



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Análisis de problemáticas ambientales en  
cuencas lacustres con tecnologías de la  
información geográfica**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Geomático**

**P R E S E N T A:**

María Fernanda Vargas Serna

**DIRECTORA**

M.C. María Elena Osorio Tai



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019**



*“La memoria no es lo que recordamos,  
sino lo que nos recuerda.  
La memoria es un presente  
que nunca acaba de pasar”.*

*-Octavio Paz*



# Dedicatoria

---

Para todas personas que me apoyaron durante toda la carrera y en especial para lograr mi estancia en Argentina.

Para mis padres y abuelos que me formaron como persona.



# Agradecimientos

---

A la hermosa familia que tengo...

A La Universidad Nacional Autónoma de México, que a través del Programa de Vinculación con los Egresados de la UNAM (PVE UNAM) en coordinación con la Dirección General de Cooperación e Internacionalización (DGECI), me otorgaron la beca, que me permitió realizar mi Tesis en una estancia académica de cuatros meses en Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.

A la Universidad Nacional del Sur (UNS) y al Departamento de Geografía y Turismo, que mediante el convenio que tiene con la UNAM, me permitió realizar mi estancia con acceso a las instalaciones.

A la Dra. Alejandra Gernaldi y todo el Laboratorio de Geotecnología, por brindarme su apoyo durante mi estancia, trabajando continuamente en el desarrollo de mi Tesis, de manera teórica y práctica.



# Abreviaturas

---

<b>Bs.As.</b>	Buenos Aires
<b>SIG's</b>	Sistemas de Información Geográfica
<b>TIG</b>	Tecnologías de Información Geográfica
<b>IGN</b>	Instituto Geográfico Nacional de Argentina



# Resumen

---

Uno de los temas más importantes en la actualidad a nivel mundial es el cambio climático. En Buenos Aires, unos de los problemas son los eventos hidrológicos extremos (inundaciones y sequías) vinculados a la variabilidad climática y la pérdida de calidad de las aguas superficiales, relacionada con la existencia de contaminantes orgánicos y químicos.

Las Tecnologías de la Información Geográfica han contribuido al estudio del cambio climático, empleando esta tecnología a través de la Geomática, como una ciencia aplicada y una disciplina profesional, donde se integra la adquisición, administración, análisis, modelado y la presentación de información georreferenciada. La investigación desarrollada en el presente trabajo, aborda la problemática de calidad de agua en la Laguna Sauce Grande, con el objetivo determinar la calidad del agua y las presiones antropogénicas que le influyen, mediante la aplicación de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica, ubicada en el departamento de Monte Hermoso, en Buenos Aires, Argentina.

En las aguas epicontinentales fundamentan su clasificación en el conocimiento del estado eutrófico de las aguas, buscando la homogeneidad para la clasificación de dichas aguas. La Teledetección aplicada a los ambientes acuáticos determina la concentración y estima la variabilidad espacial de algunos parámetros de calidad de agua como: clorofila, sólidos en suspensión y materia orgánica disuelta. Estos parámetros son útiles para determinación de las condiciones biofísicas y del estado trófico de los sistemas acuáticos.

En el proceso metodológico se emplearon imágenes de Landsat 8 OLI, adquiridas el 12 de mayo del 2019, con ID "LC08 L1TP 226087 20190412 20190422 01 T1", imagen descargada del portal de la U.S. Geological Survey, con la cual se realizó el preprocesamiento de la imagen, y así poder trabajar primeramente con el algoritmo de Topliss descrito en el artículo: "Algorithms for remote sensing of high concentration, inorganic suspended sediment" para el cálculo de sólidos de suspensión. El segundo algoritmo aplicado fue un algoritmo semi-empírico para la estimación de clorofila (chl-a) del libro Introducción al sensoramiento remoto de sistemas acuáticos Barbosa *et al.* (2019).

Los resultados obtenidos del procesamiento de la imagen satelital fueron validados mediante la comparación de las firmas espectrales de la imagen con las firmas espectrales obtenidas *in situ*, obtenidas con un espectro radiómetro de campo Ocean Optics HR2000+ UV/VIS.

Posteriormente para desarrollar el modelo, fue necesario considerar las variables antropogénicas, que afectan la condición de la Laguna Sauce Grande, los factores considerados fueron: urbanismo, uso de suelos, índice de productividad y condición hidrológica; para ello se utilizó un software libre de sistemas de información geográfica, aplicando un análisis multicriterio, lo que permitió realizar dos modelos que permitieran evaluar la situación de la laguna.

En el primer modelo se emplearon los factores de concentración de sólidos en suspensión y la concentración de Clorofila-a; mientras que en el segundo modelo, interactúan todos los factores que presentan valores fuera de la laguna.

# Índice general

---

<b>Portada</b>	<b>I</b>
<b>Dedicatoria</b>	<b>V</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>VII</b>
<b>Abreviaturas</b>	<b>IX</b>
<b>Resumen</b>	<b>XI</b>
<b>Índice general</b>	<b>XIII</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>XV</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>XIX</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	1
1.1.1. Principales problemas ambientales en Argentina. . . . .	2
1.1.2. Tipos de problemas ambientales en la provincia de Buenos Aires. . . . .	5
1.1.3. Contexto histórico de problemas ambientales en Argentina. . . . .	7
1.1.4. Tecnologías de la Información Geográfica . . . . .	12
1.1.5. El uso de los TIG en Argentina y en México. . . . .	14
1.2. Justificación de la investigación . . . . .	18
1.2.1. Medio ambiente . . . . .	19
1.2.2. Características . . . . .	19
1.3. Área de estudio. . . . .	21
1.4. Problemática . . . . .	22
1.5. Planteamiento del problema . . . . .	23
1.6. Hipótesis . . . . .	23

1.7. Objetivos . . . . .	23
<b>2. Marco teórico</b>	<b>25</b>
<b>3. Metodología y datos</b>	<b>61</b>
3.1. Recopilación de información para los SIG's . . . . .	73
3.1.1. Urbanismo . . . . .	73
3.1.2. Uso de suelos . . . . .	75
3.1.3. Índice de productividad . . . . .	77
3.2. Procesamiento de la información . . . . .	79
3.2.1. Determinación de áreas de investigación . . . . .	79
3.3. Organización e implementación de los SIGs en áreas de investigación. . . . .	81
<b>4. Resultados y Discusión</b>	<b>83</b>
4.1. Resultados de algoritmos de teledetección . . . . .	83
4.2. Modelos a partir de los Sistemas de Información Geográfica (SIG's) . . . . .	92
4.3. Análisis de los resultados . . . . .	94
<b>5. Conclusiones</b>	<b>95</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>97</b>
<b>Anexo</b>	<b>101</b>

# Índice de figuras

---

1.1. Mapa de localización de Argentina. . . . .	2
1.2. Ushuaia, Arg. Daños al medio ambiente y bosques autor: Andreea Dragomir. . . . .	4
1.3. Mapa de localización de Buenos Aires, elaboración propia. (Mayo 2019). . . . .	5
1.4. Mapa mental de los Sistemas de Información Geográfica, elaboración propia. (Mayo 2019). . . . .	12
1.5. Fotografía de la Laguna Sauce Grande, Monte Hermoso, Bs.As. . . . .	21
1.6. Mapa de localización de la Laguna Sauce Grande. . . . .	22
2.1. El movimiento del agua. . . . .	27
2.2. Recorte de imagen satelital Landsat 8, visualizada en color verdadero. Combinación de las bandas 4,3,2. . . . .	34
2.3. Acercamientos al área de estudio, Laguna Sauce Grande de imagen satelital Landsat 8, visualizada en color verdadero. Combinación de las bandas 4,3,2. . . . .	35
2.4. Ilustración de la Trayectoria de la luz entre fuente (sol), blanco (cuerpo de agua) y sensor orbital. . . . .	36
2.5. Campo eléctrico y magnético. . . . .	38
2.6. Direcciones de propagación de la luz . . . . .	40
2.7. Flujo radiante de un campo de luz que se centra en una superficie de referencia. . . . .	42
2.8. Geometría asociada a la definición de ángulo plano $\theta$ y de ángulo sólido $\Omega$ . . . . .	42
2.9. Esquema ilustrativo de la intensidad radiante $I$ en el ángulo sólido $\Omega$ en la dirección del ángulo zenital $\theta$ y azimutal $\phi$ . . . . .	42
2.10. Esquema de la definición conceptual de la magnitud radiométrica radiancia. . . . .	44
2.11. Absorción y dispersión de un fotón en un elemento de volumen de agua. . . . .	45
2.12. Configuración esquemática de sensores para medidas <i>in situ</i> de magnitudes radiométricas recomendadas por protocolos de estudio del color del agua. . . . .	59
3.1. Esquema de metodología, elaboración propia. . . . .	61

3.2. Fotografía de la Laguna Sauce Grande, Monte hermoso, Buenos Aires, Argentina. . . .	68
3.3. Fotografía de metodología para la toma de muestras con el espectro radiómetro. . . .	69
3.4. Fotografía de la toma de muestras con el espectro radiómetro. . . . .	69
3.5. Fotografía de la captura de la muestra con el software Ocean View del espectro radiómetro..	70
3.6. Fotografía de las zonas alrededor de la Laguna Sauce Grande. . . . .	70
3.7. Captura de los valores de coordenada del lugar. . . . .	71
3.8. Gráfica de firma espectral de la clasificación de Agua continental en la imagen L8 OLI LC08_L1TP_226087_20190412_20190422_01_T1 genera en Qgis 3.4, elaboración propia.	72
3.9. Gráfica de firma espectral de la muestra en campo con espectro radiómetro de la Laguna Sauce Grande, datos de la muestra: Reflection_11-21-36-340, Date: Fri Aug 09 11:21:36 GMT-03:00 2019. Elaboración propia. . . . .	72
3.10. Gráfica de firma espectral de la muestra en campo con espectro radiómetro de la Laguna Sauce Grande, datos de la muestra: Reflection_11-21-36-340, muestra normalizada. Elaboración propia. . . . .	73
3.11. Mapa de Población de la República Argentina del Instituto Geográfico Nacional. Organización política. En: Atlas Nacional Interactivo de Argentina. . . . .	74
3.12. Imagen de los Centros urbanos más cercanos al área de estudio. Elaboración propia . .	75
3.13. Tabla de los usos de suelos establecidos para la clasificación supervisada en Qgis 3.4 Elaboración propia, adaptación de la cobertura . . . . .	76
3.14. Imagen de la clasificación supervisada realizada en el software Qgis 3.4 . . . . .	76
3.15. Tabla comparativa de las capas de uso de suelos con las tablas del modelo GWLF . .	77
3.16. Esquema del procesamiento de la información, mediante el análisis multicriterio. . . .	79
3.17. Mapa de Delimitación de áreas de trabajo. . . . .	80
3.18. Ilustración de Factores delimitados. . . . .	80
3.19. Esquema de organización de Análisis Multicriterio para el Modelo 1. . . . .	82
3.20. Esquema de organización de Análisis Multicriterio para el Modelo 2. . . . .	82
4.1. Aplicación de índice de agua MNDWI en imagen satelital landsat 8 del área de estudio.	83
4.2. Mapa de puntos de muestreo en la Laguna Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. . .	84
4.3. Imagen del cálculo del algoritmo Topliss, en el área de estudio con valores de concentración de sólidos de suspensión. . . . .	85
4.4. Imagen del cálculo del algoritmo CSS de Ruiz-Verdú <i>et al.</i> (2001). . . . .	86
4.5. Gráfica del muestreo de concentración de sólidos de suspensión de los algoritmos propuestos.	88
4.6. Imagen del cálculo del algoritmo de estimación de clorofila (chl-a) . . . . .	89
4.7. Gráfica del promedio anual de concentración de Clorofila-a de la Laguna del Sauce. . .	90

4.8. Gráfica del promedio anual de concentración de Clorofila-a de la Laguna Merín. . . . .	90
4.9. Gráfica del comportamiento del muestreo de los resultados del algoritmo de cálculo de concentración de Clorofila-a. . . . .	91
4.10. Mapa del Modelo 1. . . . .	92
4.11. Mapa del Modelo 2. . . . .	93



# Índice de tablas

---

1.1. Elaborado y actualizado a partir de DOMINGUEZ, D.Y. y CARBALLO, S. <i>Inundaciones de la provincia. de Buenos Aires</i> , Período 1972/86, PROSA. Bs. As; 1988.) . . . . .	11
2.1. Tabla de parámetros e intervalos para determinar el grado de eutrofia. . . . .	32
2.2. Características de las masas de agua y sensores adecuados para su estudio. Adaptada de Schmitt (1993) . . . . .	56
3.1. Tabla adaptada de $\lambda_e f^-$ de las bandas de los sensores TM y ETM, región V-IRC del espectro EM. (Rivas Raúl, 2011). . . . .	64
3.2. Tabla de Juicios de valor,Fuente: Gómez y Cabrera (2008). . . . .	81
4.1. Valores de muestro de los algoritmos para el cálculo de sólidos de suspensión. Elaboración propia. . . . .	87
4.2. Análisis estadístico de los valores obtenidos de algoritmos de Sólidos de Suspensión . .	88
4.3. Tabla comparativa de los valores de concentración de clorofila- a en cuerpos de agua continentales, similares al área de estudio. Elaboración propia. . . . .	91
4.4. Estadística de la Concentración de Clorofila-a, resultado del algortimo propuesto. Elaboración propia. . . . .	91



# Introducción

---

## 1.1. Antecedentes

La República Argentina se localiza en el extremo sur del continente americano con gran extensión latitudinal de  $22^{\circ}$  S a  $55^{\circ}$  S. Según el Instituto Geográfico Nacional de Argentina, la extensión de las tierras emergidas alcanza los  $3,761,274 \text{ km}^2$  incluyendo los ámbitos terrestres cuya soberanía es reclamada por el Estado argentino. De ellos,  $2,791,810 \text{ km}^2$  corresponden a la parte continental americana,  $965,597 \text{ km}^2$  corresponden al continente antártico, y  $3,867 \text{ km}^2$  a las islas australes (Georgias del Sur y Sandwich del Sur).

La gran extensión del país determina características diversas derivadas de largos procesos morfoestructurales. Así, en el Centro y Este del país se localiza una de las llanuras más extensas del mundo; en el noreste la meseta Misionera formada por movimientos de ascenso y dislocaciones; en el Oeste, al límite con Chile, se extiende la Cordillera de los Andes, y como consecuencia de movimientos epirogénicos de ascenso y descenso; al sur se encuentra la Patagonia, la cual presenta distintos elementos morfológicos como valles, sierras, caña dones, depresiones profundas con intensos salares, entre otros.



**Figura 1.1:** Mapa de localización de Argentina, elaboración propia.

Argentina se ubica dentro de la zona subtropical-templada (Morello, 2000). Abarca desde los climas tropicales en las ecorregiones chaqueña, tucumano-oraneses y misionera, hasta los climas fríos del sur. Exceptuando en el Noroeste, existe un clima principalmente oceánico, debido a que, junto con Chile, conforman cierta clase de península que se va angostando entre los océanos Atlántico y Pacífico.

Las características morfoestructurales y el clima dan lugar a la existencia de varias actividades económicas que explotan los recursos naturales, como la agricultura, la pesca, la minería, el petróleo y el gas.

### 1.1.1. Principales problemas ambientales en Argentina.

Las condiciones medio- ambientales en Argentina, son un tema complejo, por las múltiples dimensiones que abarca, tanto en el plano de la realidad social como del sistema natural y las múltiples combinaciones entre estas dos dimensiones, variables en cada momento y lugar del país. Los problemas ambientales que enfrenta Argentina, son en general muchos de los problemas que tenemos a nivel global por el cambio climático.

El cambio climático se manifiesta en el calentamiento de la atmósfera (efecto invernadero) y en la

disminución de la capa de ozono. En las últimas décadas se ha incrementado la emisión de gases de invernadero, como: dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), clorofluorocarbonos ( $CFC_s$ ). Las concentraciones de estos elementos dadas por las tasas de emisión, indican que para mediados del próximo siglo se alcanzaría un incremento en el calentamiento global de  $1.5^\circ C$  (IPCC,2017 en (Masson-Delmotte, 2017)). Este fenómeno actualmente está provocando un aumento en la temperatura, aunque no de manera uniforme, porque en latitudes medias y altas el incremento es más significativo, altera la cantidad de precipitación que afecta la humedad del suelo y modifica la distribución geográfica de las actuales zonas de cultivo. Los principales efectos del cambio climático en Argentina han sido el deshielo glaciario, las inundaciones por el aumento de la precipitación, las sequías y el aumento de la temperatura promedio diaria.

En los cursos de agua disponibles son vertidos también desechos sólidos industriales, agrícolas y urbanos, sin que se estén ejecutando programas de prevención y gestión para la conservación del vital líquido potable. Los desechos sólidos son depositados en rellenos sanitarios y basureros clandestinos. Contreras (2011) menciona que hay un manejo inadecuado de estos residuos provenientes de las industrias, el comercio, los hospitales y los hogares, entre otras fuentes. La mitad de esta basura podría ser reciclada y aprovechada si existieran programas de reutilización. Los depósitos de basura en los rellenos sanitarios provocan infiltraciones que terminan contaminando los cursos de agua subterráneos y mantos acuíferos.

