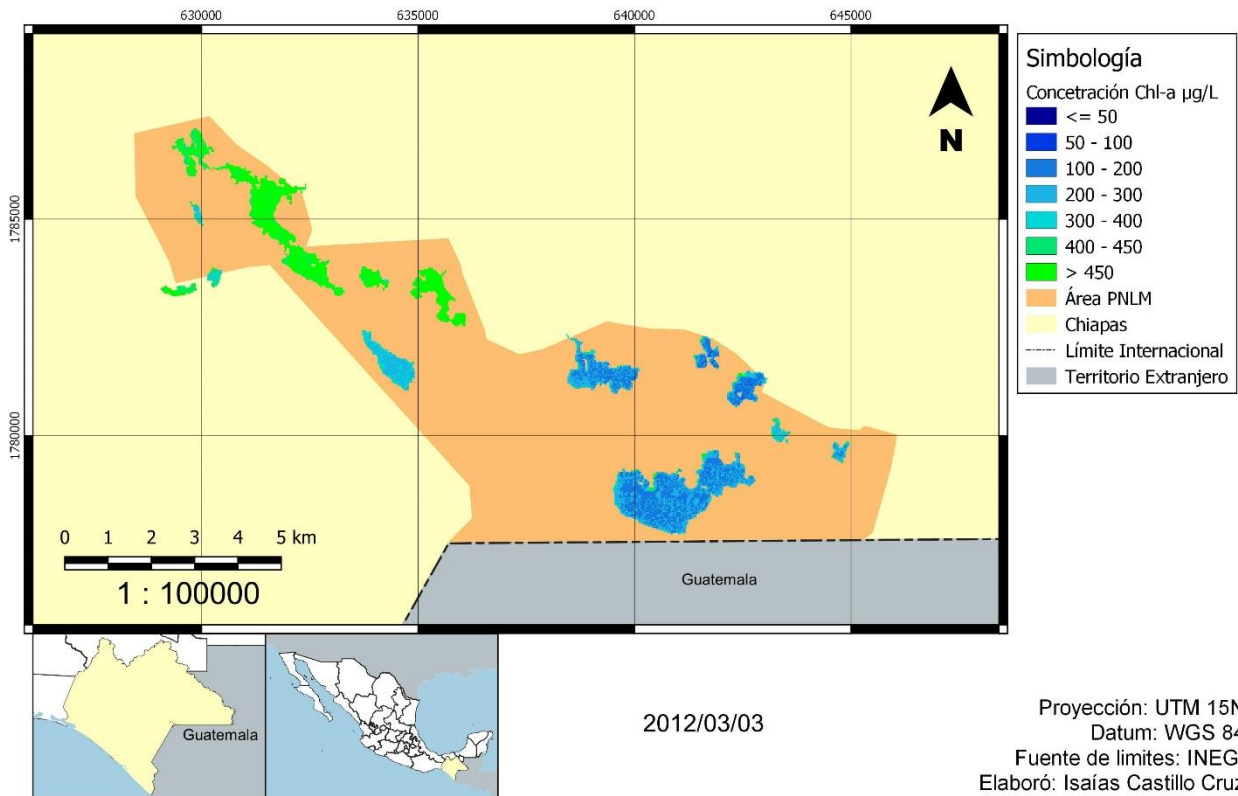
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



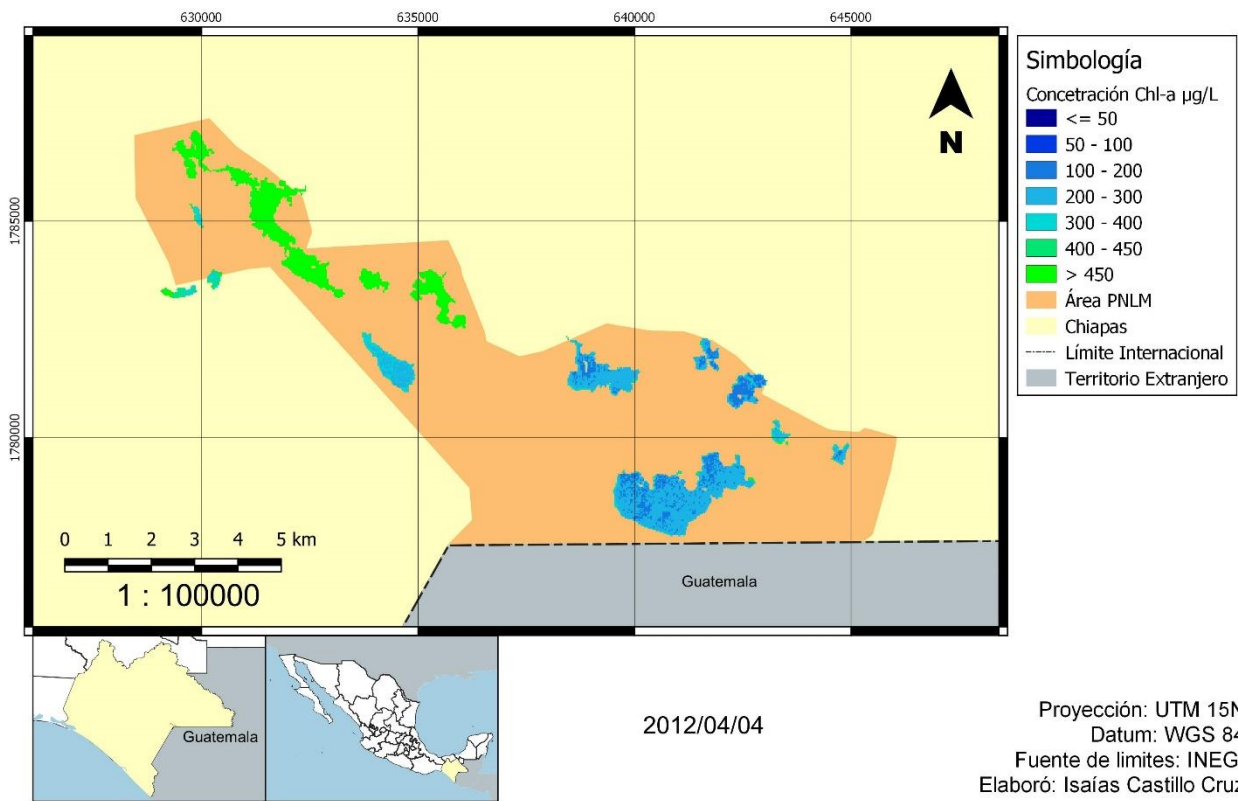
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



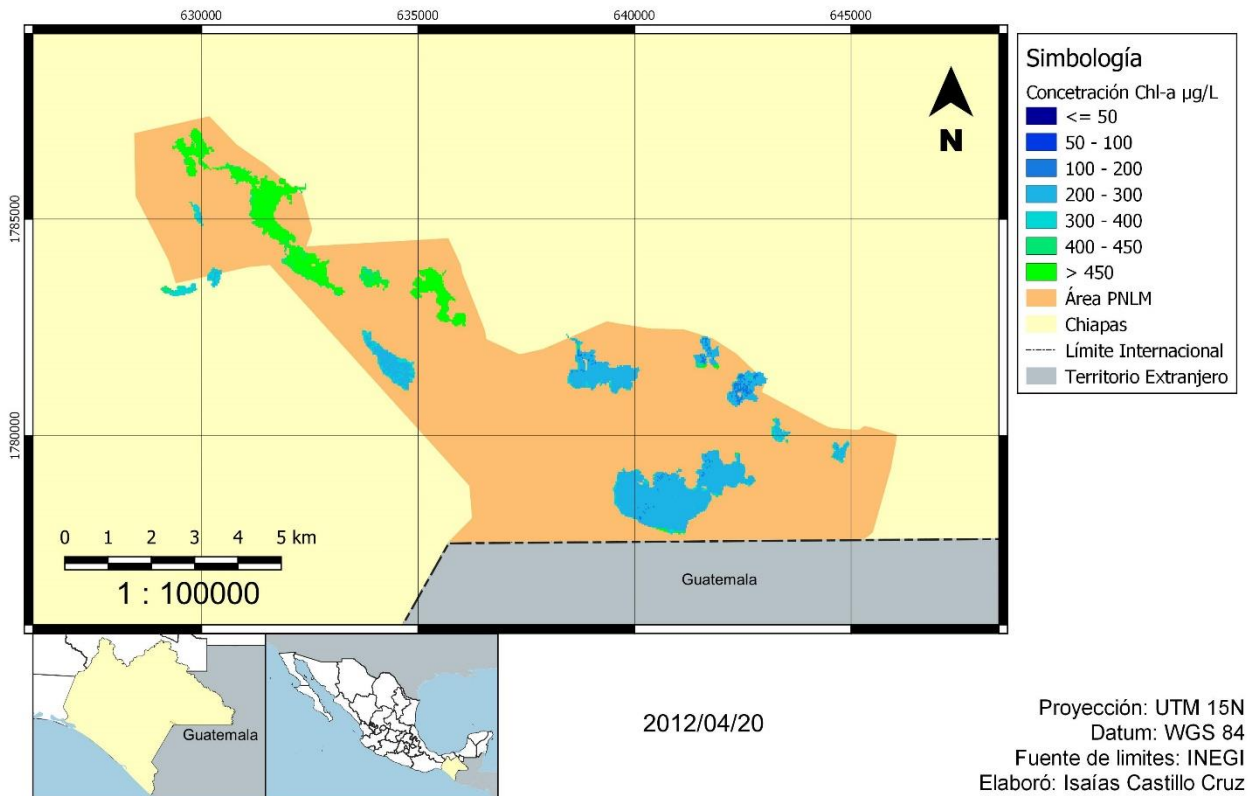
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