Otro problema importante es el avance de las fronteras urbanas y agrícolas sobre las áreas de vegetación natural y las áreas verdes en las ciudades y el campo. Bosques completos han sido destruidos para dar paso a explotaciones agrícolas, ganaderas, forestales y silvícolas. Las plantaciones de soja y demás cultivos agroindustriales a gran escala son otro problema causante en el proceso de deforestación y tala de bosques nativos. Para obtener maderas, leña y carbón vegetal, grandes extensiones de bosques son sacrificados. El problema de la deforestación indiscriminada es que muchas veces destruye cuencas de captación hídrica.



**Figura 1.2:** Ushuaia, Arg. Daños al medio ambiente y bosques autor: Andreea Dragomir.

Cada año, poblaciones enteras y miles de hectáreas sembradas quedan bajo el agua como consecuencia de las inundaciones que se producen en el país. Las lluvias intensas en períodos cortos de tiempo provocan el desborde de ríos y lagunas, y esto, a su vez, generan inundaciones. Representan el 60% de los desastres naturales que ocurren en Argentina y generan el 95% de los daños y pérdidas económicas (Contreras, 2011). Según el Banco Mundial, actualmente las inundaciones son la mayor amenaza para el país.

### 1.1.2. Tipos de problemas ambientales en la provincia de Buenos Aires.

Una de las provincias más importantes de Argentina, es Buenos Aires, localizada en el centro-este del país. En esta provincia se encuentra la Capital Federal con una amplia conurbación. Tiene una longitud máxima de norte a sur de 909,68 kilómetros, desde el punto extremo norte coincide con la desembocadura del Arroyo del Medio en el río Paraná, a los 33°16'S y 66°15'O, hasta la Punta Redonda, a los 41°02'S y 62°46'O.



**Figura 1.3:** Mapa de localización de Buenos Aires, elaboración propia. (Mayo 2019)

Derivado del cambio climático, se determina que los factores que afectan principalmente a la provincia de Buenos Aires, son: el aumento de la temperatura y el adelgazamiento de la capa de ozono. Estos cambios a nivel global traen como consecuencia gran variabilidad climática. El aumento de la temperatura produce un impacto en los ambientes costeros como consecuencia de una elevación del nivel del mar, afectando a los centros urbanos y poblaciones que viven casi a nivel del mar. En este sentido, en la provincia de Buenos Aires hay localidades importantes sobre la zona marítima, como

## 1. INTRODUCCIÓN

---

Bahía Blanca, Mar del Plata, La Plata, entre otras.

Por otro lado, la variabilidad climática afecta las actividades agropecuarias al modificarse la temperatura e intensidad de las lluvias que consecuentemente afecta las condiciones ecológicas para los cultivos tradicionales del territorio de Bs.As. Esta situación puede agravarse aún más por el incremento de la radiación ultravioleta como consecuencia de la disminución de la capa de ozono que, alterando la actividad fotosintética de los vegetales, contribuirá a disminuir la producción agrícola.

Las problemáticas ambientales propias de la provincia de Buenos Aires, son la pérdida de fertilidad de los suelos, cuyas manifestaciones más evidentes se visualizan en un aceleramiento de los procesos de erosión hídrica y eólica, salinización y anegamiento. La fertilidad de los suelos de la pampa húmeda, generó una convicción a una explotación agrícola desmedida sin haberse desarrollado paralelamente una cultura ambiental que alertara sobre las limitaciones de los sistemas naturales. La presión creciente del uso de la tierra como consecuencia del proceso de agriculturización llevado a cabo en las últimas décadas, ha puesto de manifiesto la irracionalidad de algunos sistemas agro-productivos.

La erosión hídrica se manifiesta en formas que van de moderadas a severas en aproximadamente el 24.6% del área de Bs.As. en el ámbito ecológicamente mejor dotado del país (Contreras, 2011). Una región que ha sufrido los efectos del deterioro creciente es la pampa ondulada, donde la secuencia trigo-soja en un mismo ciclo agrícola produce un aumento en el laboreo de los suelos modificando la estructura de los mismos. Por ello, la lluvia constante unida a pendientes pronunciadas provocan un arrastre anual de suelo fértil del orden de 50 tn/ha (Federico, 2011).

El proceso de salinización se ha extendido en el noroeste del territorio bonaerense como consecuencia de las inundaciones ocurridas en la década de los ochenta, mientras que hasta este momento afectaba preferentemente las áreas anegadizas de la cuenca del río Salado, donde a este aumento en el régimen de lluvias se unen a la escasa pendiente de drenaje y fenómenos de saturación o hidromorfismo. Zonas de cultivo intensivo como la de CORFO Río Colorado, ubicada en la desembocadura del río homónimo, en algunos sectores han sido afectadas por la salinización, debido a la falta de canales de desagüe que agilicen el escurrimiento de las aguas con exceso de sales en disolución (Contreras, 2011).

En la actualidad unas cuatro mil de hectáreas en territorio provincial se hallan bajo el efecto de la erosión eólica y representa alrededor del 12% de la superficie. Sobre todo se manifiesta en el oeste, incentivado por el mal manejo de los sistemas naturales a pesar de haber transitado un ciclo húmedo -desde el punto de vista climático-, como por ejemplo el fenómeno del Niño en el Pacífico.

Un problema ambiental de gran envergadura está representado por la gran cantidad de residuos sólidos que se producen en los centros urbanos. En Buenos Aires, se recolectan aproximadamente 13 mil toneladas diarias de basura (Bróndolo, 1995), existen municipios que poseen basureros clandestinos,

y en consecuencia se genera una mayor contaminación al medio ambiente.

El aumento de la contaminación hídrica en los centros urbanos es el resultado de diversos factores como: la ausencia de plantas de tratamiento de efluentes y el vertido de aguas servidas o con escaso tratamiento a ríos, arroyos y lagunas que no tiene suficiente capacidad de depuración. Un ejemplo clásico lo constituye el sistema de los ríos Matanza-Riachuelo, en cuya cuenca se asienta una población cercana a los 4 millones de habitantes, correspondiente a las localidades más pobladas del Gran Buenos Aires y Capital Federal, donde se estima que existen unos 15 mil establecimientos industriales los cuales descargan sus desechos al mismo. De ellos, aproximadamente el 65 % carecen de plantas de tratamiento y sólo el 3 % de las que están en funcionamiento realizan procesos de depuración (Morello, 2000).

Otra de las problemáticas recurrentes que se presenta en Buenos Aires, son las sequías e inundaciones. El factor de impulso para producir una inundación son las precipitaciones, en sentido estricto, resultado del exceso que se registra en el balance hídrico entre precipitación, evaporación e infiltración en un plazo y área determinada. Mientras que la sequía, se genera a partir de un decrecimiento en los promedios de precipitación en relación a la necesidad de agua en un período y área particular.

Para interpretar y explicar la ocurrencia de ambos fenómenos, existen causas directas como los datos proporcionados por los balances hídricos que indican áreas de déficit o exceso de agua y causas indirectas dadas por el comportamiento de los sistemas naturales y las alteraciones provocadas por catástrofes de la misma naturaleza o la acción del hombre.

Los componentes del marco natural: relieve, clima, suelo, vegetación, recursos hídricos superficiales y subterráneos en constante interacción y equilibrio dinámico, son los condicionantes principales de las sequías e inundaciones en la provincia de Buenos Aires, aunque la intervención humana a veces provoca eventos recurrentes.

Por otra parte, la desigual distribución de la energía solar produce variaciones de temperatura que originan gradientes de presión, los cuales rigen la circulación de los vientos. Así mismo, las condiciones atmosféricas de la región pueden dar lugar a precipitación, lo cual constituye un factor importante sobre la vegetación y en los suelos.

### **1.1.3. Contexto histórico de problemas ambientales en Argentina.**

Los problemas ambientales de la Argentina tienen su origen en el desarrollo regional y de factores internos que se originan básicamente de las modalidades de uso del espacio, del avance de las fronteras agrícola y urbana, del crecimiento no planificado y de políticas aplicadas a lo largo del tiempo.

Problemas ambientales derivados de las modalidades de uso del espacio parten desde el punto de vista físico, el estilo de desarrollo en la Argentina estuvo controlado por la preponderancia de la

oferta natural, especialmente de maderas de alto valor comercial y suelos agrícolas. Todo el sistema ferroviario nacional hoy depauperado, asentó sus vías sobre durmientes imputrescibles de una única especie compartida con Paraguay y Bolivia, el quebracho colorado santiagueño (*Schinopsis lorentzii*). En cuanto a los suelos agrícolas, la oferta natural surge de la combinación de suelos fértiles y precipitaciones adecuadas en un tercio de su territorio. El crecimiento de la ganadería y la agricultura en las tierras más fértiles de la Argentina, no sólo ha sido desmesurado en relación con el de otros recursos en el resto del país, sino que ha sido muy degradante, a causa de la racionalidad economicista.

El modelo sofisticado tiene un fuerte componente de insumos importados pero sin incorporar masivamente ni riego suplementario ni fertilización. El proceso dominante que ha llevado a este estado actual se desencadenó desde la década de los 60's y ha sido el paso de la agroganadería en rotaciones de 12 años a la agricultura permanente. Más tarde, se produce el pasaje de una agricultura predominantemente de cereales a la combinación cereales y oleaginosas con una tendencia actual a la producción exclusiva de oleaginosas (soja y canola), en dos cultivos al año o tres en dos años. En el Chaco semiárido las multinacionales están operando desde 1994 con desmonte, habilitación de tierra y doble cultivo (algodón/soja) bajo riego.

Las consecuencias ambientales son pérdida de la biodiversidad natural por sobreuso o mal uso de plaguicidas, pérdida de fertilidad por mal uso de fertilizantes, la persistente pérdida de suelo, de estructura y de capacidad de retención del agua. En la década de los 80's, el cultivo de la soja, altamente demandante de agroquímicos y agua, se practicaba con un paquete tecnológico incompleto, sin la fertilización adecuada y sin riego (Morello, 2000).

La agricultura de riego produce procesos de salinización de lenta reconversión en espacios dotados de una infraestructura de riego por gravedad de muy alto costo. Las técnicas de riego por goteo y por aspersión con pivote central, son muy poco practicados. Se usan para alfalfares de semilla importada o producciones de muy alto valor.

Otro recurso histórico ha sido el bosque, el cual ha sufrido una gran reducción de superficie, de 425,000  $km^2$  antes de la colonia a 280,000  $km^2$  estimados en 1992 (Morello, 2000). La vegetación leñosa, incluyendo bosques, arbustales y estepas arbustivas, que cubría el 61.4% del territorio, se redujo al 36% en dicho período (Morello, 2000). A esto cabe agregar que los espacios boscosos remanentes se encuentran en un estado variable de deterioro. La razón básica de esta situación es el potencial de uso múltiple de las tierras boscosas. El 65% de las tierras de bosques nativos tienen uso potencial agrícola; 85% de los bosques nativos tienen uso potencial y actual ganadero (Morello, 2000). La pérdida de los recursos boscosos ocurrió por el avance de las explotaciones ganaderas, forestales, agrícolas y

silviculturales.

La ganadería de monte se practica desde la colonia, tanto en vacuno como en lanar y caprino. La ganadería de monte produce daño por ramoneo de los renuevos, descortezamiento de los árboles de más edad, disminuye el banco de semillas por granivoría en especies con frutos palatables, pero especialmente porque los árboles dañados producen menos semilla. El resultado es un bosque deteriorado, con árboles deformados y de bajo rendimiento y con compactación del suelo por pisoteo. Todo esto atenta contra las posibilidades de regeneración de un bosque nativo. La deforestación con fuego se ha estado utilizando masivamente en el Chaco y en los bosques andinopatagónicos, para ampliar las tierras para ganadería. En el Chaco, la quema fue usada en los períodos prehispanicos por las etnias chaqueñas para concentrar la caza, aumentar la visibilidad, comunicarse, guerrear y limpiar el terreno para los cultivos de maíz y mandioca (Morello, 2000). Desde principios del siglo, el manejo del balance sabana/bosque en el Chaco se hace con el fuego, y más tarde con la tala rasa, con poco o nada de aprovechamiento de los recursos leñosos.

Otro problema ambiental son los incendios. Los sistemas de control de incendios son inadecuados y el explosivo desarrollo de grandes superficies de coníferas plantadas sin adecuados guardafuegos y sistemas de prevención son el problema ambiental más grave.

En el Sur, desde hace más de 150 años el bosque austral es sometido a la quema para proteger la lana del ganado ovino. En Tierra del Fuego, hasta 1985 se quemaban los bosques de lenga (*Nothofagus pumilio*) para abrir campo a la ganadería (Morello, 2000).

El avance de la frontera agrícola también ha sido causal de la fragmentación y achicamiento de los bosques, especialmente en la Pampa, donde desde la segunda mitad del siglo XIX se talan y desmontan las pocas formaciones boscosas de la zona, con la extinción local de varias formaciones leñosas (algarrobales, caldenales, bosques tala-mistol, tipa-pacará y palo blanco-palo amarillo) quedando fragmentos remanentes en los ecotonos con afloramientos rocosos o pendientes fuertes. El avance de la frontera agrícola en el Chaco en la década de 1970-80 aceleró el desmonte de grandes extensiones de bosques y arbustales.

Las superficies, estados y factibilidad, y costo de recuperación de estos ecosistemas es desconocida. Sí se conocen algunos de los factores de deterioro, entre los cuales figura el uso múltiple, no planificado ni controlado de otros recursos del bosque.

La silvicultura también atenta contra los bosques nativos. La plantación de especies de crecimiento rápido en las tres ecorregiones donde la actividad es más significativa (selva misionera, selva tucumano-oranense y bosque austral) se hace sobre desmontes, entre ellos de los 4 bosques de coníferas que poseía la Argentina: el de *Podocarpus parlatorei* (selva tucumano-oranense); el de *Araucaria angustifolia* (selva misionera); y los de *Araucaria araucana* y *Austrocedrus chilensis* (bosque austral).

## 1. INTRODUCCIÓN

---

Este proceso de desmontar bosques de coníferas de velocidades de crecimiento variables (primer corte entre 15 y 20 años en *A. angustifolia* y 60 años en *A. chilensis*) es una de las agresiones al patrimonio genético forestal más salvajes que se han hecho en el país. Se han convertido en plantaciones 120,000 a 130,000 has de la selva misionera; 16,000 a 20,000 has de la selva tucumano-oranense y 20,000 a 35,000 has del bosque austral. La fragmentación del bosque nativo es preocupante.

En el caso particular de la provincia de Buenos Aires la alternancia de sequías e inundaciones es un fenómeno recurrente. Sin embargo, a partir de la década de los 70's se intensificó el ciclo húmedo, con cambio notable en las precipitaciones entre 1971-1984, cuando se registró un incremento de las mismas que determinó áreas con un exceso de precipitación, entre 50-150 mm/año. Durante ese período las áreas anegadas ocuparon aproximadamente el 50% de la superficie provincial. Además, este aumento de los registros pluviométricos provoca un desplazamiento de la isoyeta de 1,100 mm. hasta cercanías de la ciudad de Bs. As. (Bróndolo, 1995).

A estas causas directas se suman las indirectas porque la fuerte interrelación que existe entre las condiciones naturales como son el relieve de escasa pendiente, las características edáficas, el clima y la vegetación es alterada por la acción del hombre. El escurrimiento deficiente es agravado por obras de infraestructura como caminos, ferrocarriles, canales artificiales, constituyendo una combinación casi perfecta para que se produzca las inundaciones en la provincia de Buenos Aires.

A continuación se muestra una tabla con las inundaciones importantes que afectaron distintas zonas de la provincia de Buenos Aires.

**Tabla 1.1:** Elaborado y actualizado a partir de DOMINGUEZ, D.Y. y CARBALLO, S. *Inundaciones de la provincia. de Buenos Aires*, Período 1972/86, PROSA. Bs. As; 1988.)

Mes/meses	Año	Lugar
<b>Septiembre-Diciembre</b>	1972	
<b>Enero- Diciembre</b>	1973	Noroeste de la provincia de Bs. As.
<b>Enero-Marzo</b>	1974	
<b>Junio-Agosto</b>	1978	Pampa deprimida
<b>Octubre-Noviembre</b>	1978	
<b>Julio</b>	1978	Río Arrecifes
<b>Abril-Mayo</b>	1980	Pampa deprimida
	Sierras de Ventana y Tandil	
<b>Septiembre-Diciembre</b>	1979	
<b>Julio</b>	1980	Desbordes del Río Quinto
<b>Junio- Agosto</b>	1981	
<b>Septiembre</b>	1982	Al Norte del Río Salado
	Vertiente al Río de la Plata	
<b>Febrero-Abril</b>	1984	Noroeste de la provincia de Bs. As.
<b>Octubre</b>	1984	
<b>Julio</b>	1978	Tres Arroyos
<b>Junio-October</b>	1984	Desbordes del Río Quinto
<b>Mayo</b>	1985	Capital Federal y alrededores
<b>Octubre-Diciembre</b>	1985	Totalidad de provincia
<b>Enero-Diciembre</b>	1986	Noroeste de la provincia de Bs. As.
<b>Noviembre –Mayo</b>	1985-86	Desbordes del río Quinto
<b>Mediados</b>	1987	Norte bonaerense
<b>Diciembre</b>	1991	Norte bonaerense y Balcarce
<b>Noviembre</b>	1993	Buenos Aires y Gran Bs. As.
<b>Abril</b>	1995	Norte de la provincia de Buenos Aires.