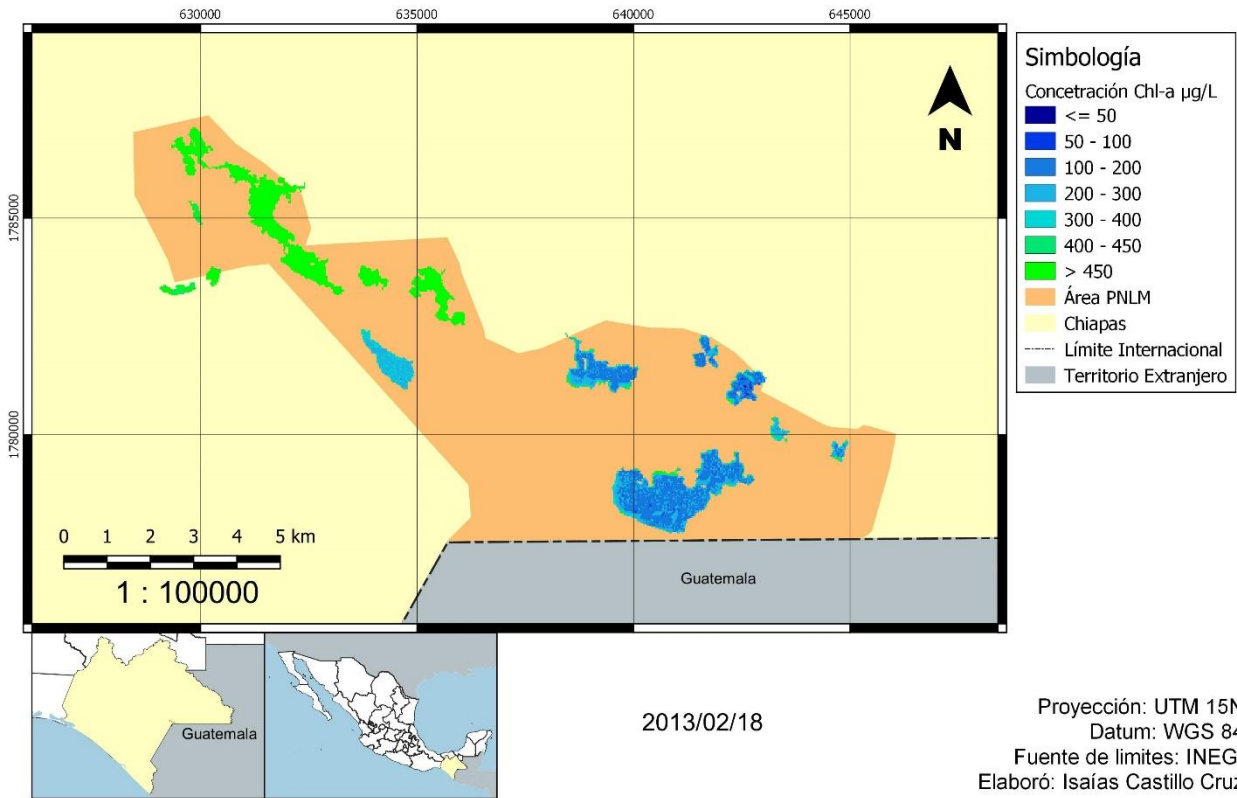
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



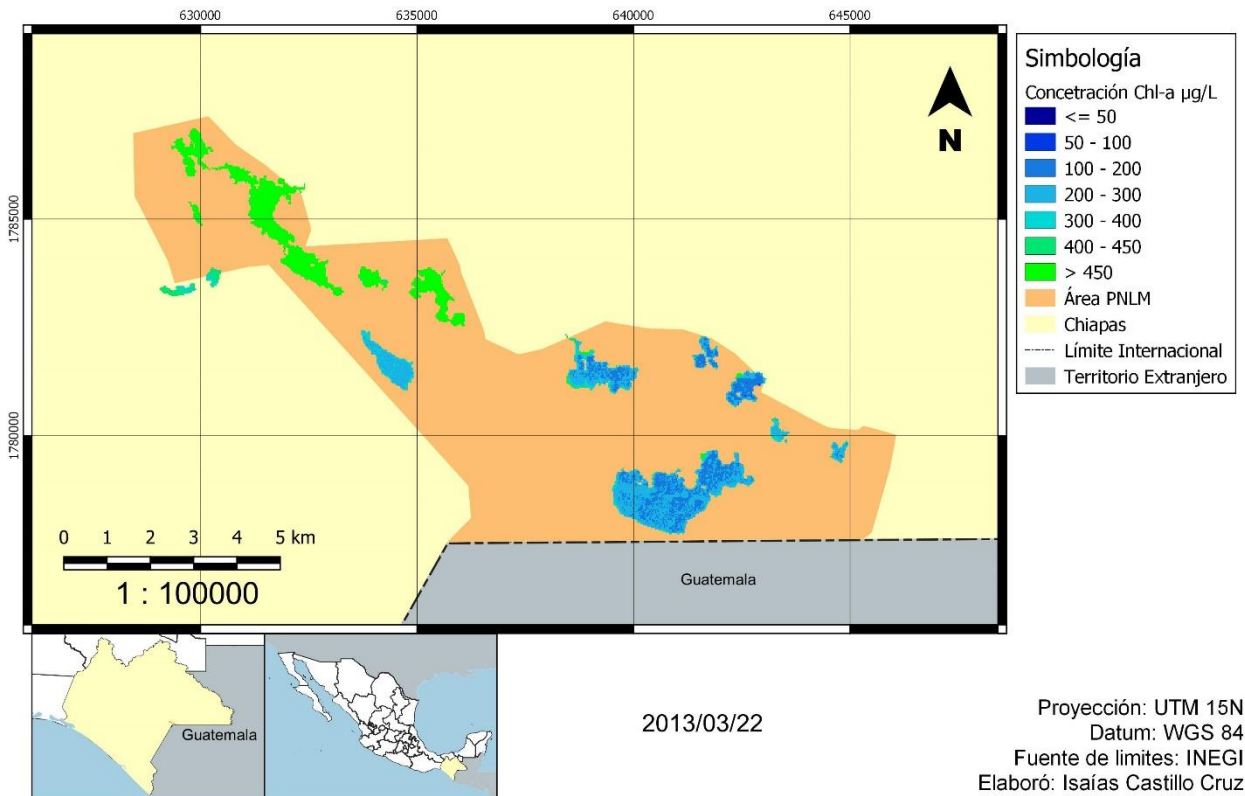
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