El riesgo de inundación en la provincia se ha detectado en distintas áreas que se pueden diferenciar por las causas que originan los excesos de agua y que están en relacionadas a las características y comportamiento natural de las subunidades geomorfológicas que las contienen como también al uso del suelo y a las diferentes obras creadas durante el proceso de ocupación.

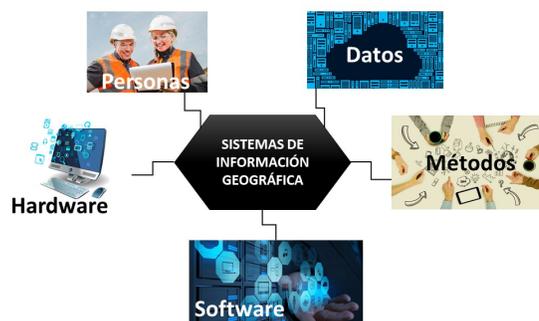
### 1.1.4. Tecnologías de la Información Geográfica

La evolución tecnológica ha generado una serie de innovaciones en el uso y manejo de la información, que permite generar conocimientos para dar respuestas a problemas multidisciplinares. Las Tecnologías de la Información Geográfica cuentan con varias disciplinas, que trabajan en conjunto para el desarrollo de diferentes investigaciones. Uno de los ejemplos más importantes de la innovación tecnológica, son los Sistemas de Información Geográfica (SIG), ya que presentan diversos avances en software como en las diferentes aplicaciones a nivel mundial. Es por ello, que tiene una gran variedad de definiciones, algunas son:

- Conjunto de herramientas diseñadas para obtener, almacenar, recuperar y desplegar datos espaciales del mundo real (INEGI).
- Sistema empleado para describir y categorizar la Tierra y otras geografías con el objetivo de mostrar y analizar la información a la que se hace referencia espacialmente. (IGN).
- Sistemas que permiten almacenar datos espaciales para su consulta, manipulación y representación (Massera).

Cada una ejemplificando sus funciones, pero de manera más general puede definir como conjunto de información de datos espaciales, que permite almacenar, manipular, procesar y representar de manera gráfica. Toda la información que se incorpore a un SIG, debe estar georreferenciada, esto permite realizar consultas y operaciones algebraicas entre capas de información, ofreciendo la capacidad de evaluar problemas o temáticas de interés de la misma forma.

Un SIG esta compuesto por diferentes elementos, podemos considerar los siguientes, como factores básicos:



**Figura 1.4:** Mapa mental de los Sistemas de Información Geográfica, elaboración propia. (Mayo 2019)

**Datos.** Los datos son la materia prima necesaria para el trabajo en un SIG, y los que contienen la información geográfica vital para la propia existencia de los SIG.

**Métodos.** Conjunto de formulaciones y metodologías a aplicar sobre los datos.

**Software.** Aplicación informática para manipular los datos e implementar los métodos anteriores.

**Hardware.** Equipo necesario para ejecutar el software.

**Personas.** El recurso humano es parte fundamental en el desarrollo de un SIG, se puede encontrar en diversas etapas del desarrollo, desde el diseño y el implemento del software, hasta la toma de decisiones y en usuarios finales a quienes es útil el SIG.

El Sig tiene la capacidad de gestionar información espacial en escalas locales, regionales, nacionales y globales; convirtiéndose en una de las herramientas fundamentales para el desarrollo de investigaciones y la resolución de problemas.

Entre los softwares más comunes empleados en los SIG, se encuentra ArcGis y Qgis (el primero requiere licencia y el segundo es software libre) pero el constante avance ha ido provocando la búsqueda de más alternativas para la ejecución y desarrollo de los SIG. Algunas de las alternativas de software de código libre son:

- SAGA GIS, desarrollado por el equipo de J. Böhrner y O. Conrad, en el Instituto de Geografía, la Sección de Geografía Física, Klimacampus y la Universidad de Hamburgo, Alemania.
- gvGIS, desarrollado por la Asociación gvSIG, en Valencia, España.
- GRASS, desarrollado originalmente por los laboratorios de investigación de ingeniería de construcción del ejército de EE. UU.
- OpenJUMP, desarrollado por usuarios de SIG a nivel mundial, en el lenguaje de programación Java, su primer diseño fue a cargo de Vivid Solutions.

Otra alternativa de software es:

- IDRISI GIS, es una herramienta de análisis dentro del software TerrSet, desarrollado por Clark Labs, en la reconocida Escuela de Geografía en la Universidad de Clark en Worcester, Massachusetts, EE. UU., su uso requiere licencia.

Todas estas alternativas son el resultado del continuo avance de la tecnología, el cual va modificándose día a día. Los temas de interés para la aplicación de un SIG son tan variados, que podemos encontrar desde el uso gubernamental hasta del sector privado. Una de las características principales de un SIG, es que nos permite realizar un análisis multidisciplinario, planteando las diferentes variables de un problema. Existen muchos temas de interés, que son prioritarios para el desarrollo de investigaciones,

uno de ellos es el medio ambiente. En este caso, se tiene la necesidad de analizar diferentes áreas que construyen los problemas de éste. Siendo un tema de gran relevancia a nivel mundial y contando con muchas variables, de acuerdo cada área de estudio, se considera de manera esencial el implemento de los SIG para el desarrollo de la investigación.

### 1.1.5. El uso de los TIG en Argentina y en México.

Las Tecnologías de la Información Geográfica han avanzado de acuerdo a las necesidades que presenta el entorno y en algunos casos en respuesta a diferentes problemáticas.

En Argentina se cuenta con varias instituciones que proporciona información pública para el empleo de los TIG, como el IGN (Instituto Geográfico Nacional), que tiene como objetivos estratégicos:

- Producir y promover la generación de conocimiento e información geográfica precisa, oportuna y concisa, imprescindible para el desarrollo integral del país.
- Entender en la representación oficial del territorio nacional y en la elaboración de los marcos normativos para su realización y fiscalización.
- Promover la difusión de conocimiento y publicar información geográfica en diferentes formatos de manera tal que sea accesible en forma oportuna para la toma de decisiones, como así también para toda la ciudadanía.

E IGN<sup>1</sup> distribuye su información en diferentes ramas, para que los usuarios públicos pueden acceder a la información de manera más fácil. Sus principales apartados son:

- **Información geoespacial:** se pueden encontrar capas de Sistemas de Información Geográfica, que son un conjunto de datos surgido del proyecto SIG 250, realizado por el Instituto hasta el año 2000. El Instituto trabaja permanentemente en la actualización de su base de datos geográfica y en su adecuación a las diferentes normas y estándares. También ofrece acceso a su Base de Datos Geoespacial a través de la publicación de los servicios web WMS y WFS conforme a los estándares del Open Geospatial Consortium (OGC) y ajustándose a las normas y estándares internacionales vigentes.
- **Geografía:** cuenta con un nomenclador geográfico, que permite buscar objetos geográficos a partir de nombres geográficos o topónimos, datos geográficos de la República Argentina y el procedimiento para la aprobación de obras y publicaciones que representan el territorio nacional.

---

<sup>1</sup>Instituto Geográfico Nacional de Argentina. <http://www.ign.gob.ar/>

- **Geodesia:** Contiene archivos GPS de redes geodésicas de estaciones GNSS permanentes y de vértices geodésicos de "Posiciones Geodésicas Argentinas 2007", correcciones diferenciales GPS/GNSS en tiempo real, modelo de geoide de Argentina y modelos digitales de elevación, red de nivelación y gravimétrica de Argentina y un Repositorio digital de publicaciones geodésicas del IGN.
- **Cartografía:** se encuentran el sistema de producción para la generación de la cartografía del IGN, manual de signos cartográficos del IGN y formas para elaborar cartografía y talleres gráficos del IGN para la impresión de cartografía y otros productos editoriales.
- **Fotogrametría:** cuenta con sistemas fotogramétrico que utiliza el IGN en los relevamientos aéreos, productos y servicios aerofotogramétricos que ofrece el IGN y mapa con los vuelos fotogramétricos realizados por el IGN desde el año 2011.
- **Datos abiertos:** se cuenta con una transparencia activa, es decir, a partir del 1 de junio de 2018 la Administración Pública Nacional sumó una sección de transparencia activa en sus sitios web, brindando un acceso a la Información Pública.

Otras institución que proporciona información para el desarrollo de TIG, es el CONAE<sup>1</sup> (Comisión Nacional de Actividades Espaciales), es la agencia del gobierno argentino responsable del programa espacial de Argentina.

También en México el uso de las TIG, es algo vital en el sector público y privado, para ello es necesario tener fuentes de información oficiales y confiables que permitan trabajar con las TIG, la más conocida es el INEGI<sup>2</sup> (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), organismo público autónomo responsable de normar y coordinar el Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica, así como de captar y difundir información de México en cuanto al territorio, los recursos, la población y economía, que permita dar conocer las características de nuestro país y ayudar a la toma de decisiones. El INEGI proporciona una gran cantidad de información, pero en el área de las TIG cuenta con diferentes apartados con la información correspondiente.

El Instituto elabora información geográfica del relieve, la vegetación, clima, suelo, agua y localidades, entre otros temas. Ésta la presenta mediante cartas impresas y cartografía digital. La información sobre las características del territorio y medio ambiente que ofrece en cartas impresas y archivos digitales son:

- **Geodesia.** Conjunto de datos obtenidos en todo el territorio nacional que permiten relacionarlo a un sistema de referencia con el fin de determinar la forma, extensión y dimensiones nacionales.

---

<sup>1</sup>CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales) <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae>

<sup>2</sup>INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) <https://www.inegi.org.mx/>

Sirve de marco de referencia de los productos cartográficos del país y es la base que permite a la fotogrametría escalar, orientar y referenciar los rasgos plasmados en las fotografías aéreas.

- **Topografía.** Información sobre la ubicación, forma y dimensiones de los rasgos naturales y las obras hechas por el hombre, esto es, del relieve, corrientes y cuerpos de agua, localidades y vías de comunicación, entre otros.
- **Toponimia.** Son los nombres geográficos del país que permiten ubicar administrativa y geográficamente los lugares; tienen referencia en la cartografía topográfica.
- **Recursos Naturales.** Datos sobre la distribución y características de la vegetación, los tipos de suelos, el agua superficial y subterránea, las rocas y el clima.
- **Cartografía urbana.** Es la representación gráfica de todas las localidades con más de 2 500 habitantes, además de las cabeceras municipales existentes en el país, al momento de la realización de los diferentes eventos censales. Contiene nombres de calles y ubicación de los principales servicios. Se cuenta con información desde 1990.
- **Marco Geoestadístico.** Se utiliza para referenciar geográficamente la información estadística de los censos. Asimismo, proporciona la ubicación de localidades, municipios y entidades del país, utilizando coordenadas geográficas.
- **Catastro.** Registro de las características de los predios a través de datos homogéneos, estructurados, organizados y relacionados, cuyo propósito final es la integración de una base cartográfica catastral nacional. El Instituto apoya la organización de los catastros del país en los distintos órdenes de gobierno y colabora en la expedición de las normas técnicas en esta materia.

Productos de Percepción Remota que dispone el INEGI son:

- **Fotografía aérea.** El INEGI cuenta con un acervo de fotografías analógicas a diferentes escalas de vuelos regulares, y especiales en áreas de desastres, del cual ofrece el servicio de reproducción. Se tiene disponible un acervo de imágenes de todo el país de 1970 a la fecha.
- **Ortofotos digitales.** Imágenes derivadas de las fotografías aéreas a las que se eliminan las deformaciones causadas por la óptica de la cámara y el desplazamiento del relieve; cuenta, además, con referencia geográfica. Estas dos características hacen posible ubicar posiciones y áreas de los rasgos geográficos y determinar distancias.
- **Derivados de vuelos LIDAR** (Light Detection and Ranging). Sistema de detección y medición a través de luz láser. El INEGI ofrece la nube de puntos, malla con 5 y 15 metros de resolución de los modelos de superficie y de terreno.

- Imágenes de satélite. El INEGI procesa estas imágenes, las cuales, de acuerdo a la normatividad vigente, sólo se distribuyen a instituciones del sector público.

El compendio de datos descritos anteriormente proporciona una gran herramienta para el uso de los TIG, pero no es la única fuente de información, existen otras instituciones que de igual manera cuentan con información de uso público, como SEMARNAT<sup>1</sup> (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales), CONABIO<sup>2</sup> (Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad) y CENAPRED<sup>3</sup> (Centro Nacional de Prevención de Desastres). Que son considerados de confiables, pero en la actualidad existen muchos portales que ofrecen información geográfica y muchas propuestas de plataformas para generar repositorios más extensos y de uso público para la información.

Comparando ambos países cuentan con la misma necesidad del implemento de Sistemas de Información Geográfica, y se están desarrollando diferentes investigaciones, lo que pone a ambos países en un buen nivel en la resolución de problemas. La diferencia principal que se puede observar, son las fuentes de información.

México cuenta con más instituciones que proporcionan información, teniendo más alternativas de información, tanto en características como en versiones de la misma. Una de las principales razones por la que existen esta diferencia, se refiere a la facilidad de obtener información de campo, debido a que México ido buscado renovar la información a través de estudios topográficos e implementando el uso de la tecnología para cubrir la mayor parte de país.

Otra de las razones, que se pueden apreciar es la diferencia superficial que tiene ambos países, por lo cual es más complicado la actualización de información para Argentina. También el aspecto económico es otra variante primordial en el desarrollo de los TIG, pues cualquier estudio de campo requiere de financiamiento para su ejecución.

En cuestiones económicas Argentina ha sufrido las turbulencias financieras durante el 2018, que impactaron en una depreciación del 50,6% del peso argentino, implicaron la revisión del plan económico y un acuerdo con el Fondo Monetario Internacional (FMI), por unos US \$57,000 millones hasta 2021, que incluye una fuerte reducción del gasto. En 2018, el Gobierno cumplió sus objetivos fiscales, y apunta lograr el equilibrio fiscal primario en 2019 y un superávit fiscal primario de un 1% en 2020 (BancoMundial, 2019a).

Mientras que la economía mexicana se expandió a un ritmo moderado de 2% anual durante la primera mitad de 2018, por debajo de su crecimiento potencial, ya que la incertidumbre ante la renegociación

---

<sup>1</sup>SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales)<https://www.gob.mx/semarnat>

<sup>2</sup>CONABIO (Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad. <https://www.gob.mx/conabio>

<sup>3</sup>CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres) <https://www.gob.mx/cenapred>

del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) y en torno a las elecciones pasadas elecciones presidenciales pesó sobre la inversión (BancoMundial, 2019b).

Con las elecciones atrás y el Acuerdo Estados Unidos-México-Canadá (AEUMC), los factores de incertidumbre pasados deberían desvanecerse, ayudando a respaldar una mayor recuperación, aunque moderada, de la inversión. En resumen, la economía mexicana se ha comportado de manera estable, lo que permite la inversión en diferentes proyectos para la actualización de la información, la renovación de equipos y formas de procesamiento, que permiten que México cuente con una mayor fuente de información pública. Esto se ve como un panorama favorable para México, pero no limita a Argentina, ya que los investigadores buscan la manera de lograr desarrollar trabajos con las TIG y se mantienen actualizados con los avances que se van desarrollando a nivel mundial, logrando tener un nivel muy similar al que se tiene en México.

### **1.2. Justificación de la investigación**

Las TIG ocupan hoy en día un lugar central en el abordaje de problemáticas especialmente en lo que se refiere a ciencias de la tierra y también en la organización de las actividades humanas. Los avances tecnológicos han permitido a las ciencias, y como se expresó anteriormente a las ciencias de la tierra, incorporar a su objeto de estudio, diferentes herramientas de última tecnología convirtiéndose en nuevas metodologías que permiten la implementación de modelos de análisis y simulación de fenómenos para la generación de información que apoye la toma de decisiones. Todas estas nuevas tecnologías han dado a lugar a la creación de un nuevo cuerpo de conocimiento para el tratamiento de las problemáticas ambientales. La problemática ambiental mundial más significativa es el cambio climático. La preocupación se ha incrementado debido a varias investigaciones, que argumentan las transformaciones que tiene el planeta. Cada día se aprecian cambios en las ciudades, aumenta la cantidad de basura en las calles, la cantidad de demanda de servicios públicos que no logran cubrir a la población, la desaparición de especies y sobre todo en los fenómenos naturales inusuales que se presentan. Pero las cosas más alarmantes son las cifras que cada día se generan a nivel mundial y se revelan en los diversos estudios.