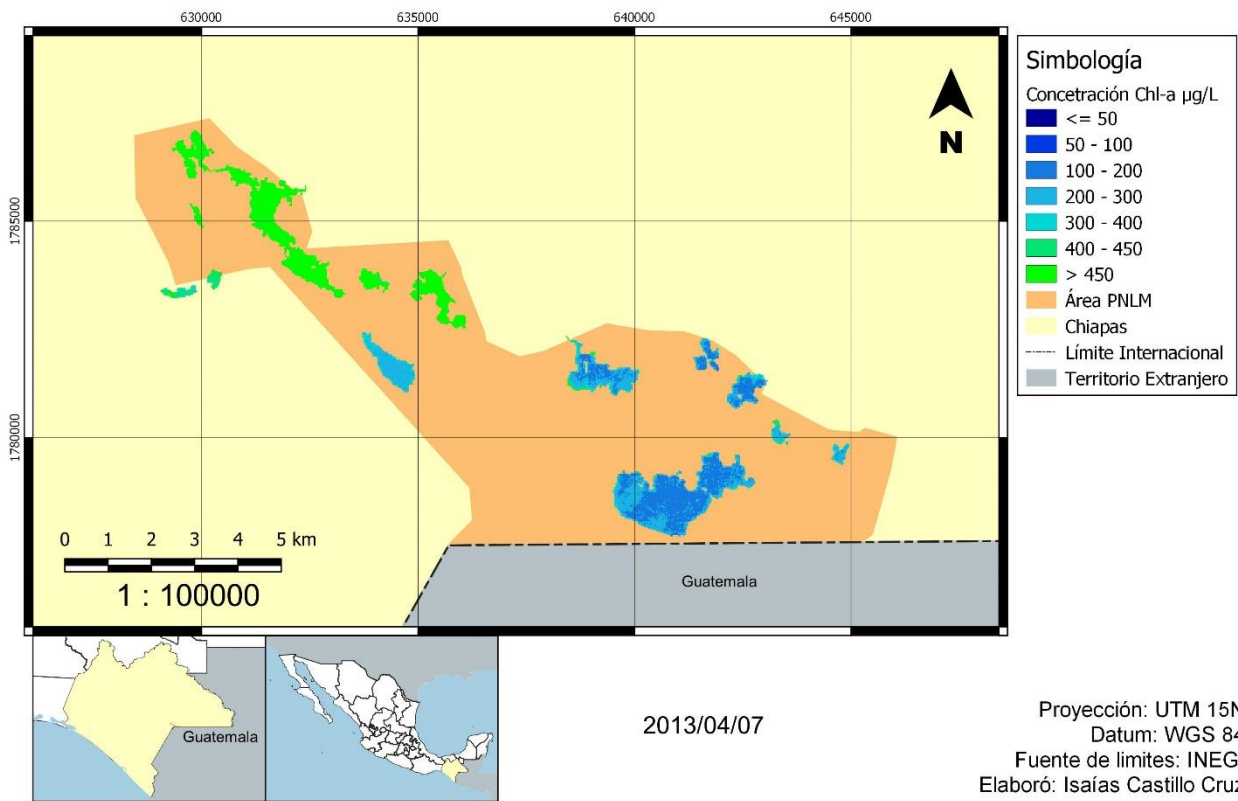
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



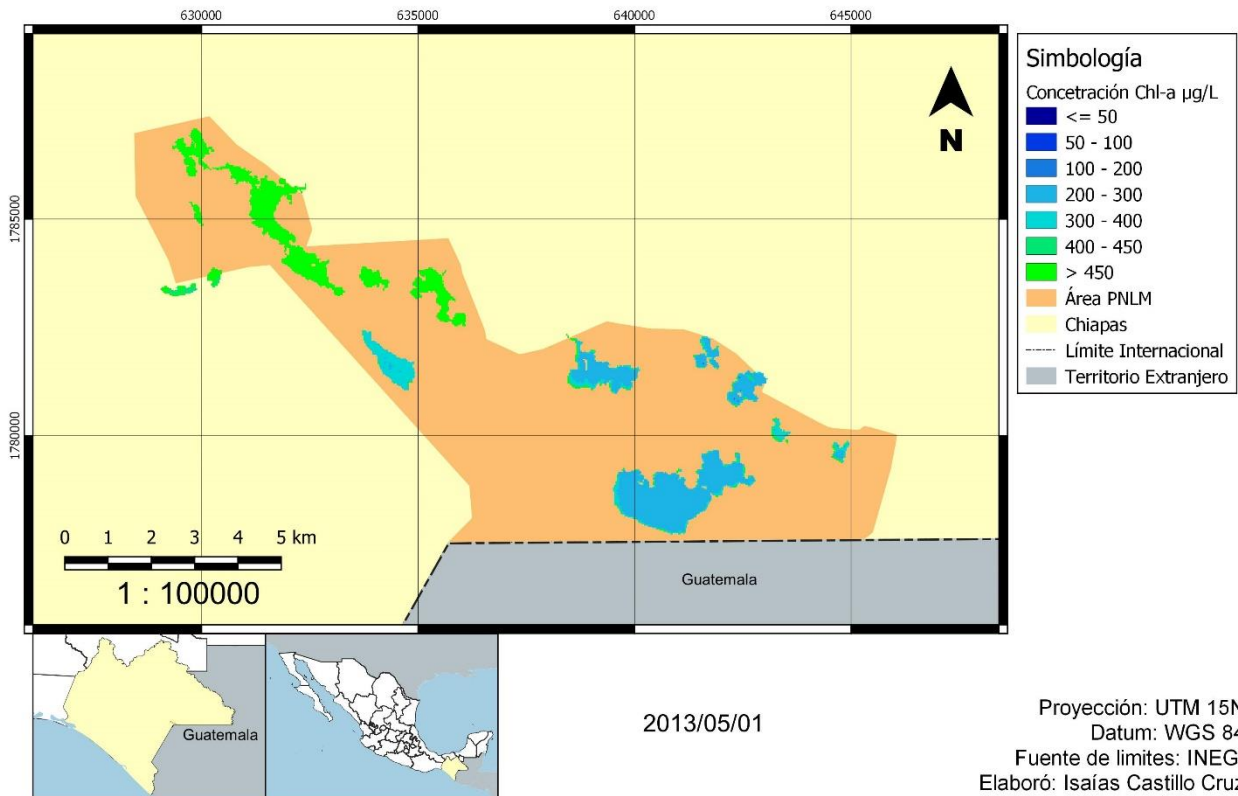
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



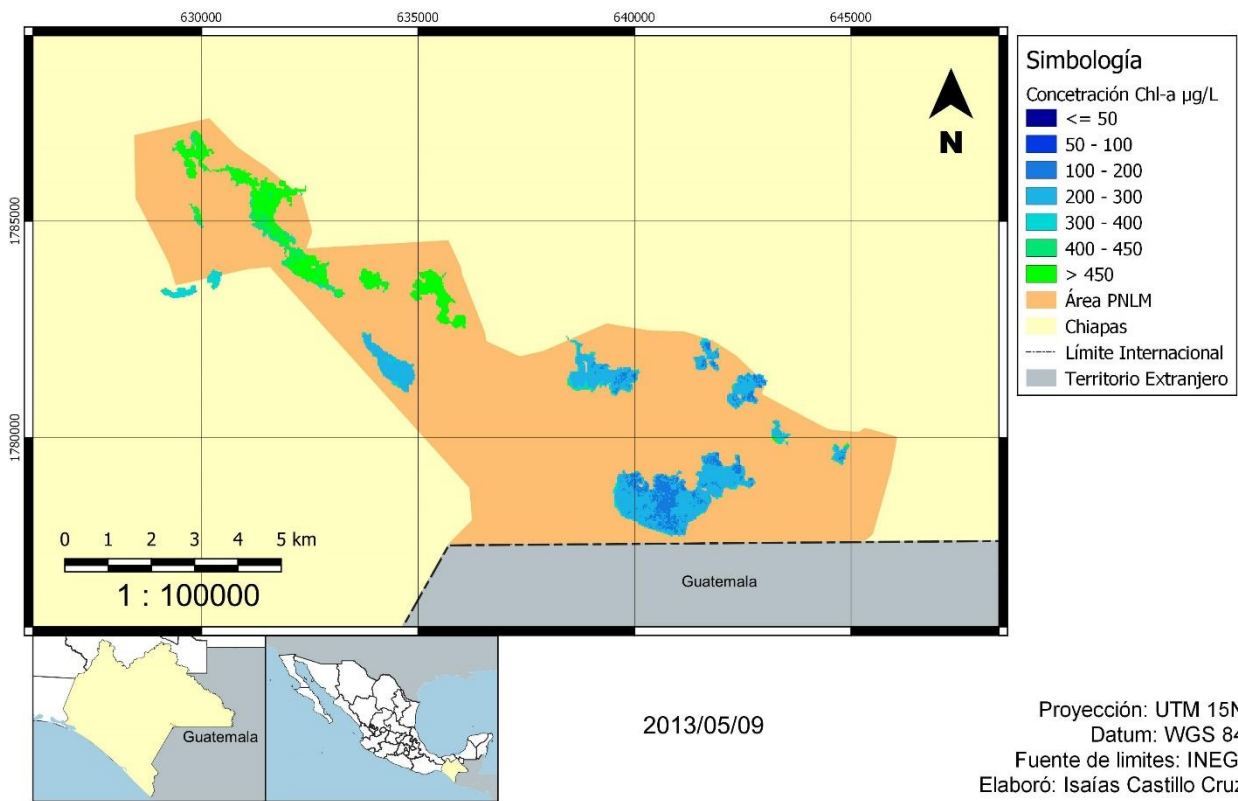
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