Las TIG han contribuido a abordar temas tan importantes para la investigación como es el cambio climático. El cambio climático tiene muchas áreas de estudio, algunas de ellas, son las inundaciones y las sequías, que se relacionan estrictamente con la presencia de lagos y lagunas y su vez con las características que presentan y que forman parte del desarrollo de la investigación. Una de las consecuencias de esta problemática es la alteración de los cuerpos de agua continentales tanto en su calidad, morfometría y uso.

### 1.2.1. Medio ambiente

La definición del medio ambiente ha sido tema muy concurrente, pues cada autor nos argumenta el sentido que tiene y sobre todo la extensión de este concepto que en las últimas décadas ha sido muy utilizado. En las distintas definiciones se establecen diferencias que es necesario aclarar, sobre todo entre medio y ambiente. Varios autores señalan que con medio se “alude a un sustrato físico sobre el que se desenvuelven ciertas actividades vitales” (Bróndolo, 1995), por ejemplo, se distingue un medio acuático, frente a un medio aéreo o terrestre.

En cuanto a ambiente, se maneja un término más restringido a la genética, que engloba al “conjunto de factores exteriores a un organismo que modifican su aspecto o fenotipo, es decir, el conjunto de influencias opuesto a las características innatas o provenientes del genotipo”.

También se expresa que cuando se habla de ambiente o de medio se alude a aspectos concretos del medio natural, pero al mencionar medio ambiente se entiende la problemática en relación con el hombre, en especial el industrial, con la biosfera, la contaminación, el agotamiento de recursos, la desertización, etc. (Capitanelli, 1998).

La definición más científica y admitida casi unánimemente, es la dada por el coloquio de Aix-en-Provence, en 1972, que considera al medio ambiente como “el conjunto de seres y factores que constituyen el espacio próximo o lejano del hombre, sobre todo lo que pueden actuar, pero recíprocamente pueden actuar sobre él y determinar, total o parcialmente, su existencia o modos de vida”. Al referirse a los factores incluyen no sólo los físicos y biológicos, si no el conjunto de fenómenos sociales en su relación con el medio.

El conjunto de problemas planteados adquieren conciencia de las relaciones de interdependencia entre el hombre, como ser social y el medio. Correspondiente a la mirada crítica que el hombre dirige al medio y a su propio comportamiento en él, con vistas a traducirla en una acción. Capitanelli (1998, afirma: “ El medio ambiente, es el medio no sólo vivido y pensado, si no también actuado”

### 1.2.2. Características

Las características del medio ambiente son muy variadas y específicas, de acuerdo al área, a la diversidad y variabilidad de los recursos que posee la región en donde se va a trabajar. En el caso de Buenos Aires, las características del medio ambiente están relacionadas a sus condiciones geomorfológicas de llanura, con un drenaje superficial influenciado por la fracturación del basamento cristalino, que se manifiesta principalmente en las riberas de los ríos de la Plata y Salado y la depresión

## 1. INTRODUCCIÓN

---

tectónica de la bahía Blanca. Consecuencia de esta geomorfología particular existen en la provincia una gran cantidad de lagunas de diferentes tamaños, morfometría y calidad de sus aguas. Estos cuerpos de agua cumplen funciones ambientales vitales. Una de estas lagunas es la laguna de Sauce Grande.

El tamaño de las cuencas hidrográficas en el país, determinan que estas formen parte de varios límites jurisdiccionales, administrativos o políticos con una fuerte influencia en el medio ambiente. Así existen cuencas transfronterizas como es el caso de la cuenca del Río de la Plata, interjurisdiccional y en el caso de la provincia de Buenos Aires que abarcan varios partidos<sup>1</sup>. En estos casos, distintas comunidades comparten una cuenca, por lo tanto los residentes de todas las ciudades y estados deben gestionar de manera conjunta las temáticas referidas a la gestión del agua.

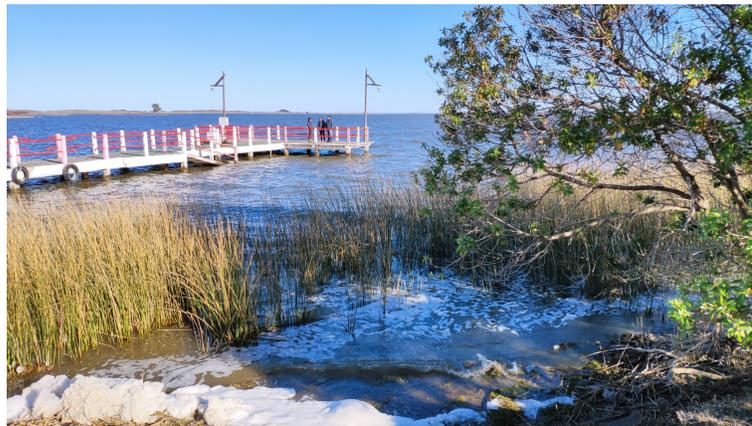
Otro de los factores que caracteriza al medio ambiente es la precipitación, el Atlas Nacional Interactivo de Argentina (ANIDA, 2019) dice, que el territorio argentino se divide en tres regiones características: húmeda, semiárida y árida. El rango de precipitaciones medias anuales varía: menos de 50 mm en ciertas regiones de las provincias de San Juan y La Rioja -que corresponden a las zonas más áridas del país-, a más de 2,000 mm en la región subandina del noroeste y en la región de la selva misionera en el noreste. El agua pasa a ser un factor fundamental tanto por la falta como por exceso. La provincia de Buenos Aires no es ajena a esto dado que la isoyeta de 500 mm separa un ambiente semiárido de semihúmedo.

---

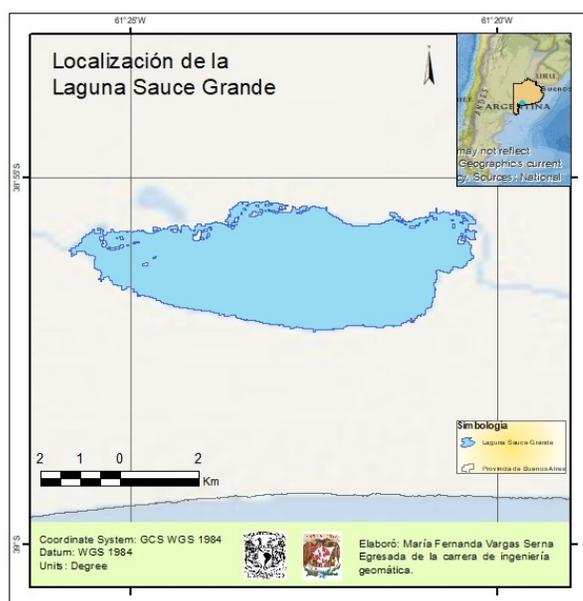
<sup>1</sup>En Argentina se denomina provincia a cada uno de los 23 estados, que a su vez se dividen en Departamentos.

### 1.3. Área de estudio.

Buenos Aires es una de las provincias más grandes de Argentina y cuenta con ambientes diferenciados dentro de sí misma. Uno de los ambientes más particulares son los costeros y en particular las lagunas que forman parte del mismo. Este es el caso de la laguna Sauce Grande localizada en el partido de Monte Hermoso. El partido de Monte Hermoso, se ubica al sur de Buenos Aires, cuenta con una superficie de  $209\text{km}^2$ , (Bróndolo, 1995). La laguna Sauce Grande ( $38^{\circ}57'S$ ,  $61^{\circ}24'O$ ) se localiza en el Sudoeste de la provincia de Buenos Aires Laguna. Es un cuerpo de agua originado por deflación sobre el cauce fluvial preexistente del río Sauce Grande que nace en las sierras de Ventania, y descarga sus aguas al mismo, poco antes de su desembocadura en el Océano Atlántico. Sus costas por lo general se caracteriza por suaves declives. La laguna se forma por endicamiento costero. La forma que caracteriza a este tipo de lagunas es alargada, siguiendo la orientación de los médanos, en este caso orientación O-E. Si bien sus bordes no son regulares, y son altamente dependientes de las precipitaciones (Geraldí, 2009). El fondo de la laguna es casi todo de barro aunque en la parte sur está formado por conchilla. Desde el punto de vista biogeográfico se ubica en el límite entre las Provincias Pampeana y del Espinal siendo la vegetación predominante la estepa graminosa (Cabrera, 1994). En este espejo de agua se desarrollan numerosas actividades recreativas, siendo uno de los principales atractivos la pesca deportiva de pejerrey (Fernández, 2003). El clima en el que se desarrolla es templado de transición, con isotermas entre valores de  $14^{\circ}$  y  $15^{\circ}$  C y con precipitaciones anuales que oscilan entre 600 y 700 mm (de Ferreras *et al.*, 2004). El río Sauce Grande vierte sus aguas en la laguna Sauce Grande, la cual a su vez derrama sus aguas por intermedio de un pequeño valle casi paralelo a la costa marítima del Mar Argentino. La cuenca de la laguna presenta un área de  $3027\text{ km}^2$  y un perímetro de 360.5 km e incluye la cuenca del arroyo Los Leones.



**Figura 1.5:** Fotografía de la Laguna Sauce Grande, Monte Hermoso, Bs.As. Tomada en trabajo de campo.



**Figura 1.6:** Mapa de localización de la Laguna Sauce Grande, Monte Hermoso, Bs.As.

### 1.4. Problemática

Como se ha descrito en los temas 1.1.2 y 1.1.3 una problemática importante es la pérdida de calidad de las aguas superficiales, relacionada con la existencia de contaminantes orgánicos y químicos. Esto genera alteraciones de la biodiversidad, en particular de los ecosistemas fluviales y costeros, incluyendo humedales. Las demandas de agua es también un problema importante no solo en Argentina sino a nivel mundial.

La eutrofización es uno de los problemas inminentes en los ecosistemas acuáticos de la provincia y esto es producto del ingreso excesivo de nutrientes principalmente desde fuentes difusas (esto es agricultura, ganadería). Casi la totalidad de las lagunas que se encuentran en la región pampeana son lagunas de llanura de escasa profundidad, con estados eutróficos importantes (Quirós *et al.*, 2002). La gran mayoría presenta una hidroquímica altamente variable y dependiente del uso de su cuenca de drenaje (Quirós y Drago, 1999: en Geraldí, 2009). Los sistemas lagunares en esta región ven acelerados sus procesos naturales de eutrofia por la presión que ejercen los diferentes usos de la tierra, principalmente agricultura y ganadería. Este problema se agrava por el uso de fertilizantes y pesticidas sin el adecuado control. En este sentido en la presente investigación se aborda la problemática de calidad de agua en la laguna Sauce Grande. Con base a lo expuesto en el siguiente apartado se propone el siguiente plan de trabajo.

## 1.5. Planteamiento del problema

Com base a lo anteriormente planteado la pregunta que guía la investigación es: ¿De qué manera las presiones antropogénicas influyen en la alteración de la calidad de agua de la laguna Sauce Grande?

## 1.6. Hipótesis

- a. La laguna Sauce Grande presenta una disminución de la calidad de las aguas producto del ingreso de nutrientes provenientes de fuentes puntuales y difusas y de las presiones antropogénicas.
- b. La aplicación de algoritmos de teledetección y de SIG permiten una evaluación integral de las condiciones ambientales de la laguna.

## 1.7. Objetivos

### Objetivo General:

Determinar la calidad de agua de la laguna Sauce Grande y las presiones antropogénicas que la influyen mediante la aplicación de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica.

### Objetivos específicos:

- Identificar las problemáticas ambientales que influyen en la región.
- Evaluar mediante imágenes satelitales los algoritmos adecuados para determinar la calidad de agua de la laguna.
- Diagnosticar el estado actual de calidad de agua de las lagunas a partir de la determinación de clorofila y sedimentos.
- Establecer los factores antropogénicos que afectan el estado ambiental del cuerpo de agua.
- Modelar los factores que influyen en la presión antropogénica que presenta la laguna.
- Elaborar productos informativos integrales que sirvan de apoyo en la toma decisiones.



## Marco teórico

---

La limnología es la ciencia que estudia las aguas superficiales continentales (del griego limne, divinidad asociada con el agua y de logos tratado o estudio, definición que abarca a los sistemas lóticos -agua corriente- y a los lénticos -agua estancada). La Sociedad Internacional de Limnología, (SIL), define a esta ciencia como el estudio del conjunto de las aguas dulces o epicontinentales (Margalef, 1983 en Domínguez Gómez *et al.*,(2011)). Dentro del estudio de la limnología se encuentran las cuencas lacustres, las cuales se define, como una cuenca cerrada, debido a que sus drenajes se encuentran en lagos y salares. Así como también el tipo de ecosistema que se crea alrededor de la cuenca dependiendo de las condiciones de cada región. Las cuencas lacustres son lagos o lagunas formadas a través de la depresión de su superficie de tierra, la cual quedó sumergida y está completamente llena de agua, generalmente de agua dulce (Banderas y Gózales, 1996 en Domínguez Gómez *et al.*,(2011)).

De manera general, los sistemas acuáticos pueden clasificarse en dos tipos en función de la presencia o no de un flujo.

- Los sistemas lóticos son ambientes con agua en corriente, es decir, en constante flujo, como los ríos, los arroyos, las corrientes, cuyas velocidades de flujo pueden variar ampliamente en función del tamaño de la cuenca de drenaje, de su topografía, del orden y del perfil longitudinal de los canales.
- Los sistemas lénticos son sistemas en los que el agua tiene poco o ningún flujo, como los lagos, lagunas, y los azudes, pues tienden a no poseer flujo direccional.

Los depósitos y algunos de los lagos representan sistemas de transición entre los lóticos y los lénticos porque se comportan como ambientes lóticos en algunas estaciones del año.

La diferenciación entre sistemas lóticos y lénticos es importante porque tiene implicaciones para el monitoreo de las propiedades biogeoquímicas y físicas del agua. En los sistemas lóticos, los constituyentes del cuerpo de agua en solución y en suspensión son transportados de un local a otro por

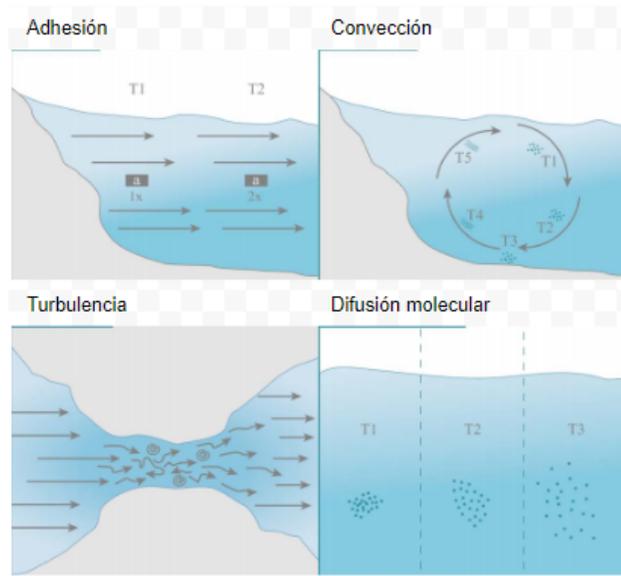
la aparición, o sea, por el movimiento del agua a lo largo del canal, por lo que los sistemas lóticos se caracterizan por el pequeño tiempo de residencia hidráulica, es decir, una elevada tasa de renovación del agua.

El tiempo de residencia se da a la razón entre el volumen de agua almacenada y la variación de dicho volumen en un cierto intervalo de tiempo. Los ríos grandes que fluyen a velocidades del orden de kilómetros por día poseen tiempo de residencia de 20 días, es decir, lleva en promedio 20 días para que toda el agua de una sección muestra, sea totalmente renovada.

En los sistemas lénticos, aunque los procesos venideros pueden ocurrir, son más raros y limitados en el tiempo y en el espacio, dado que el transporte de componentes del agua se da generalmente por procesos convectivos y de dispersión que resultan de la mezcla en la columna de agua. En estos sistemas, los procesos de difusión molecular también son favorecidos por el mayor tiempo de permanencia de contaminantes en el sistema, ya que se caracterizan por un elevado tiempo de residencia hidráulica (Domínguez Gómez *et al.*, 2011).

Las diferencias en el tiempo de residencia hidráulica son importantes para definir la frecuencia de un monitoreo necesario para identificar los cambios en las propiedades biogeoquímicas y físicas de los sistemas acuáticos. Una característica fundamental es que el agua en ríos, lagos, o depósitos está en constante movimiento transportando material particulado y disuelto. El movimiento del agua es el resultado de procesos físicos de transporte que tienen gran influencia sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas de los sistemas acuáticos interiores. Los procesos de transporte más importantes procesos de transporte son:

- **Adhesión:** transporte causado por el movimiento direccional del agua típica de ríos que puede ocurrir en lagos y reservorios por el efecto del cizallamiento del viento en la interfaz entre el aire y la superficie del agua. La velocidad de transporte los constituyentes del agua equivale a la velocidad media del flujo.
- **Convección:** transporte causado por el movimiento vertical del agua resultante de diferencias de densidad a lo largo de la columna de agua.
- **Turbulencia:** transporte causado por el movimiento helicoidal y rápido del agua formando remolinos en la superficie, debido a anomalías en la forma de la columna de agua.
- **Difusión molecular:** transporte causado por el gradiente de concentración de un compuesto dado, por el movimiento aleatorio de moléculas sin que ocurra transporte de la propia agua. Las sustancias son difundidas por el sistema acuático independientemente de la velocidad del flujo de las regiones de alta concentración para las regiones de baja concentración.



**Figura 2.1:** El movimiento del agua

El tiempo de residencia hidráulica de los sistemas acuáticos depende de su régimen hidrológico, que, a su vez, está determinado por las características geológicas, topográficas y climáticas de la cuenca. Entre los factores climáticos, la precipitación es una de las variables más importantes del balance hidrológico de la cuenca y el flujo superficial aumenta y puede alterar la composición físico-química en la columna de agua con el aporte de sedimentos. Por lo tanto, es importante conocer el régimen de precipitación de las cuencas de drenaje en donde se localizan los sistemas acuáticos.

Las condiciones físico ambiental de cada país determinan que los cuerpos de agua sean diferenciados. Existen confusiones en el uso de los términos: lago, laguna, bañado y frecuentemente no se conoce la diferencia entre ellos. A continuación, se presenta la diferenciación entre dichos términos.

Los lagos son cuerpos de agua lénticos que en ningún caso tienen comunicación directa con el mar. La característica principal que lo diferencia de la laguna es la profundidad. Sin embargo, el límite de profundidad para diferenciarlo de una laguna varía según las condiciones ambientales en la que se localice y según los autores. En España, por ejemplo, el límite para diferenciar el lago de una laguna son los 15 m de profundidad (Guanter *et al.*, 2005).

Barbosa *et al.* (2019) establecen el límite para diferenciar un lago de laguna en 3 m. En Argentina, si bien no hay una profundidad establecida, a partir de la cual se define a un cuerpo de agua como lago o laguna, sería adecuada la de 10 m, debido a que en latitudes templadas la termoclina se forma aproximadamente a esta profundidad.

La profundidad de un lago influirá de forma determinante en la estructura y funcionamiento del cuerpo de agua. La penetración de luz, por ejemplo, permitirá diferenciar una zona fótica (hasta donde la luz solar penetra) y otra afótica (donde la luz solar no llega).

La zona fótica define un gradiente térmico (termoclina) que influye en la circulación vertical de las aguas. Así los lagos tienen dos períodos de circulación en un año con dos períodos de estancamiento.

En el verano una masa de agua más caliente se superpone a otra más fría. En el invierno es inversa, la masa de agua más fría es superficial debido a que su temperatura es menor de 4° C y por lo tanto tiene menor densidad de acuerdo con Ringuelet, 1962 en Rivas Raúl,(2011).

En los lagos se distingue perfectamente una zona litoral y una zona pelágica sin vegetación hidrófila que predomina sobre la anterior. Los lagos están más independizados del medio terrestre, por el volumen de agua que presentan. Su estado trófico es por lo general oligotrófico y son cuerpos de agua homohialinos. En su mayoría tienen un perfil transversal en forma de U (Ringuelet, 1962 en Rivas Raúl,(2011)).

Las lagunas son cuerpos de agua lénticos, sin estratificación térmica permanente. Esto determina que la circulación sea continua todo el año y que la mezcla de agua sea constante. La zona litoral domina casi la totalidad del cuerpo de agua y no se diferencia con una zona profunda. Su estado trófico por lo general tiende a la eutrofia. El estrecho contacto entre el sedimento y el agua provoca un rápido reciclaje de los nutrientes y una mayor productividad (Jeppesen, 1997 en Rivas Raúl,(2011)). La lagunas tienen cubetas regulares y pueden formarse en un cauce preexistente (Ringuelet, 1962 en Rivas Raúl,(2011)).

Un bañado es un cuerpo de agua semipermanente o temporario, sin una cuenca bien definida. Constituye un suelo inundable vegetado por comunidades serales. En un bañado no existe población animal que merezca llamarse limnética (Ringuelet, 1962 en Rivas Raúl,(2011)). Debido a que no tienen una cubeta definida, el suelo es igual al emergido adyacente.

Las charcas no tienen una cubeta bien definida. La influencia de la zona terrestre sobre la acuática es máxima (Guanter *et al.*, 2005). Por lo general no tienen profundidades mayores a los 70 cm y tienen un desarrollo superficial variable (Guanter *et al.*, 2005). Por lo general tienen forma circular y se secan fácilmente ante la falta de lluvias.

En la región pampeana de Argentina, la sucesión de períodos climáticos secos y húmedos llevó a un importante desarrollo de sistemas de humedales y lagos someros en las áreas deprimidas, comúnmente denominados lagunas (Aguirre y Whatley, 1995). Como consecuencia de las condiciones topográficas de la región, las lagunas pampeanas presentan un tiempo de permanencia del agua altamente variable

---

y dependiente del balance precipitación-*evapotranspiración*. Los lagos someros son generalmente *polimícticos* y naturalmente más productivos que los lagos profundos, ya que los nutrientes están disponibles para la producción biológica durante toda la estación de crecimiento. Sin embargo, la escasa profundidad que presentan los hace más sensibles al enriquecimiento en nutrientes. También son más vulnerables durante los períodos extremadamente secos. No obstante, la escasa relación entre el volumen y la profundidad de la laguna (profundidad media) favorece su lavado y rejuvenecimiento en períodos húmedos (Quirós, 2004). La cuenca del río Sauce Grande tiene sus nacientes en el sistema de las sierras Australes de dicha provincia, más conocidas como Sierras de la Ventana. Esta cuenca posee tres partes o secciones diferenciadas: la cuenca alta, la cuenca media y la cuenca baja. Esta última se extiende desde la altura aproximada del paralelo 38° 50' S hasta su desembocadura en la laguna Sauce Grande. La dirección general del cauce es NNO a SSE, mientras que en la cuenca baja dicha dirección se hace visiblemente ONO a ESE, esto se debe a la escasa pendiente y a la presencia de la cadena de médanos que impide que el río desemboque al mar, sin cambiar el rumbo. La información de la calidad del agua que contiene la Laguna de Sauce Grande es de suma importancia tanto para la hidrología como para una perspectiva ecológica y el implemento de la teledetección para realizar las investigaciones ofrece una alternativa más fácil y eficaz. Es necesario conocer las características del agua, es decir, los tipos existentes, la interacción de la radiación solar con cada una de ellas y los sensores y plataformas que se pueden usar.

La caracterización de los tipos de agua son determinados por la concentración de componentes que la conforman y por la localización que presentan. De acuerdo a ello, se puede clasificar los componentes del agua según su procedencia y estado (Margalef, 1983 en Domínguez Gómez *et al.*, 2011). Toda la materia inerte que se encuentra en el agua. Esta materia puede encontrarse en forma de:

- Sólidos de suspensión (SS), esto es, toda materia que puede ser separada del agua mediante un proceso de filtrado, sea el tamaño de poro del filtro utilizado.
- Materia disuelta, aquella que no puede ser separada del agua mediante un proceso de filtración.
- Materia con vida, desde microorganismos, por ejemplo, virus, bacterias o plancton, hasta vertebrados y plantas superiores.

Dentro de la materia viva, se puede encontrar el plancton, que se halla en suspensión en el seno de las aguas y que se mueve pasivamente debido al viento, a las olas o a las corrientes. A aquellos organismos fotosintéticos que son productores de materia orgánica en los medios acuáticos se los denomina fitoplancton; entre las aguas continentales se encuentran, habitualmente, en aguas estancadas, de lagos, estanques o pantanos (aguas leníticas) y en los tramos bajos de los grandes ríos.

El fitoplancton (algas y talofitas) y algunas bacterias constituyen el eslabón más bajo en la cadena alimenticia en el medio acuático porque convierten los nutrientes inorgánicos en materia orgánica susceptible de ser utilizada por otros seres vivos. Entre los principales componentes del fitoplancton en agua dulce se encuentran coexistiendo poblaciones de distintos grupos distribuidos en nichos ecológicos según sus diferentes necesidades y tolerancia a los parámetros ambientales de tipo fisicoquímico. Entre los más comunes se distinguen:

- Las cianobacterias son el único grupo de algas que tiene estructura celular procariota, carecen de núcleo y se reproducen por partición. La mayor parte de ellas se organizan formando estructuras filamentosas, pero importante número de especies planctónicas son unicelulares, apareciendo en forma de colonia. Tanto individualmente como en colonias, presentan una envoltura gelatinosa muy variable e irregular, en tamaño y forma (Domínguez Gómez *et al.*, 2011).
- Las filamentosas tiene una cubierta mucilaginosa y una tricoma formado por células alineadas dentro de la cubierta. Se producen por fragmentación de los tricomas o por células diferenciadas llamadas aquinetos. Existe también una diferenciación de ciertas células vegetales en heterocistes. Estas células carecen de ficobilinas, encargadas de absorber la luz y parecen ser las encargadas de la fijación de nitrógeno (Domínguez Gómez *et al.*, 2011).
- Las clorofíceas forman un grupo extremadamente grande y de gran diversidad morfológica, y su distribución está casi limitada a las aguas dulces. Son las más semejantes a las plantas superiores por la cloración y la presencia de los pigmentos asimiladores en los cloroplastos, la existencia de almidón como producto de la fotosíntesis y las paredes celulares formadas por celulosa y pectina. Comprenden todos los niveles de organización, desde tipos unicelulares flagelados a especies de estructura talosa (Domínguez Gómez *et al.*, 2011).
- Las diatomeas son típicas de este grupo de las paredes silíceas de las células. Son siempre unicelulares, aunque algunas especies forman colonias. La estructura de su pared celular es única en el reino vegetal. En ella se halla incluido ácido silícico, que les confiere gran dureza y resistencia, y rodea al protoplasto a modo de caja con tapa. Estas dos mitades reciben el nombre de frústulas.(Domínguez Gómez *et al.*, 2011).
- Las euglenofitas son algas con flagelos generalmente móviles, de una gran diversidad de tamaños (desde 5  $\mu\text{m}$ , hasta más de 300  $\mu\text{m}$  , y con pared celular proteica y estriada. Forman parte de este grupo de organismos tanto heterótrofo o autótrofo, que incluso pueden fagocitar partículas sólidas. Entre más autótrofas, los pigmentos principales son la clorofila-a y clorofila-b. Necesitan vitamina B12 que obtienen aprovechando la actividad de algunas bacterias. Ocupan gran diversidad de nichos ecológicos incluyendo aguas dulces, salobres y aguas ricas en materia

---

orgánica (Domínguez Gómez *et al.*, 2011).

En las aguas epicontinentales fundamentan su clasificación en el conocimiento del estado eutrófico de las aguas, un concepto que a lo largo de la historia ha sido estudiado, buscando la homogeneidad para la clasificación de dichas aguas. El enriquecimiento de nutrientes implica cambios en la composición química y en los organismos que contienen las masas de agua, por lo que es muy difícil separar el aumento de nutrientes de los cambios químicos, biológicos y físicos de las masas de agua. Actualmente, se define la eutrofización por un aumento en los niveles nutricionales, especialmente con respecto al fósforo y al nitrógeno (Domínguez Gómez *et al.*, 2011).

La entrada de éstos nutrientes y de materia orgánica, en la zona en la cual la luz penetra lo suficiente como para que produzca la fotosíntesis neta (zona eufótica), se alteran temporalmente las condiciones de equilibrio. La ruptura de este equilibrio produce un incremento de la producción primaria (producción de algas planctónicas), lo que implica un aumento de la actividad fotosintética, lo cual produce una liberación de oxígeno tan intensa que las capas superficiales de la masa de agua quedan sobresaturadas y, en consecuencia, el O<sub>2</sub> es liberado a la atmósfera.

Simultáneamente con este proceso, se produce la respiración de la materia orgánica que consume oxígeno, parte del cual ha sido liberado a la atmósfera. La falta de oxígeno provoca la muerte de seres vivos, que se depositan en el sedimento, por lo que este se oscurece.

De esta forma, una parte de los materiales son eliminados del ciclo biológico y existe la posibilidad que, al año siguiente, la producción primaria retorne a límites más bajos, recuperando las condiciones normales de equilibrio, a lo que se denomina estado oligotrófico. Si no se recuperan las condiciones, se produce una pérdida paulatina de materia orgánica que sedimenta en el fondo, haciendo que el sedimento aumente.

Esta situación se denomina estado eutrófico y dicho proceso, eutrofización natural, es un proceso muy lento e irreversible. Si el aumento de nutrientes es provocado por el hombre, la pérdida de materia orgánica no es lenta, si no rápida: este proceso se denomina eutrofización artificial o cultural.

El estado eutrófico de las masas de agua lleva a su ordenación según un indicador que define su estado trófico, al que se denomina índice o grado eutrófico. Dicho índice permite clasificar las aguas epicontinentales. En función del valor creciente de este índice, el grado de eutrofia varía en el siguiente orden: ultra-oligotrófico, oligotrófico, mesotrófico, eutrófico e hipertrófico. Uno de los índices de eutrofia más utilizados es el introducido por Carlson (1977) en Domínguez Gómez *et al.*,(2011), que se puede determinar a partir de diferentes parámetros: físicos (transparencia), químicos (concentraciones de clorofila o fósforo), biológicos (número de células), etc. En 1975, Shapiro publicó una recopilación

de los índices y de los parámetros a partir de los cuales se puede determinar el índice de eutrofia (Ortiz, 1994 en Domínguez Gómez *et al.*,(2011).

Con el objetivo de unificar todos estos índices y así clasificar el tipo de aguas continentales, a finales de la década de 1970, la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico) encargó a diversos grupos de investigadores de sus estados miembros que estudiaran aguas continentales de las cuales pudieran obtener los parámetros y sus intervalos para determinar el grado de eutrofia. Estos trabajos concluyeron en una clasificación determinada para valores anuales que se ilustran en la siguiente tabla:

**Tabla 2.1:** Tabla de parámetros e intervalos para determinar el grado de eutrofia.

Categoría	TP(1)	[Chl](2)	[Chl]máx.(3)	Secchi(4)	Secchi(4)
Ultraoligotrófico	<4.0	<1.0	<2.5	>12.0	>6.0
Oligotrófico	<10.0	<2.5	<8.0	>6.0	>3.0
Mesotrófico	10-35	2.5-8	8-25	6-3	3-15
Eutrófico	35-100	8-25	2.5-75	3-1.5	1.5-0.7
Hipertrófico	<100	<25	<75	<1.5	0.7

Valores límites para la clasificación trófica de la OCDE:

- 1. Concentración de fósforo total en la masa de agua ( $\mu\text{g/L}$ )
- 2. Media anual de la concentración de clorofila-a ( $\mu\text{mol/L}$ ) en la zona eufótica.
- 3. Pico anual de la concentración de clorofila-a ( $\mu\text{mol/L}$ ) en la zona eufótica.
- 4. Media anual de la profundidad del disco Secchi (m).
- 5. Mínimo anual de la profundidad del disco Secchi (m)

Sin embargo, existen limitaciones a la hora de utilizar los valores “precisos” para definido por las condiciones tróficas de una masa de agua. Es inevitable un cierto grado de superposición, es decir, algunas masas de agua pueden clasificarse en una determinada condición trófica, basándose en un parámetro, y en otra categoría trófica, basándose en un segundo parámetro.

La OCDE ha tratado de superar estas limitaciones aplicando un cálculo estadístico a su base de datos, creando así una clasificación de “límite abierto”. Con este sistema, una masa de agua puede considerarse correctamente clasificada si no hay más de un parámetro que se desvíe de su valor medio geométrico en más de dos desviaciones típicas.

---

En ausencia de valores tróficos absolutos, el solape de una serie de valores confirma la naturaleza todavía subjetiva de los esquemas de clasificación trófica, por lo que está claro que los términos “oligotrófico” y “eutrófico” pueden tener significados diferentes en situaciones limnológicas diferentes. Diversos investigadores han especificado el rango de valores que delimitan los grados de eutrofia a partir de la OCDE.

Para conocer las condiciones y las modificaciones que llegan a tener las masas de agua es pertinente el monitoreo periódico de los cuerpos de agua y la gestión integrada de cuencas hidrográficas, son indispensables para la conservación de los recursos hídricos, pero no son una tarea sencilla. Los métodos convencionales para la recolección de parámetros de calidad del agua tienen limitaciones como:

- I. Costo y tiempo para la realización de los análisis de laboratorio.
- II. Las variaciones espacio-temporales no siempre son registradas en muestras puntuales.
- III. El monitoreo continuo es inviable en regiones remotas o de difícil acceso.

Por lo tanto, frente a las dimensiones continentales particulares, que se presentan y de las limitaciones de los métodos convencionales, el monitoreo con alcance de estos ecosistemas necesita el apoyo de otras fuentes de datos, como los datos de Sensores Remotos. En las últimas décadas, el SR orbital viene siendo empleado en el monitoreo de los recursos naturales y su potencial es ampliamente reconocido por la comunidad científica.