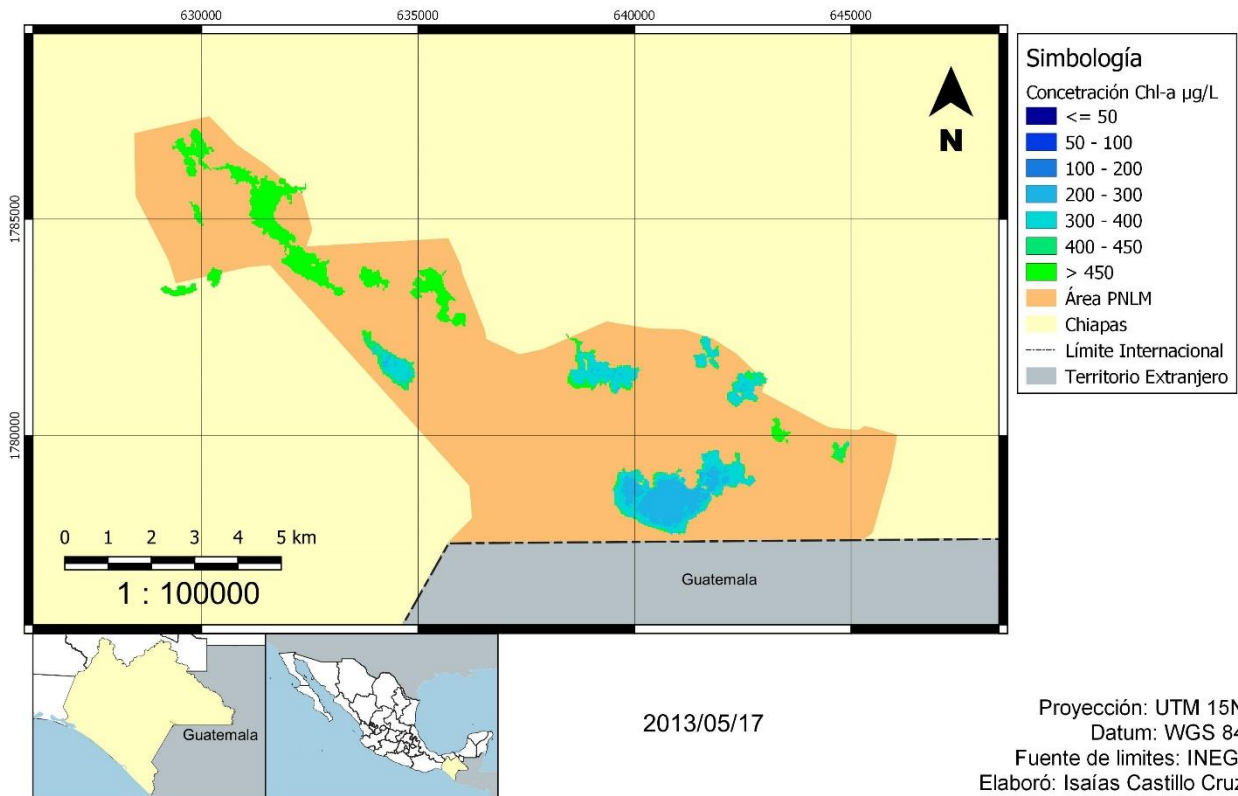
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



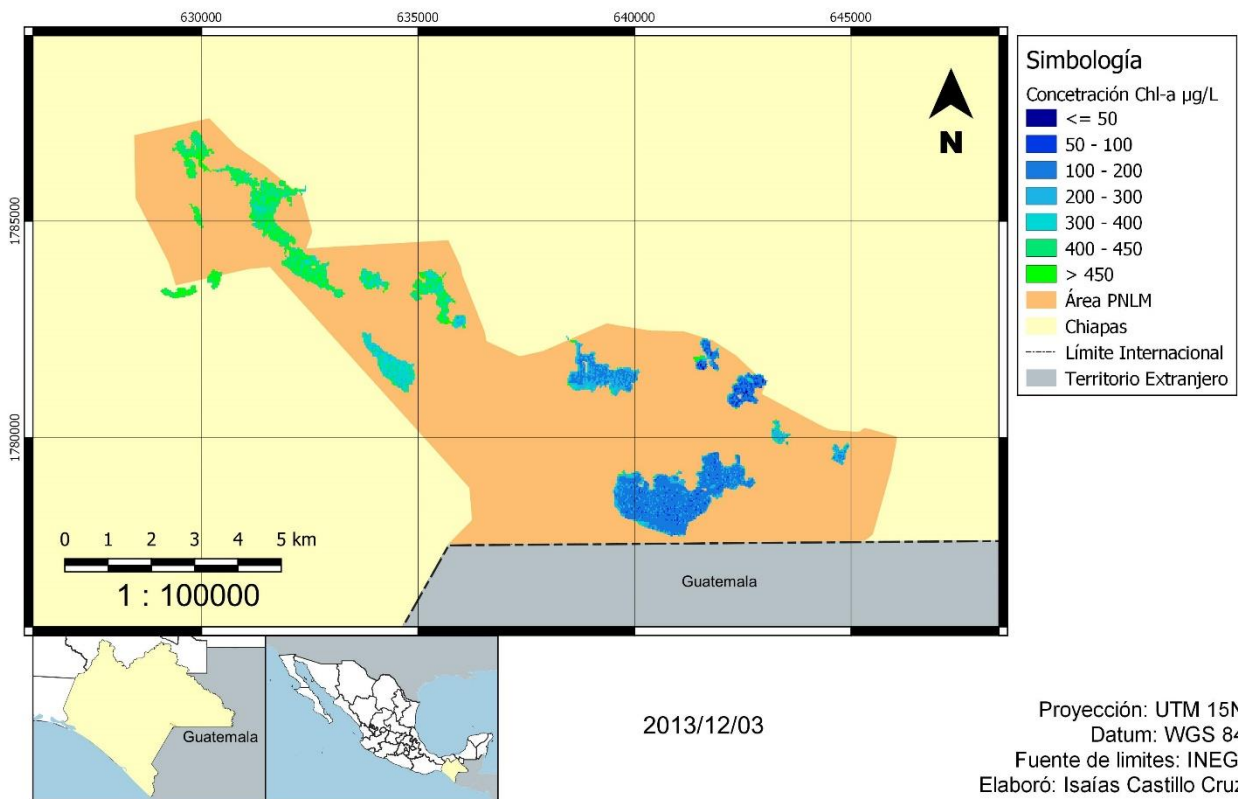
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



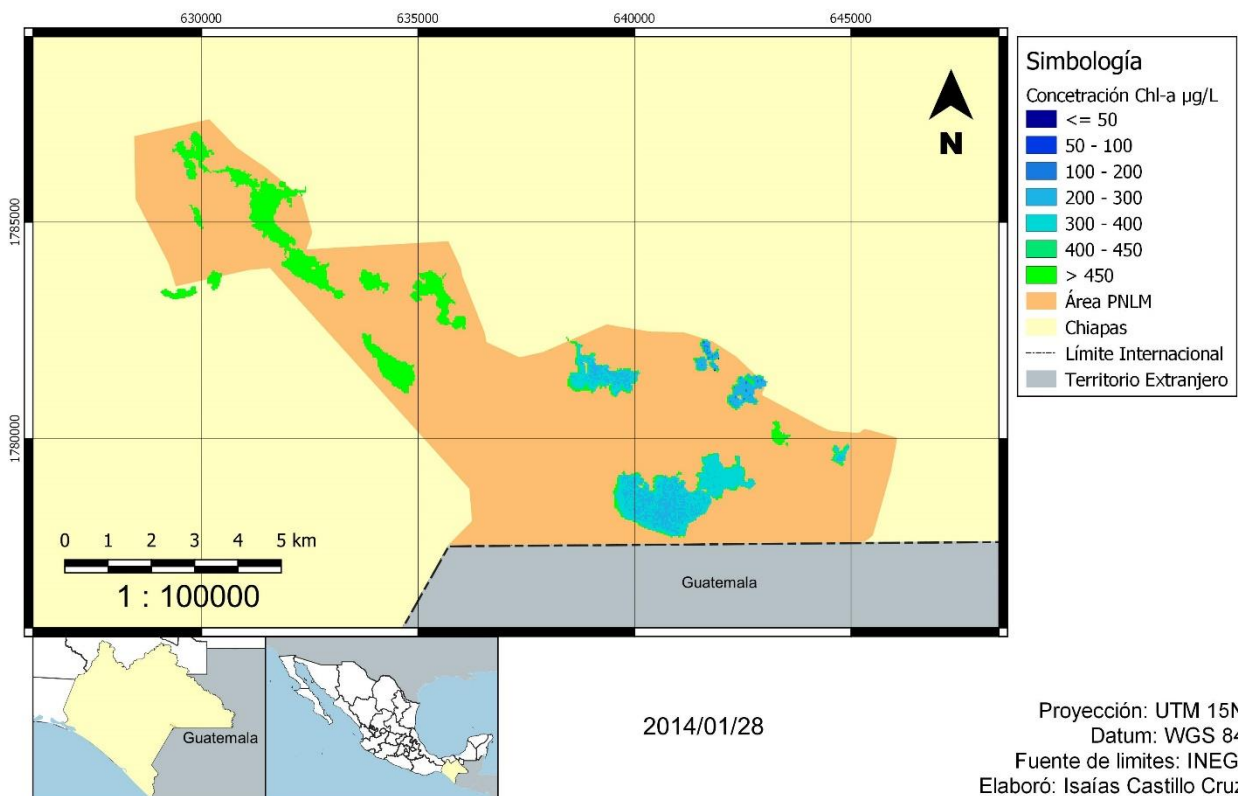
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



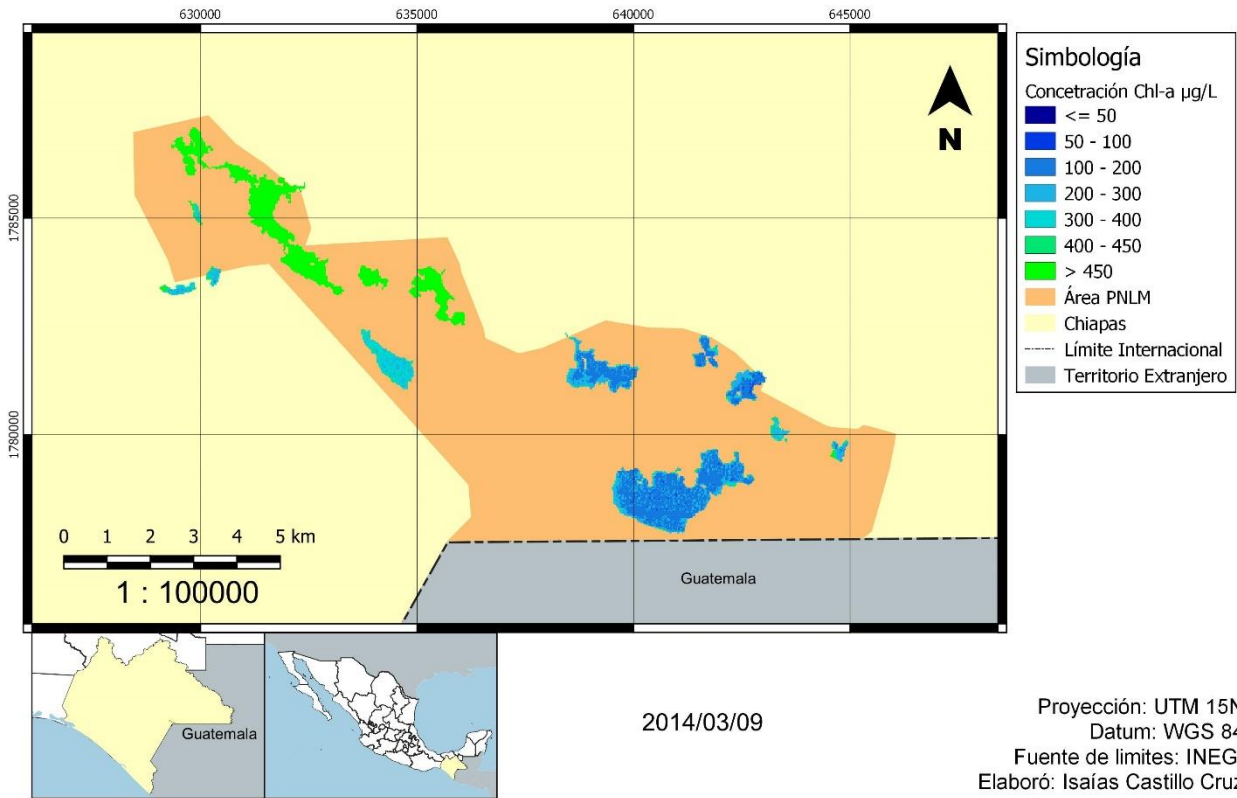
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



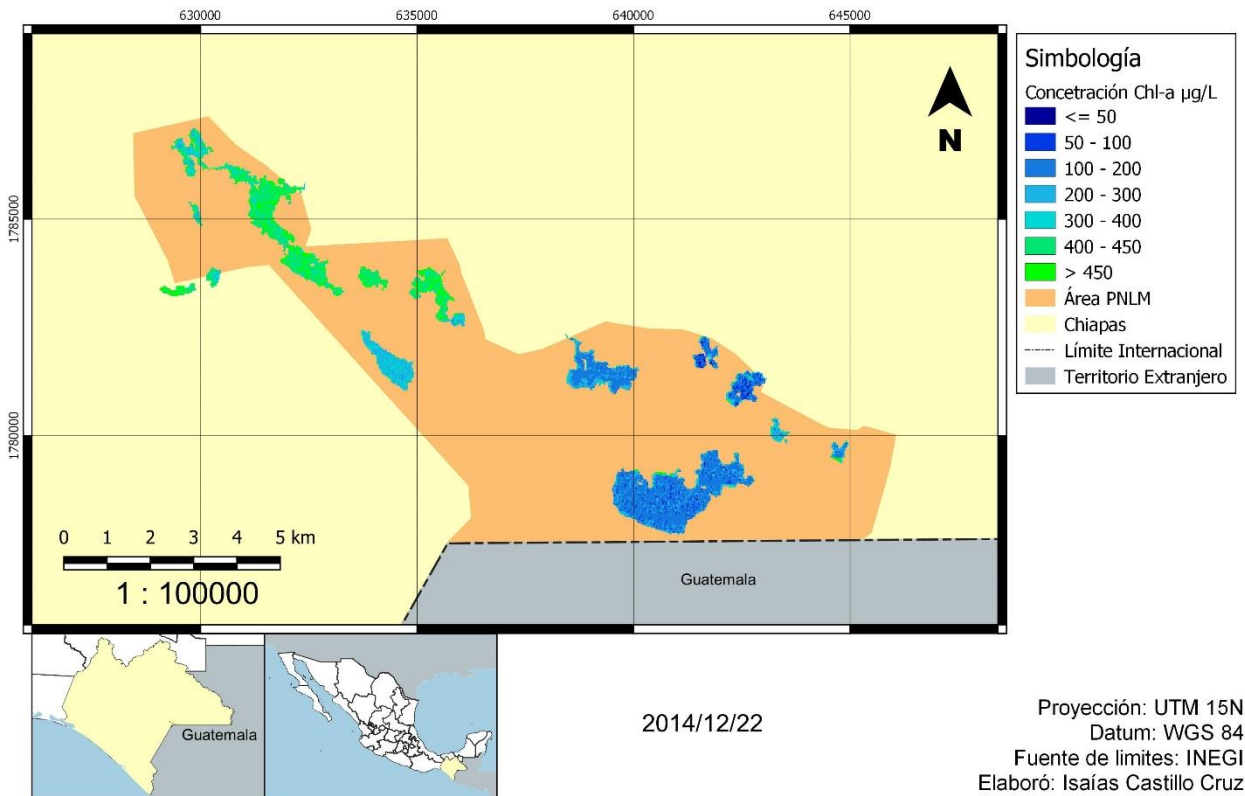
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