### **Sensores y plataformas**

En el ámbito internacional se produjo un avance significativo en estudios acuáticos y con ello surgieron nuevos sensores orbitales para el monitoreo de recursos terrestres y acuáticos, como el Sea-view Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS), la resolución de imágenes de Spectroradiometer (MODIS), Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS), y más recientemente, el sensor Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS).

Sin embargo, estos sensores poseen una moderada resolución espacial, y esto limita, en la mayoría de los casos, los estudios en cuerpos de agua menores, como ríos estrechos y pequeños lagos. Por lo tanto, los usuarios de SR con foco en aguas interiores pasaron a utilizar los datos oriundos de sensores de media resolución espacial, como los del programa Landsat (NASA), y recientemente, del programa Copernicus Sentinel-2 (ESA).

Los constituyentes ópticamente activos (COA), como los sólidos en suspensión, los pigmentos fotosintetizantes (clorofila), y la materia orgánica disuelta a color, también se utilizan como indicadores de calidad del agua para la caracterización del medio acuático. Esta puede ser obtenida a partir de

## 2. MARCO TEÓRICO

---

la intensidad de la radiación espectral registrada por los sensores, es modulada por las propiedades ópticas de los COA, con ello, es posible realizar las inferencias sobre la composición en el agua siendo una de las bases de ese conocimiento.

Uno de los objetivos de la Teledetección, aplicado a ambientes acuáticos, es determinar la concentración y estimar la variabilidad espacial de algunos parámetros de calidad de agua, como clorofila, sólidos en suspensión y materia orgánica disuelta. Estos parámetros son útiles para determinación de las condiciones biofísicas y del estado trófico de los sistemas acuáticos.

Debido a las propiedades de interacción del agua con la luz (radiación electromagnética), el sensor remoto en ambientes acuáticos, denominado sensor de color del agua, utiliza principalmente sensores pasivos, teniendo la radiación solar como fuente de primaria y la región del espectro electromagnético entre 400 y 900 *nm* como una de las regiones más importantes para las aplicaciones. El color del agua natural es una característica óptica resultante de los procesos de interacción de la luz solar con el agua y sus constituyentes, y que por ello, contiene información espectral relativa a la composición de la columna de agua.

Las variaciones de color se determinan por la concentración y composición de las partículas y de las sustancias disueltas que absorben y diseminan la radiación solar directa y difusa del cielo que penetra en el agua. La Figura 2.2 ilustra los ejemplos de color agua registrada por sensores remotos orbitales de la área de estudio.



**Figura 2.2:** Recorte de imagen satelital Landsat 8, visualizada en color verdadero. Combinación de las bandas 4,3,2.

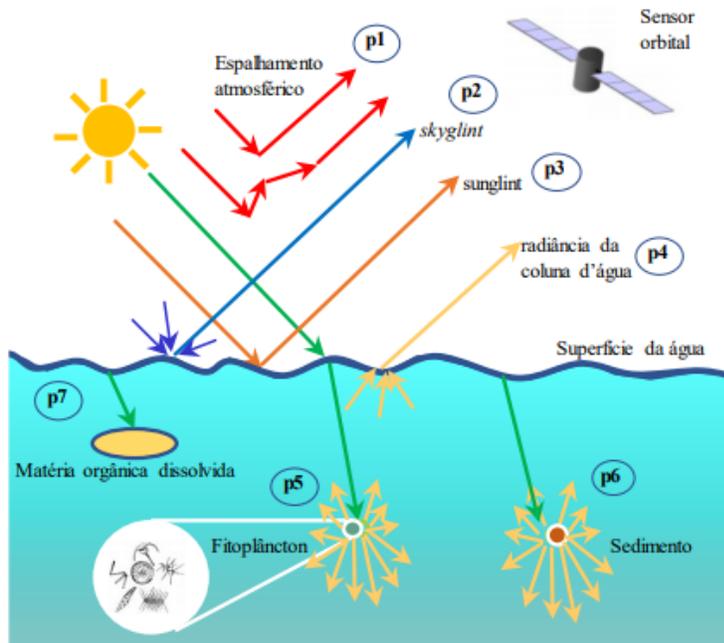
Las diferentes tonalidades del agua, van desde los colores negro o azul oscuro hasta tonalidades verdes, que a simple vista permiten hacer un análisis cualitativo de cada área.



**Figura 2.3:** Acercamientos al área de estudio, Laguna Sauce Grande de imagen satelital Landsat 8, visualizada en color verdadero. Combinación de las bandas 4,3,2.

Dentro de las lagunas existentes del área de estudio se pueden encontrar diferencias muy puntuales en cada una de las tonalidades y con un acercamiento mayor se observa las particularidades de la Laguna Sauce Grande. Uno de los desafíos en la interpretación de los colores del agua es identificar y extraer la radiación emergente de la columna de agua, dado que la señal registrada por los sensores orbitales es fuertemente afectada por la atmósfera y la reflexión especular en la superficie del agua. Además, el modelado de los constituyentes, a partir de esa información radiométrica, no es una tarea trivial, especialmente en entornos ópticamente complejos, como es el caso de las aguas interiores.

Las técnicas para la extracción de información de ambientes acuáticos por sensorización remota son diferentes de las aplicadas en blancos terrestres. Por ejemplo, de forma genérica, se puede considerar la radiación reflejada por blancos terrestres como un evento bidimensional de dispersión simple, mientras que para los blancos acuáticos, donde la radiación penetra y se propaga en la columna de agua, el evento es inherentemente tridimensional, pues implica dispersión múltiple de diferentes órdenes en todas las direcciones dentro del cuerpo de agua. En la figura 2.4 se ilustra de forma sucinta la trayectoria recorrida por la luz solar cuando ésta se propaga y alcanza los blancos acuáticos, antes de regresar en la dirección del sensor orbital.



**Figura 2.4:** (1) Proceso de la dispersión atmosférica, (2) Proceso de reflexión especular difusa del cielo de luz, (3) el proceso de reflexión especular luz solar directa, (4) radiación emergente de la columna de agua, (5) proceso de dispersión y absorción de la luz por fitoplancton, (6) proceso de dispersión de la luz por sedimentos, (7) proceso de absorción de luz por materia orgánica disuelta. (Barbosa et al., 2019).

Como se muestra en la figura 2.4, el haz de luz se propaga por la atmósfera y alcanza la superficie del agua, donde una parte de él es reflejada por la superficie y la otra parte penetra en el agua. Esta fracción de la luz que penetra, después de interactuar con la columna de agua, retorna a la superficie y eventualmente se propaga en la dirección del sensor orbital. A lo largo de esa trayectoria, la luz es sometida a procesos de atenuación debido a la interacción de los fotones con la atmósfera, con la superficie del agua, con la columna de agua y nuevamente con la atmósfera, antes de alcanzar el sensor. Por lo tanto, la radiación solar está bajo una fuerte influencia de factores externos, antes de ser registrada por algún sensor.

Los procesos de atenuación en la atmósfera, antes y después de interactuar con el cuerpo de agua, son procesos perturbadores, pues además de no contener información sobre las masas de agua, interfieren en las informaciones oriundas de la columna. Los métodos de eliminación o reducción de estos efectos perturbadores se describen en la metodología, que trata sobre las correcciones que se deben realizar en las imágenes.

Los procesos de interacción / atenuación que ocurren en la superficie del agua (Figura 2.4), es decir, reflexión especular de la luz solar directa ( $p3$  - *sunglint*) o de la luz difusa del cielo ( $p2$  - *skyglint*), tampoco resultan en información sobre la composición del agua. El tratamiento de estos efectos se

---

discute en la sección sobre remoción de la reflexión especular en la superficie del agua. La radiación emergente del cuerpo de agua, resultante de la interacción de la luz con el medio acuático, transporta las informaciones sobre la composición de las masas de agua (Figura 2.4). Es esa radiación que permite, a partir de técnicas de teledetección, hacer la conexión entre los constituyentes del agua y la señal registrada por un sensor remoto orbital, aerotransportado o de campo. Entonces, para entender esta conexión y extraer información sobre los sistemas acuáticos, es necesario entender y cuantificar los procesos de interacción de la luz en la columna agua.

Los conceptos fundamentales para el estudio cuantitativo de las interacciones de la luz con cuerpos de agua son establecidos por la óptica hidrológica, rama de la física que trata de los procesos de propagación de la luz en el agua, utilizando como marco físico y matemático la TTR, es decir, teoría de transferencia radiativa (Barbosa *et al.*, 2019).

La radiometría es la ciencia de medición de la radiación electromagnética. Es la base para estudios de transferencia radiativa en aguas naturales (Mobley, 1994). Es pertinente tener en cuenta que la teoría de transferencia radiativa, representada por la ecuación de transferencia radiativa (RTE por sus siglas en inglés), la cual resulta ser la estructura matemática que une las propiedades ópticas inherentes y las condiciones ambientales de un sistema acuático con las magnitudes radiométricas del campo de luz y las propiedades ópticas aparentes del cuerpo de agua.

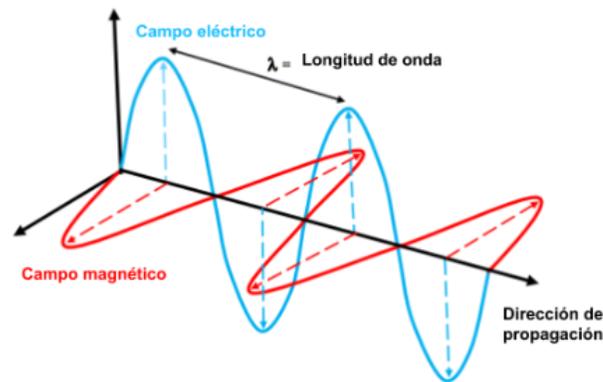
La interpretación de los datos adquiridos por sensores remotos en el estudio y monitoreo de ambientes acuáticos está fundamentada en la comprensión de la interacción de la radiación electromagnética (Radiación Electromagnética con el Medio) con los cuerpos de agua. Esta motivación se basa en la descripción detallada de la REM y de los procesos que ocurren durante su propagación en el medio acuático. La REM es resultado de la emisión de energía electromagnética (EE) por cualquier cuerpo que tenga la temperatura por encima de cero (0 Kelvin). En el contexto del sensor remoto de entornos acuáticos, la motivación se basa en los conceptos de la óptica hidrológica.

El término luz se refiere a la EE en la región del espectro electromagnético entre 380 y 700 nanómetros ( $10^{-9}$  metros) (Xie *et al.*, 2012). Esta región espectral es comúnmente referenciada como luz, por ser la región donde el ojo humano es sensible. Para el entendimiento de lo que es la luz y de sus propiedades, la física moderna recurre a dos perspectivas: una cuántica y otra ondulatoria. En la perspectiva cuántica, la luz se concibe como unidades indivisibles de energía (paquete de energía), denominados cuantos o fotones, mientras que en la perspectiva ondulatoria se concibe como ondas electromagnéticas resultantes de oscilación de partículas polarizadas, que, al propagarse, generan campos eléctricos y magnéticos (longitud de onda de abajo, tipo gráfico). En las dos concepciones, la velocidad de propagación de la luz ( $c$ ) en el vacío es de  $3 \times 10^8 \frac{m}{s}$ .

En la perspectiva ondulatoria, la luz se caracteriza por la distancia entre dos puntos de la misma intensidad del campo eléctrico o magnético durante su propagación. Esta distancia, denominada longitud de onda de la luz varía en función de la frecuencia de oscilación de los campos eléctrico y magnético. Ya bajo la perspectiva de los paquetes de energía, cada fotón se caracteriza como teniendo una cantidad de la energía  $\xi$ , que tiene asociado a él una frecuencia  $\nu$ , que le confiere propiedades ondulatorias, conforme la siguiente ecuación:

$$\xi = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

Donde  $h$  es la constante de Plank, cuyo valor es  $6,625 \cdot 10^{-34}$  joules segundo (J s);  $\nu$  es la frecuencia relacionada con la longitud de onda dada por la relación  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz en el medio donde la luz se está propagando. Desde que  $c$  es constante en un determinado medio, cuanto mayor es la longitud de onda, menor la frecuencia y, consecuentemente, menor la energía del fotón que está oscilando en esa frecuencia.



**Figura 2.5:** Campo eléctrico y magnético.(Barbosa *et al.*, 2019)

El espectro de radiación electromagnética es comúnmente representado a partir de las radiaciones gamma de alta energía (altísimas frecuencias) hasta radiaciones de ondas de radio, que son de baja energía. En el contexto del sensor remoto de agua, se trabaja con REM en la región visible (400 - 700 nm) e infrarrojo cercano (hasta  $\sim 900$  nm).

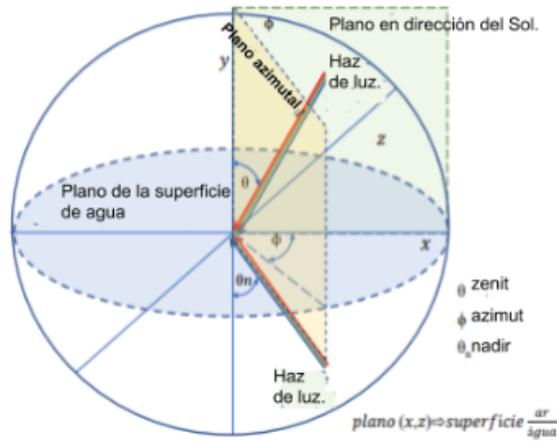
La radiación solar es la principal fuente natural de energía electromagnética utilizada por el sensor remoto óptico. El espectro de distribución de la energía emitida por el sol alcanza la cima de la atmósfera y el nivel del mar. La mayor intensidad de EE que alcanza la superficie terrestre se encuentra en la región entre 400 y 700 nanómetros ( $1 \times 10^{-9}$  metros). Por lo que respecta al proceso químico

---

más importante de la superficie de la Tierra, la fotosíntesis, utiliza la radiación solar de esa banda espectral.

El término campo de luz se refiere a un conjunto de fotones o radiación electromagnética propagando dentro de un cierto medio. En el contexto de este trabajo, el medio será el acuático, donde la propagación puede ser isotrópica, cuando se propaga igualmente en todas las direcciones, o anisotrópica, cuando ocurre alguna dirección preferencial de propagación. Al propagarse, el campo es sometido a cambios debido a su interacción con la columna de agua. Para que se pueda hacer una conexión entre los cambios que ocurren en el campo de luz y los constituyentes presentes en el cuerpo de agua, es necesario cuantificar estos cambios por medio de medidas de algunos atributos del campo de luz. Las definiciones de estos atributos en el contexto de la óptica hidrológica se describen en (Mobley, 1994) y (Kirk, 1994).

El marco físico y matemático que permite estudiar y simular esos cambios en un determinado medio físico, y, en consecuencia estudiar la interacción del campo luz con el medio, es la ecuación de transferencia radiativa (ETR). La ETR necesita como dato de entrada una descripción de la distribución espacial del campo de luz en todas las direcciones (descripción de la estructura angular y espacial del campo de luz). Mobley ( 1994) relaciona esa unión de la radiación con una estructura espacial (geometría euclidiana) del campo de luz de radiometría geométrica. La radiometría geométrica aplicada al estudio del campo de luz, tanto a la columna de agua como a la interfaz aire / agua o atmósfera, utiliza normalmente el sistema de coordenadas polar para definir las direcciones de propagación de la luz. Es decir, las direcciones se expresan en términos de los ángulos zenital y azimutal, en los que el ángulo zenital  $\theta$  (Figura 2.6) es el ángulo entre el haz de luz y una línea vertical a un plano horizontal pasando por punto de referencia. En el ejemplo de la figura 2.6, este plan está representado por la superficie del agua y la línea vertical es el eje y. El ángulo azimutal es el ángulo entre un plano vertical pasando por el haz de luz incidente (plano azimutal en la figura 2.6) y un plano en la vertical pasando por la fuente de luz.



**Figura 2.6:** Direcciones de propagación de la luz. (Barbosa *et al.*, 2019)

En el ejemplo de la figura 2.6, estos dos planos verticales están representados por el plan azimutal y plan dirección del sol. Ángulos para la definición de direcciones dentro de un campo de luz. El plano vertical xy es un plano en dirección del sol y el plano horizontal representa la superficie del agua. La figura muestra también dos haces de luz, un descendente y otro ascendente, ambos en un mismo plano vertical con ángulo azimutal  $\phi$ , en relación a la posición del sol. El haz descendente tiene ángulo zénit  $\theta$  y el ascendente tiene ángulo nadir  $\theta_n$  que es equivalente al ángulo zénit  $180 - \theta_n$ .

Otro de los conceptos que se requieren conocer es la radiometría, definida como una serie de variables o magnitudes radiométricas para un campo de la radiación. Estas magnitudes o atributos se miden y se utilizan para una descripción cuantitativa y precisa de la transferencia radiactiva en aguas naturales. Las principales magnitudes radiométricas de interés de la óptica hidrológica son la energía radiante, el flujo radiante, la irradiación y la radiación (Barbosa *et al.*, 2019).