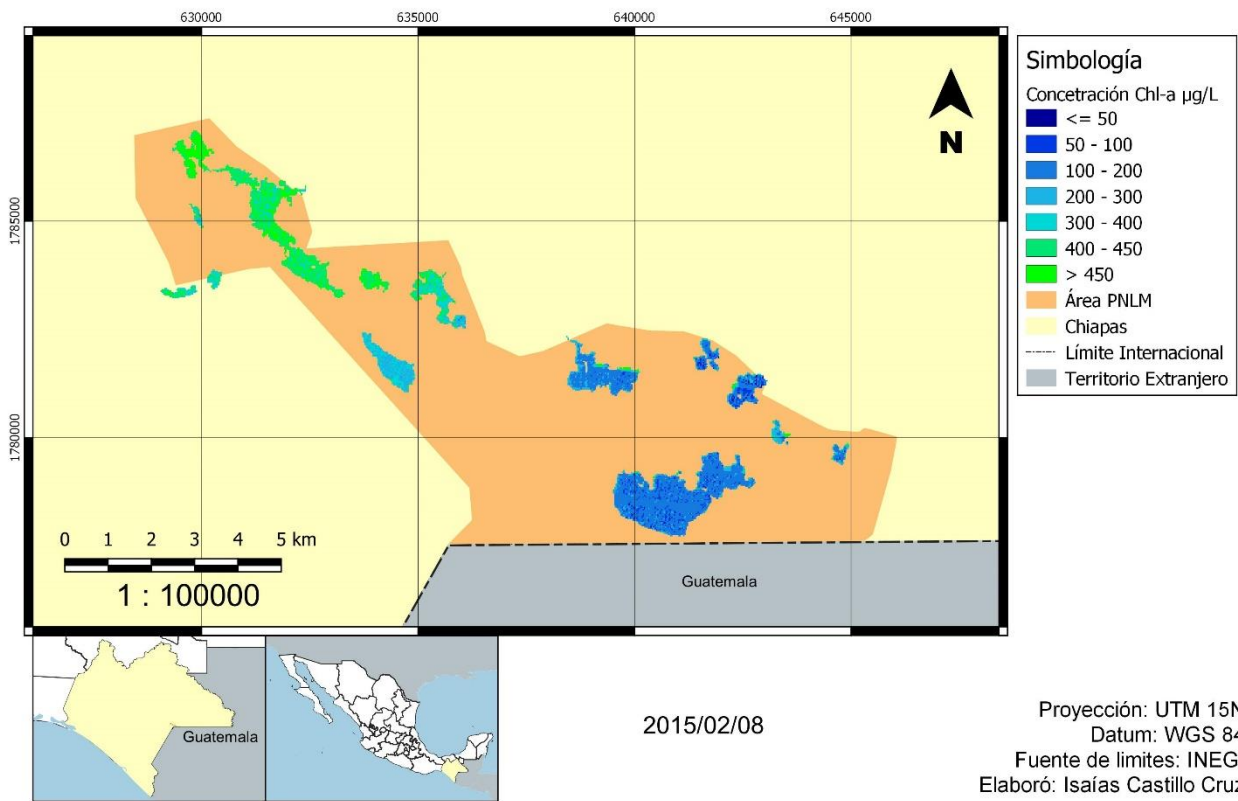
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



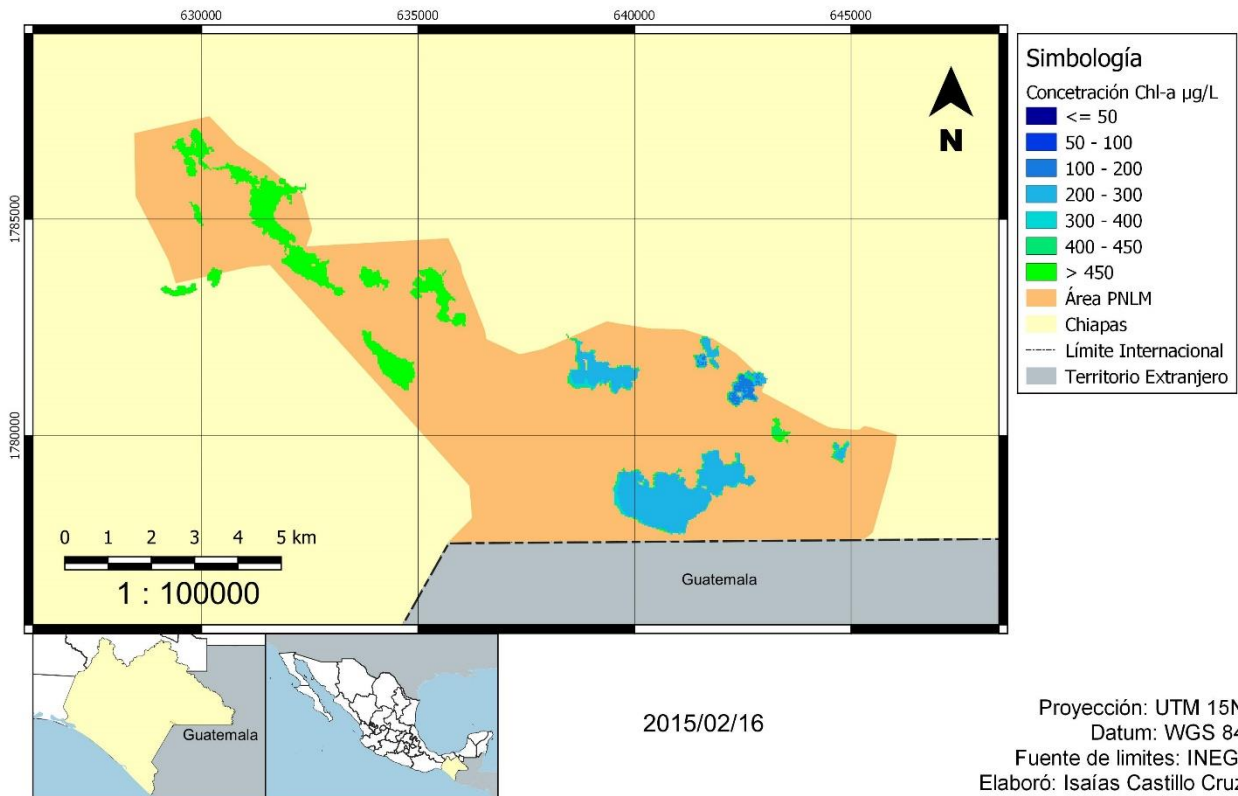
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



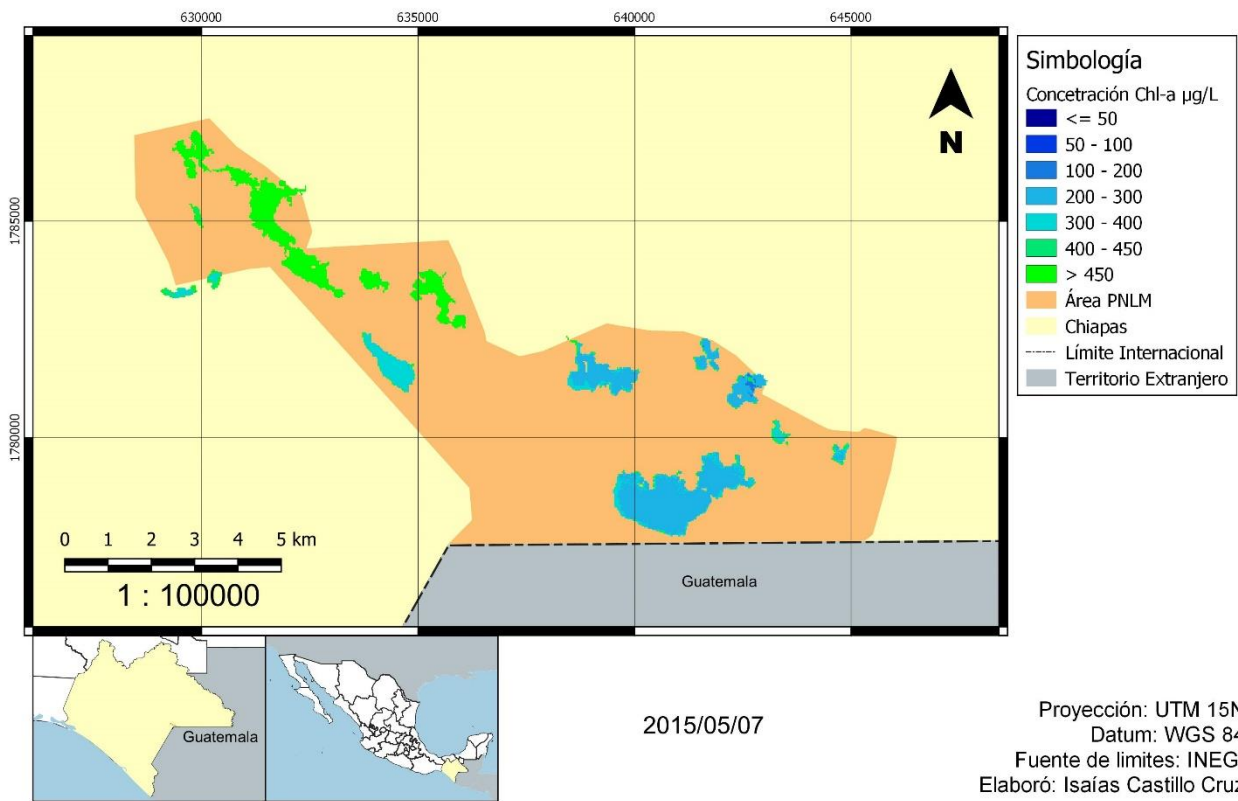
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