La energía radiante ( $Q$ , en Joule (J)) es la cantidad de energía transportada por un campo de radiación (Zibordi, 2007). Dado que cada fotón es un paquete con una cierta cantidad de energía, la energía total que se está propagando ( $Q$ ) compuesta por fotones de diferentes longitudes de onda, es la suma de la energía de todos los fotones que pasan por un cierto referencial en un cierto período de tiempo tiempo  $\Delta t$ .

$$Q = \sum_{i=1}^n N_i \xi \lambda_i \quad (2.2)$$

Donde  $N_i$ , es el número de fotones en la longitud de onda  $\lambda_i$ ,  $\xi(\lambda_i)$  es la energía del fotón de longitud de onda, como se describe en la ecuación (2.2). Es importante resaltar que  $\sum N_i$  es el total de fotones que pasa por el, en un cierto período de tiempo.

---

La amplitud de flujo radiante o potencia radiante ( $\phi(\lambda)$ ), en  $J \cdot s^{-1}$  o Watts (W), es la tasa de flujo de energía radiante que pasa por un punto o sección transversal de referencia por unidad de tiempo  $t$ :

$$\Phi(\lambda) = \frac{\Delta Q(\lambda)}{\Delta t} = \frac{dQ(\lambda)}{dt} \quad (2.3)$$

En que  $\Delta Q$  o  $dQ$  es fracción de energía radiante que pasa por el punto de referencia y  $\Delta t$  o  $dt$  es la unidad de tiempo en segundo. La  $\Phi(\lambda)$  es la cantidad de energía radiante que pasa por la superficie de referencia ( $Sr$ ) por segundo.

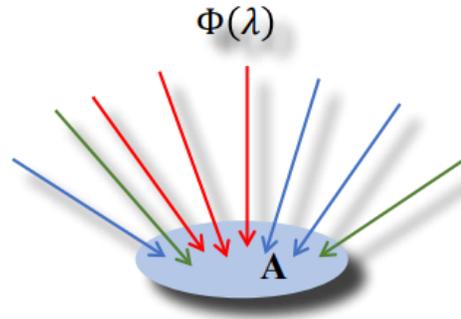
Otra magnitud radiométrica importante para caracterizar un campo de luz es la irradiación  $E(\lambda)$ . El concepto de irradiación surge de la necesidad de medir el flujo interceptado por la sección de una superficie (Figura 2.7), como la sección de un detector de radiación. En este contexto, la irradiación se define como la densidad o tasa del flujo radiante interceptado por unidad de área ( $dA$ ).

$$E_i(\lambda) = \frac{d\Phi(\lambda)}{dA} [W m^{-2}] \quad (2.4)$$

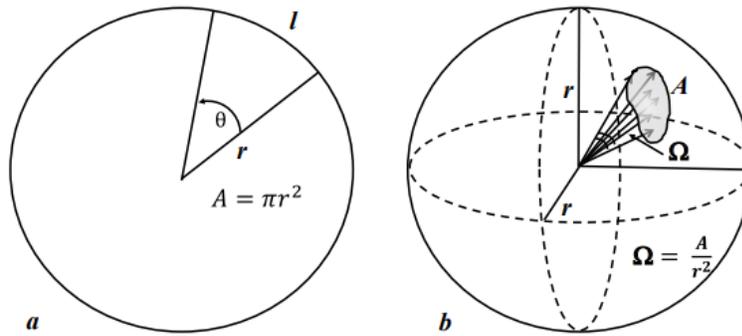
La irradiación tiene una unidad de Watts por metro cuadrado [ $W m^{-2}$ ]. La radiación (L) es un atributo del campo de luz fundamental en la formulación de la óptica hidrológica, pues posibilita cuantificar y describir la propagación de la luz en el espacio tridimensional. Existen dos conceptos importantes para entender la radiación: ángulo sólido e intensidad radiante.

El sector de una circunferencia delimitada por dos radios (Figura 2.8a) define un ángulo plano  $\theta$  como la razón de la longitud del arco  $l$  por el radio  $r$ . El ángulo sólido es una extensión del ángulo plano. El sector de una esfera delimitada por un conjunto de direcciones que determinan un área  $A$  en la superficie de la esfera (Figura 2.8b) define un ángulo sólido  $\Omega$  como la razón del área  $A$  por el radio  $r$  al cuadrado, cuya unidad es esferorradiano.

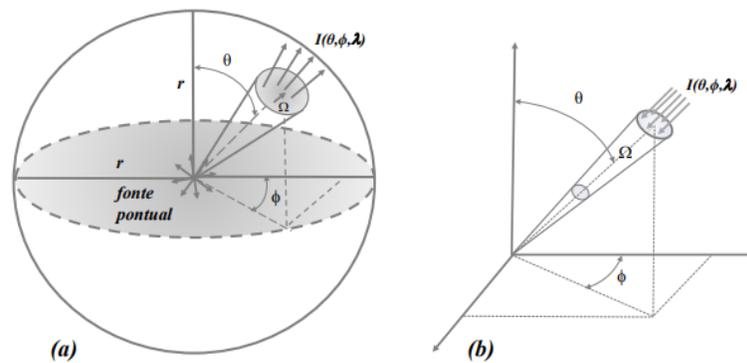
La intensidad radiante (I) es una medida del flujo radiante por unidad de ángulo sólido en una cierta dirección (Binding *et al.*, 2011). Se podría representar como una fuente de radiación puntual, ubicada en el centro de una esfera de radio  $r$ , emitiendo radialmente en todas las direcciones (Figura 2.9a).



**Figura 2.7:** Flujo radiante de un campo de luz que se centra en una superficie de referencia.



**Figura 2.8:** Geometría asociada a la definición de ángulo plano  $\theta$  y de ángulo sólido  $\Omega$ .



**Figura 2.9:** Esquema ilustrativo de la intensidad radiante  $I$  en el ángulo sólido  $\Omega$  en la dirección del ángulo zenital  $\theta$  y azimutal  $\phi$ .

(a) radiación emergiendo de una fuente puntual. (b) radiación en un punto del espacio o que se centra en un punto de un blanco. Se puede considerar también, un cono que sostiene un ángulo sólido  $\Omega$  y con

---

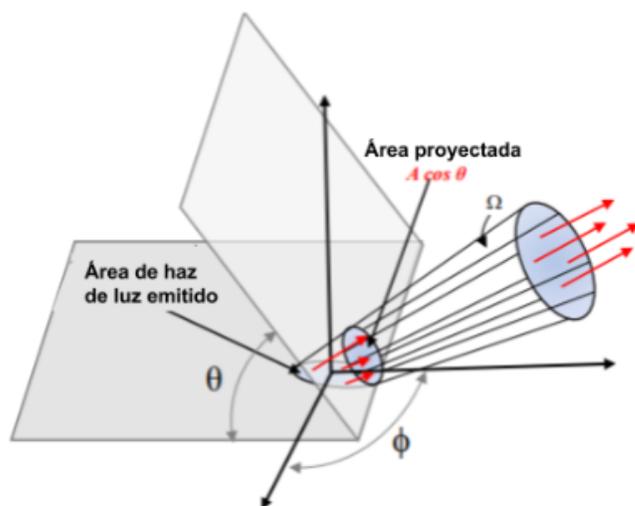
su vértice en la fuente de radiación (Figura 2.9a) a partir de esa configuración, se define intensidad radiante  $I(\theta, \phi, \lambda)$  en la dirección  $(\theta, \phi)$  como el flujo o la potencia radiante por unidad de ángulo sólido  $\Omega$ :

$$I(\theta, \phi, \lambda) = \frac{d\Phi(\lambda)}{d\Omega} \quad (2.5)$$

La intensidad radiante puede también ser usada para describir la radiación en un punto en el punto espacio o incidente en un punto de un blanco Figura 2.9b. El concepto de intensidad radiante está asociado a la medida del flujo radiante por unidad de ángulo sólido, proveniente de una fuente puntual o incidente en un punto de un blanco. El concepto de la radiación surge de la necesidad de medir el flujo proveniente o incidente sobre un objetivo con una cierta área. La radiación  $L(\theta, \phi, \lambda)$  de un blanco en la dirección  $(\theta, \phi)$  se define como el flujo radiante  $(\phi, \lambda)$  unidad de ángulo sólido  $\Omega$  por unidad de área  $A$  perpendicular a la dirección del flujo (ecuación (2.6)). Es decir, la radiación es la intensidad radiante por unidad de área perpendicular al flujo incidente o emitido.

$$L(\theta, \phi) = \frac{\Delta\Phi(\lambda)}{\Delta\Omega\Delta A \cos\theta} \quad (2.6)$$

A partir de la ecuación (2.6), la estructura direccional del campo de luz puede expresarse en términos de la variación de la radiancia  $L$  usando los ángulos zenital  $\theta$  y azimutal  $\phi$  y tiene unidad de Watts por metros cuadrados por esferorradiano ( $W^* m^{-2} sr^{-1}$ ). La importancia de la radiación como magnitud radiométrica fundamental es porque todas las demás magnitudes pueden derivarse de ella. Además, es la magnitud medida por la mayoría de los sensores orbitales. La definición de otras magnitudes radiométricas, enumerada en la Figura 2.10, puede ser encontrada en Mobley (1994) y Binding *et al.* (2011). Existen equipos comerciales para medidas de radiación e irradiancias in situ. Estos equipos se presentan posteriormente, con una descripción de la configuración utilizada para las medidas simultáneas de diferentes tipos de magnitudes, así como su funcionamiento y la metodología para su uso.



**Figura 2.10:** Esquema de la definición conceptual de la magnitud radiométrica radiancia.

La interacción de la luz con la columna de agua es gobernada por dos procesos: absorción y esparcimiento. Cuando un fotón es absorbido, su energía se transfiere a una molécula de agua o de alguna de las sustancias presentes en el agua y el fotón desaparece. Cuando un fotón se separa al interactuar con algún componente del medio, su dirección original de propagación es alterada, sin embargo, que sigue existiendo. Es importante entender los procesos de absorción y de dispersión para interpretar el resultado de la interacción de la luz con el cuerpo de agua y consecuentemente extraer informaciones sobre el sistema acuático.

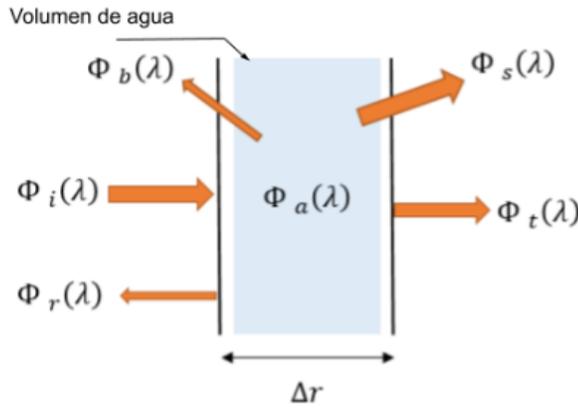
Cuando un fotón interactúa con una molécula puede ser absorbido, dispersado o transmitido por ésta. Si el fotón es absorbido, la energía de la molécula se ve incrementada debido a la interacción con el fotón. Si el fotón es de baja energía, en el rango del infrarrojo lejano y microondas ( $\lambda > 20\mu m$ ), sólo proporciona energía para transiciones entre niveles de rotación. Si el fotón tiene una energía correspondiente al infrarrojo entre  $1\mu m$  y  $20\mu m$ , la energía que transmite causa transiciones entre los niveles de vibración. En el rango visible, el fotón aporta la energía suficiente para que los electrones de la molécula de agua realizan transiciones electrónicas. (Barbosa *et al.*, 2019)

---

## Propiedades ópticas inherentes (IOP)

Los procesos de absorción del agua se cuantifican mediante el coeficiente de absorción,  $a$ . El coeficiente de absorción del agua es la fracción de energía luminosa absorbida cuando un estrecho haz de luz colimado (un rayo de luz) atraviesa un espesor de unidad de agua. Si el fotón es dispersado, continúa su camino; este proceso se mide mediante el coeficiente de dispersión,  $b$ . El coeficiente de dispersión es la fracción de luz transmitida cuando un estrecho haz de luz colimado atraviesa una unidad de longitud en el agua.

El flujo de energía incidente  $\phi_i(\lambda)$  es igual a la suma de la energía absorbida  $\phi_a(\lambda)$ , transmitida  $\phi_t(\lambda)$  y dispersada  $\phi_s(\lambda)$  (figura 2.11). Los cocientes entre estos flujos de energía radiante definen los siguientes coeficientes adimensionales característicos del espesor de material considerado:



**Figura 2.11:** Absorción y dispersión de un fotón en un elemento de volumen de agua.

- Absorbancia

$$A(\lambda) = \frac{\Phi_a(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)} \quad (2.7)$$

- Transmitancia

$$B(\lambda) = \frac{\Phi_t(\lambda) + \Phi_s(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)} \quad (2.8)$$

y, cuando se consideran espesores infinitesimales, se convierten en:

$$a(\lambda) = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{A(\lambda)}{\Delta r} \quad (2.9)$$

$$b(\lambda) = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{B(\lambda)}{\Delta r} \quad (2.10)$$

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \quad (2.11)$$

Que son el coeficiente de absorción  $a(\lambda)$ , el de dispersión  $b(\lambda)$ , y el coeficiente de atenuación total  $c(\lambda)$  (debida tanto a la absorción como a la dispersión), que representa la fracción de la energía que pierde un haz de luz colimado cuando avanza en una longitud unidad a través del agua. Estas propiedades se miden con un espectrofotómetro y se denominan propiedades ópticas inherentes (IOP) porque no dependen de la luz (su origen o intensidad), sólo del agua o de las sustancias que existen en el medio acuático (Tassan y Ferrari, 1995). Las unidades en que se miden todas estas propiedades inherentes son  $m^{-1}$ .

### Propiedades ópticas aparentes (AOP)

La energía electromagnética que incide sobre la superficie de agua la atraviesa cumpliendo las leyes de:

- Snell, indica cómo cambia la dirección de propagación de la luz al cambiar de medio.
- Fresnel, que indica cómo cambia el coeficiente de reflexión y la dirección de polarización en función del ángulo de incidencia y las propiedades del medio; un caso particular es la ley del “índice de refracción al cuadrado”, que indica la variación del flujo de energía radiante al cambiar de medio.

Una vez que la energía se encuentra en el medio acuático, ésta se comporta según la ley de Lambert-Beer (figura 2.11):

$$E_d(\lambda, z) = E_d(\lambda, 0) \cdot e^{-K_d(\lambda)z} \quad (2.12)$$

- $E_d(\lambda, z)$  Irradiancia incidente, a la profundidad  $z$  y a la longitud de onda  $\lambda$ .
- $E_d(\lambda, 0)$  Irradiancia en la superficie interior del agua ( $z=0$ ), a la longitud de onda  $\lambda$ .
- $K_d(\lambda)$  Coeficiente de atenuación difusa, a la longitud de onda  $\lambda$ . Describe la disminución de la irradiancia ambiental en el medio acuático.

La irradiancia dentro del agua se mide con un espectrorradiómetro al que se adapta un coseno-receptor. Este coseno-receptor permite captar y analizar toda energía luminosa que llega a él desde cualquier dirección. A partir de esta medida se puede determinar  $K_d$ . Las propiedades que se determinan mediante espectrorradiómetros a partir de medidas de la energía radiante dentro de la masa de agua se denominan propiedades aparentes y dependen del medio acuático y de la energía ambiental que incide sobre él. La ley de Lambert-Beer se puede expresar en función del espesor óptico (aparente)  $T_d = K_d(\lambda)z$  como:

$$E_d(\lambda, z) = E_d(\lambda, 0) \cdot e^{-\tau_d} \quad (2.13)$$

---

Una medida sencilla de la atenuación de la luz en el agua es la medida de la transparencia de una masa de agua. Esta se realiza determinando la profundidad de visión del disco de Secchi. Este disco es un disco blanco de unos 30 cm, para aguas marinas, o blanco y negro de 20 cm, para aguas continentales, que se sumerge en el agua pendiente de una cuerda; la profundidad D a la que deja de ser visible informa sobre la transparencia del agua en el rango visible. En líneas generales, el coeficiente de atenuación difusa en el rango visible (entre 400 nm y 700 nm) es  $K_{PAR}=1.7/D$ , donde el subíndice PAR se refiere a la radiación fotosintéticamente activa (en el azul y el rojo del rango visible) y D es la profundidad del disco Secchi en metros (Margalef, 1993 en Domínguez Gómez *et al.*, 2011).

La falta de transparencia de una masa de agua debida a la concentración de sólidos en suspensión se denomina turbidez y se mide con un turbidímetro (en NTU, *nephelometric turbidity units*). El turbidímetro determina el cociente entre la luz transmitida y la luz dispersa con un ángulo de 90° respecto al haz incidente; ese valor da la turbidez en NTU.