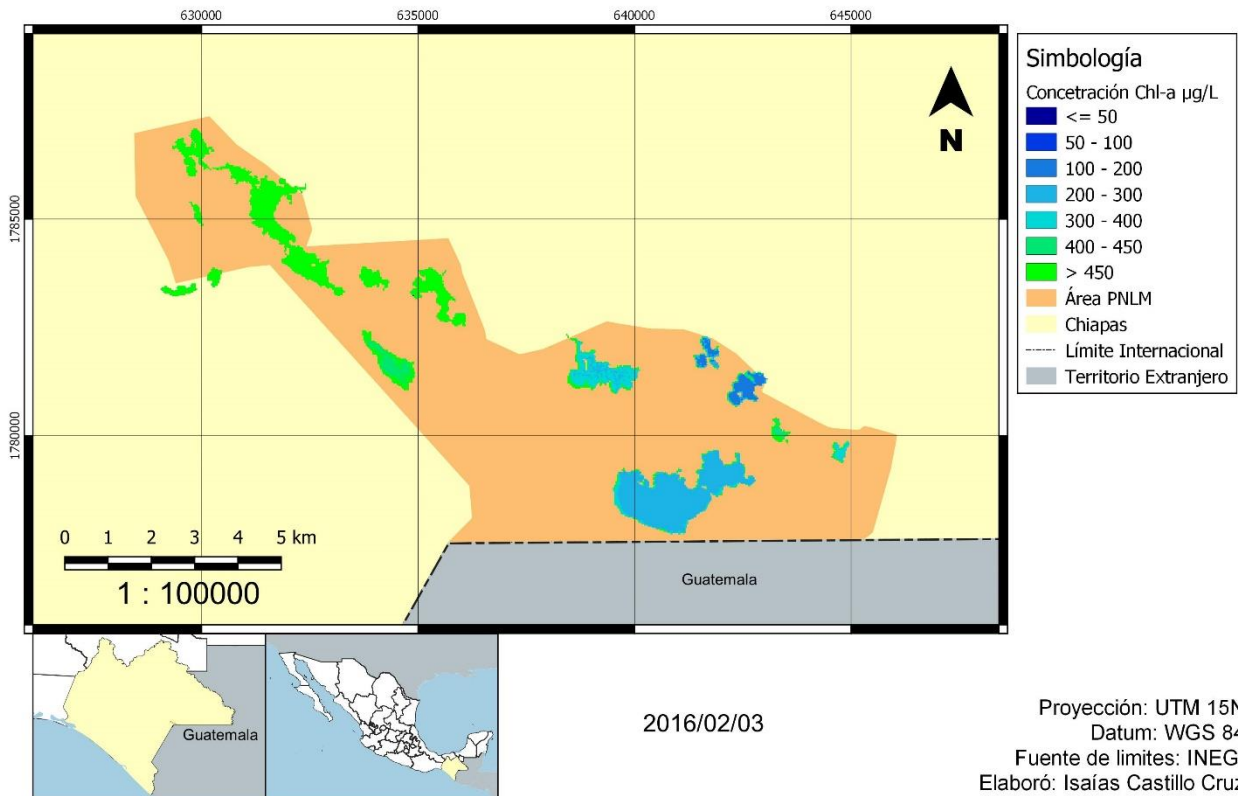
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



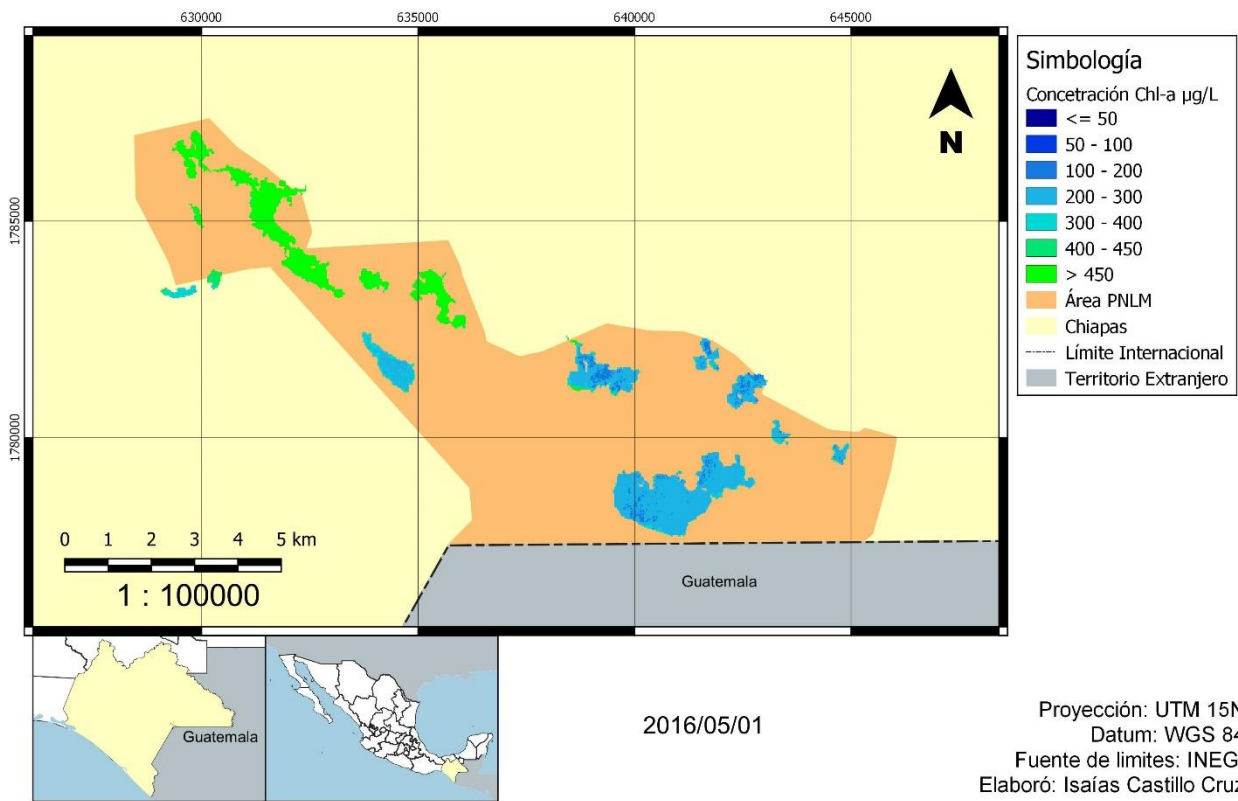
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