La reflectancia del interior de una masa de agua se define como la fracción de energía reflejada desde el interior de la masa acuática, esto es, el cociente entre la irradiancia ascendente (*upwelling*)  $E_u(0^-, \lambda)$ , y la descendente (*downwelling*),  $E_d(0^-, \lambda)$ , medidas ambas justo bajo la superficie del agua (profundidad  $0^-$ ):

$$R(0^-, \lambda) = \frac{E_u(0^-, \lambda)}{E_d(0^-, \lambda)} \quad (2.14)$$

En el aire (profundidad  $0^+$ , justo sobre la superficie acuática) la fracción de energía reflejada se define como:

$$R(0^+, \lambda) = \frac{E_u(0^+, \lambda)}{E_d(0^+, \lambda)} = \frac{\pi L_u E_u(0^+, \lambda)}{E_d(0^+, \lambda)} \quad (2.15)$$

Donde  $L_u E_u(0^+, \lambda)$  es la radiancia saliente (*upwelling*), medida en la parte superior del agua y supuesta isótropa.

### **Relaciones entre las propiedades ópticas inherentes (IOP) y aparentes (AOP).**

La relación que existe entre la atenuación vertical difusa  $K_d$  y los coeficientes de absorción y dispersión, a y b, respectivamente, es (Kirk, 1994):

$$K_d(Z_m) = \frac{[a^2 + [0.47\mu_0 + 0.218]ab]^{\frac{1}{2}}}{\mu_0} \quad (2.16)$$

Donde  $\mu_0$  es el coseno del ángulo de incidencia,  $Z_m$  es la profundidad a la que llega el 10%

de a luz incidente (región fotosintéticamente activa) y  $a$ ,  $b$  son los coeficientes de absorción y dispersión definidos en la ecuación (2.10) y (2.11). Otra relación aproximada que proporciona  $K_d$  es (Sathyendranath, 1988 en (Domínguez Gómez *et al.*, 2011)):

$$K_d(Z_m) = \frac{a(\lambda) + b_b(\lambda)}{\mu_0} \quad (2.17)$$

Que, además del coeficiente de absorción  $a$ , incluye el coeficiente de retrodispersión  $b_b$ , que corresponde a la fracción dispersada en la dirección desde la que índice la luz y, por lo tanto, medible desde fuera del agua.

La distribución de energía en un sistema se describe por medio de la ecuación de transferencia radiactiva (RTE), que expresa la propagación de la energía dentro de un medio de propiedades ópticas inherentes conocidas. Para un medio pasivo (esto es, sin fuente interna de radiación, como es el medio acuático), esta ecuación describe la pérdida de energía (debida tanto a la dispersión como a la absorción en la dirección de la propagación de la energía) y la ganancia de energía (debida a la dispersión desde otras direcciones) del haz luminoso al atravesar dicho medio.

Esta ecuación no tiene solución analítica para un sistema tan complejo como el medio acuático, por lo que sólo son posibles soluciones numéricas. Ésta es la razón por la cual, se simula el sistema utilizando un algoritmo de Monte Carlo. La variable energética que se relaciona con los coeficientes de absorción y dispersión es la reflectividad medida, justamente, debajo de la superficie de separación de los medios atmosféricos y acuáticos  $R(0^-, \lambda)$ . La relación analítica aproximada que se obtiene es (Gordon *et al.*, 1975 en (Domínguez Gómez *et al.*, 2011)):

$$Q = \sum_{n=0}^{n=3} r_n(\tau)x^n = r_0(\tau)x^0 + r_1(\tau)x^1 + r_2(\tau)x^2 + r_3(\tau)x^3 \quad (2.18)$$

Donde:

$$x = \left[ \frac{b_b}{(b_b + a)} \right] \quad (2.19)$$

Y los  $r_r(\tau)$  son los coeficientes para los diversos órdenes de expansión en  $x$ , y  $\tau$  es la profundidad óptica o espesor óptico  $\tau = \int_0^z c(z')dz'$ ; en el caso, se encuentra en la superficie, por lo tanto  $\tau=0$ . Según los valores de los coeficientes  $a$  y  $b_b$  en el desarrollo, pueden despreciarse los términos de orden superior a 1, y como  $r_0(0^-)$  es muy pequeño, también se puede despreciar. Por lo tanto, la expresión queda:

$$R(0^-) = r_1x = r_1 \times \left[ \frac{b_b}{(b_b + a)} \right] \quad (2.20)$$

Aquí,  $r_1$  es el valor del coeficiente de expansión de orden 1 cuando el espesor óptico  $\tau = (0^-)$  (esto

---

es, justo bajo la superficie).  $r_1$  depende de las condiciones de iluminación y, en particular, del ángulo cenital solar:

- $r_1=0.3244$ , cuando el sol está situado en el zenit.
- $r_1=0.3687$ , cuando la radiancia incidente desde el cielo es independiente de su dirección de procedencia (altura y azimut).

Si  $a$  es mucho mayor que  $b_b$ , la expresión anterior se puede aproximar por (Morel y Prieur, 1977 en (Domínguez Gómez *et al.*, 2011)):

$$R(0^-) = r_1 x = r_1 \times \left[ \frac{b_b}{(a)} \right] \quad (2.21)$$

Con  $r_1 \simeq 0.33$ .

Repitiendo el proceso de simulación, se obtuvieron la anteriormente citada relación existente de extinción vertical difusa y los coeficientes de absorción y retrodispersión y el valor de  $r_1$  (Kirk, 1994):

$$r_1(\mu_0) = -0.629\mu_0 + 0.975 \quad (2.22)$$

Donde, de nuevo,  $\mu_0$  es el coseno del ángulo cenital solar. Un análisis detallado de la interfase entre el medio atmosférico y el medio acuático permite relacionar la radiancia reflejada desde el medio acuático a la atmósfera,  $L_u(0^+, \lambda)$ , con la radiancia reflejada dentro del medio acuático  $L_u(0^-, \lambda)$ , y con las irradiancias de *upwelling*,  $E_u(0^-, \lambda)$ , *downwelling*,  $E_d(0^+, \lambda)$ , y  $E_d(0^-, \lambda)$  (Gordon *et al.*, 1988):

$$L_u(0^+, \lambda) = \frac{E_d(0^+, \lambda)\tau(1 - \rho^-[(1 - \rho^-)R^-]}{Qn^2} \quad (2.23)$$

En esta expresión  $\tau$  es la transmitancia,  $\rho$  es la reflectividad de Fresnel para incidencia desde la atmósfera,  $\rho^-$  es la reflectividad de Fresnel para transmisión desde el agua,  $n$  es el índice de refracción del agua y:

$$R^- = \frac{E_u(0^-, \lambda)}{E_d(0^-, \lambda)} \quad (2.24)$$

y

$$Q = \frac{E_u(0^-, \lambda)}{L_u(0^-, \lambda)} \quad (2.25)$$

Si en el análisis se tiene en cuenta la geometría de las partículas que constituyen el medio acuático, la relación que se obtiene para la reflectividad del agua observada desde la atmósfera es (Morel y Gentili,

1991; Antoine y Morel, 1997 en (Domínguez Gómez *et al.*, 2011)):

$$R(0^+, \lambda, \theta_s, \theta', \Delta\phi) = \pi \frac{L_u(0^+, \lambda, \theta_s, \theta', \Delta\phi)}{E_d(\lambda)} = \pi R_{rs} = \pi \frac{\tau_{\theta_s}(\lambda), R(\theta'), f(\lambda, \theta_s), R(0^-, \lambda, \theta_s, \theta', \Delta\phi)}{Q(\lambda, \theta_s, \theta', \Delta\phi)} \quad (2.26)$$

Donde  $\theta'$  es el ángulo de refracción que se relaciona con el de incidencia  $\theta$  por la ley de Snell ( $\theta' = \sin n \sin \theta^{-1}$ );  $\phi$  el ángulo de azimut y  $\Delta\phi$  es la diferencia entre los ángulos azimutales de incidencia y de observación;  $R_{rs}$  es la reflectividad remota (reflectividad observada desde el satélite);  $\tau_{\theta_s}$  es la transmitancia aire-agua (función del ángulo de incidencia);  $f(\lambda, \theta_s)$  es una función que caracteriza el tipo de dispersión de la radiación y depende de la geometría de las partículas;  $R(\theta')$  es un factor geométrico que justifica los efectos de refracción y reflexión en la interfase aire-agua (Gordon *et al.*, 1988):

$$R(\theta') = \frac{(1 - \rho^-)[1 - \rho_F(\theta')]}{[1 - r^- R(0^-)]n^2} \quad (2.27)$$

En esta expresión,  $\rho_F(\theta')$  corresponde al coeficiente de reflexión de Fresnel para incidencia desde el aire expresado en función del ángulo de refracción  $\theta'$ ,  $\rho^-$  al coeficiente de reflexión de Fresnel medio para incidencia desde el agua, y  $r^-$  a la reflexión media para la radiancia reflejada en la interfase agua-aire. En conclusión, existe una relación entre la reflectividad del medio acuático observada desde fuera de éste,  $R(0^+)$ , y los componentes que existen en él, a través de los coeficientes de absorción y retrodispersión, dada por la expresión:

$$R(\theta^+) = \Psi \times \frac{b_b}{(a + b_b)} \quad (2.28)$$

$$\Psi = \Pi \frac{\tau_{qs}(\lambda) R(\theta') f(\lambda, \theta_s r_1(\mu_0))}{Q(\lambda, \theta_s, \theta', \Delta\phi)} \quad (2.29)$$

### Constituyentes de las aguas naturales

Los constituyentes de las aguas naturales se dividen, de forma tradicional, en materia coloidal o disuelta y materia particulada de origen orgánico o inorgánico, viva o muerta (Mobley, 1994). Dado que el estado coloidal se define como aquel estado de suspensión en el que los tamaños de partículas no son resolubles ópticamente (esto es, tiene diámetros inferiores a la longitud de onda e la luz visible, 400 nm – 700 nm), determinar si la materia que hay en el agua es disuelta o es materia particulada es sencillo, ya que, si se hace pasar el agua procedente de una masa de agua a través de un filtro cuyo tamaño de poro es de 0,4  $\mu m$ , toda la materia que sea capaz de atravesarlo será considerada materia coloidal o disuelta, y la que sea retenida por el filtro, materia particulada.

El agua pura del mar contiene varias sales disueltas; el efecto de éstas sobre la absorción en el rango visible es insignificante, aunque es probable que incremente (en poca medida) la absorción en las

---

longitudes de onda ultravioleta. Sin embargo, sí que incrementa considerablemente la absorción de longitudes de onda largas ( $\lambda \geq 0,1 \text{ m}$ ) debido a la conductividad que confieren al agua.

Tanto las aguas dulces como las saladas contienen concentraciones de materia orgánica disuelta, originada por la vegetación muerta, que genera ácidos fúlvicos y húmicos. Estos compuestos son generalmente de color marrón y, en concentraciones suficientes, pueden colorear el agua de tonos ocreos (en la gama del amarillo al marrón) razón por la cual, se los denomina generalmente materia amarilla o materia orgánica disuelta coloreada (también se le conoce como gelbstoff y gilvin o, simplemente CDOM). La sustancia amarilla absorbe muy poco en el rojo, pero la absorción se incrementa rápidamente para longitudes de ondas más cortas y puede ser significativa en el azul o el violeta. La materia particulada tiene dos orígenes diferentes: biológico (orgánico) y físico-químico (inorgánico). La materia particulada inorgánica se origina por la acción de fenómenos meteorológicos sobre rocas y sólidos que los llevan hacia el agua, así como la acción mecánica del agua sobre las rocas. Está compuesta principalmente por granos de cuarzo, arena, arcillas y óxidos metálicos en tamaños que oscilan entre  $1\text{-}10\mu\text{m}$ .

La materia particulada orgánica se encuentra en muchas formas:

- Virus. Sus concentraciones varían desde  $10^{12}\text{-}10^{15}$  partículas  $\text{m}^{-3}$ . Estas partículas son generalmente mucho más pequeñas ( $20\text{-}250 \text{ nm}$ ) que la longitud de onda de la luz visible. A pesar de su cantidad, no tienen influencia en la absorción y en la dispersión de la luz (Mobley, 1994).
- Coloides. Partículas coloidales inertes cuyo tamaño varía entre  $0.4\text{-}1.0 \text{ nm}$ , y cuya concentración típica es de  $10^{13}$  partículas  $\text{m}^{-3}$ , o de  $10^{15}$  partículas  $\text{m}^{-3}$  para tamaños inferiores a  $0.1 \mu\text{m}$ . Parte de la absorción tradicionalmente atribuida a la materia disuelta es debida a los coloides. Además, contribuyen considerablemente a la dispersión por efecto Tyndall.
- Bacterias. Las bacterias vivas tienen un tamaño que oscila entre  $0.2\text{-}1.0\mu\text{m}$  con una concentración típica que varía entre  $10^{11}\text{-}10^{13}$  partículas  $\text{m}^{-3}$ . Las bacterias intervienen en los procesos de retrodispersión y absorción en aquellas aguas con escaso fitoplancton.
- Seston. Se trata de la materia que se encuentra en suspensión en las aguas naturales y que tiene tamaños entre  $1\mu\text{m}$  y  $100\mu\text{m}$ . Está formada por:
  - Plancton. Son los organismos vivos:
    - Fitoplancton: conjunto de especies planctónicas de carácter vegetal. Una clasificación sencilla y simplificada puede ser la división del fitoplancton en: algas unicelulares, algas cianofíceas y flagelados fotosintéticos, aunque existe una gran variedad de especies,

tamaños, formas y concentraciones (como se ha mencionado en las componentes del agua y del fitoplancton). El tamaño de la célula varía desde  $1\mu m$  hasta  $200\mu m$  y algunas especies forman cadenas mayores de células individuales.

- Zooplancton: conjunto de especies planctónicas formando por larvas, pequeños invertebrados, protozoos, etc.
- Tripton o materia particulada inerte.
  - Detritus orgánico: partículas orgánicas inertes de varios tamaños que son producidas, por ejemplo, cuando el fitoplancton muere y sus células se fragmentan, o cuando el zooplacton se nutre del fitoplancton y deja fragmentos de células y restos fecales.
  - Detritus inorgánico: partículas inorgánicas (arcillas, restos de sílice, etc).
- Partículas grandes. Son partículas mayores de  $10\mu m$ , formadas principalmente por pequeños animales vivos con tamaños que pueden alcanzar hasta los 2 cm; influyen principalmente en la retrodispersión de la luz.

### Propiedades ópticas de los constituyentes de las aguas naturales

El coeficiente de absorción,  $a$ , caracteriza la absorción de la luz por unidad de longitud de onda en el medio y se puede descomponer como la suma de distintas contribuciones:

$$a(\lambda) = a_a(\lambda) + a_f(\lambda) + a_{ss}(\lambda) + a_{md}(\lambda) \quad (2.30)$$

La luz en el medio acuático es absorbida por el agua, ( $a_a$ ), por el fitoplancton ( $a_f$ ), por la materia particulada (es decir, por los sólidos de suspensión ( $a_{ss}$ ), sin incluir la absorbida por el fitoplancton) y por la materia orgánica disuelta ( $a_{md}$ ). Esta absorción depende, además, de la longitud de onda (Kirk, 1992). El coeficiente de dispersión,  $b$ , caracteriza la dispersión de la luz por unidad de longitud en el medio. La dispersión de la luz se produce hacia delante (prodispersión  $-b_f(\lambda)$ , “forward”) y hacia atrás (retrodispersión  $-b_b(\lambda)$ , “backward”). El coeficiente de dispersión es la suma de ambos (Kirk, 1994):

$$b(\lambda) = b_f(\lambda) + b_b(\lambda) \quad (2.31)$$

La prodispersión y retrodispersión son producidas por el agua y por el total de partículas que existen en la misma; por lo tanto, estos coeficientes, a su vez, son la suma de los coeficientes de prodispersión y retrodispersión del agua ( $b_{fa}$  y  $b_{ba}$ ) y de las partículas presentes en ella ( $b_{fp}$  y  $b_{bp}$ ), y dependen de

---

la longitud de onda (Smith y Baker, 1981 en (Domínguez Gómez *et al.*, 2011)):

$$b_f(\lambda) = b_{fa}(\lambda) + b_{fp}(\lambda) \quad (2.32)$$

$$b_b(\lambda) = b_{ba}(\lambda) + b_{bp}(\lambda) \quad (2.33)$$

Sustituyendo sus valores correspondientes, el coeficiente de dispersión total es:

$$b(\lambda) = b_{fa}(\lambda) + b_{fp}(\lambda) + b_{ba}(\lambda) + b_{bp}(\lambda) \quad (2.34)$$

El coeficiente de dispersión varía en función del tipo de agua. La pendiente de la curva que describe su comportamiento, según la longitud de onda, decrece con el aumento de la turbidez del agua. En general, este coeficiente se calcula siguiendo la ley  $\lambda^{-n}$ , donde el valor concreto de  $n$  varía de un autor a otro (véase Morel y Prieur, 1977; Phillip y Kirk, 1984; Francisko y McCormick, 1994; Berwald et al., 1995; Lindell et al., 1999 en (