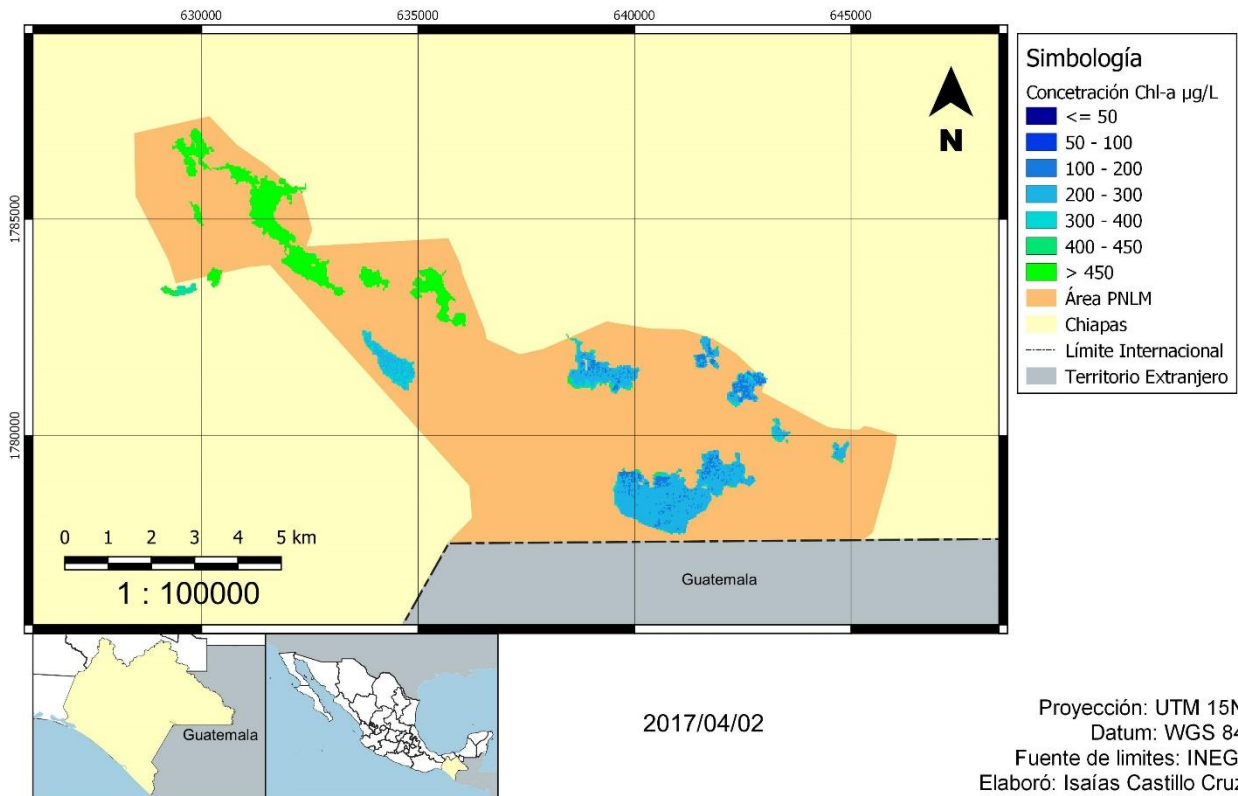
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



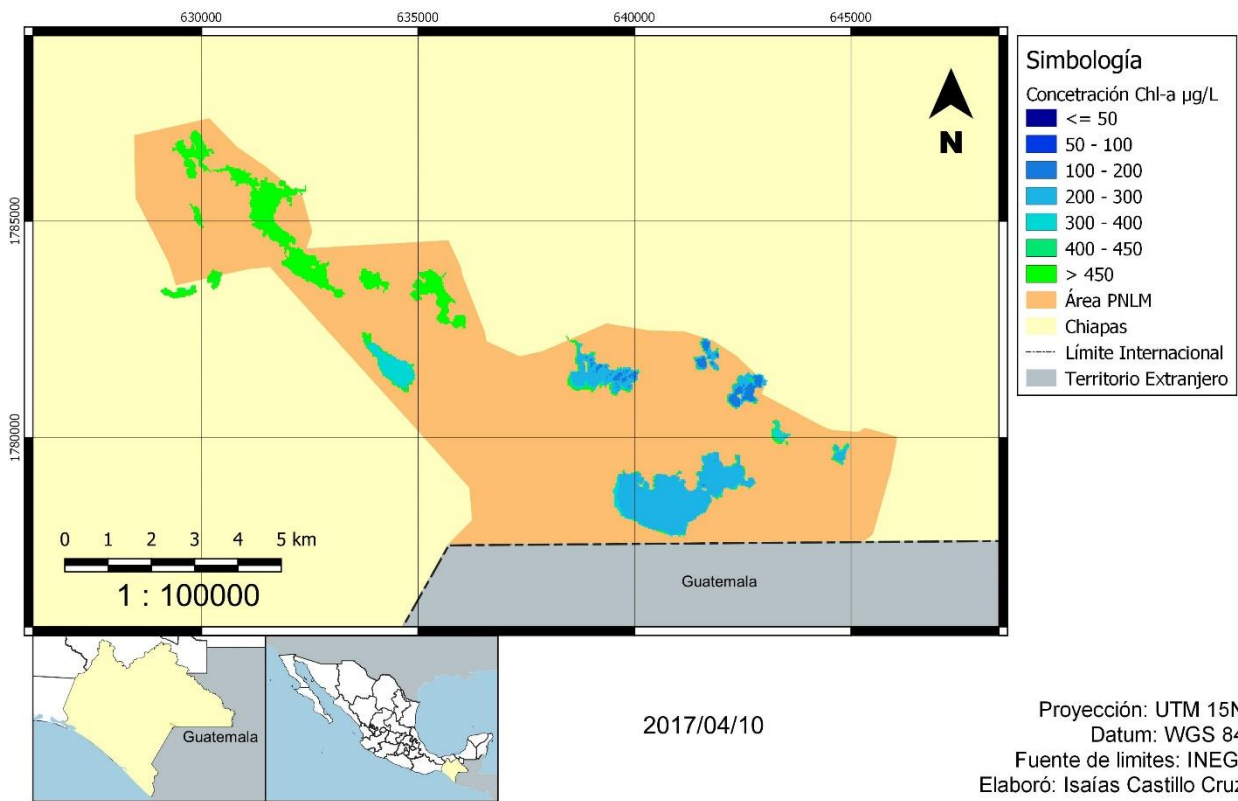
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



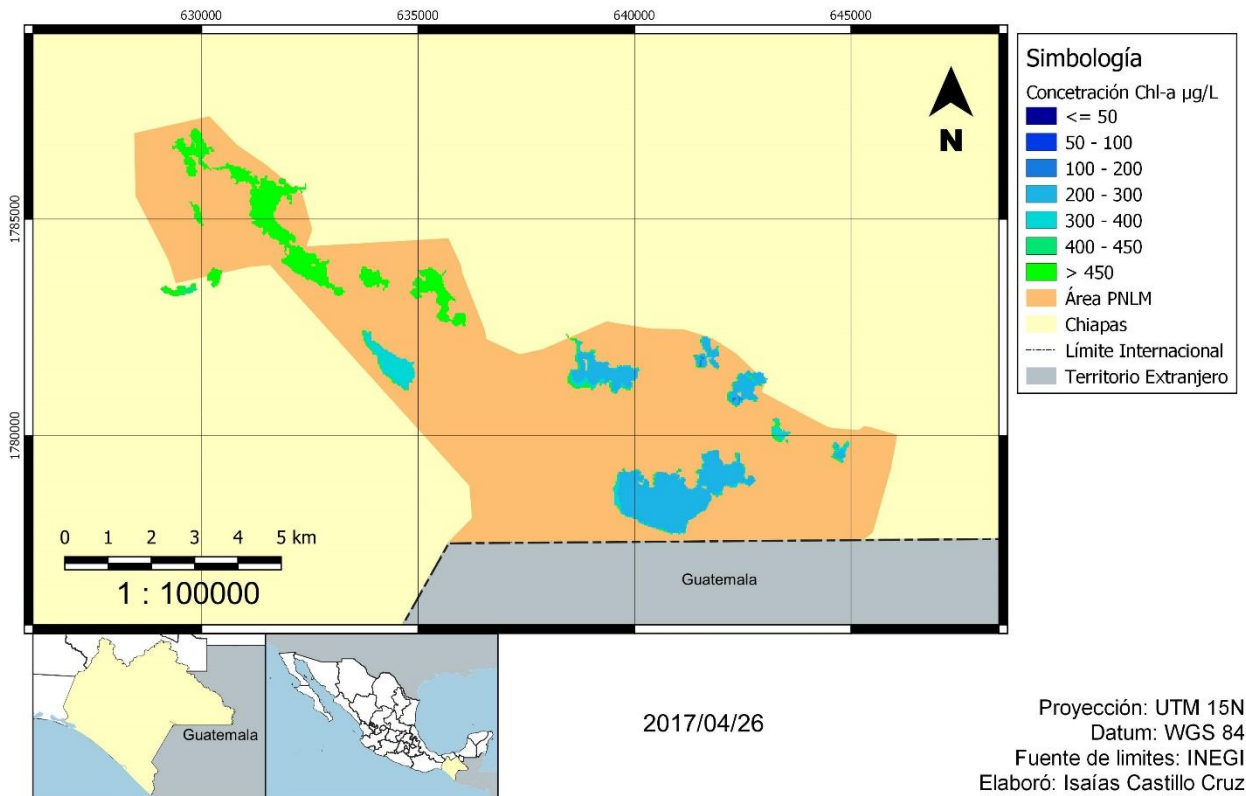
Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM



Parque Nacional Lagunas de Montebello - PNLM

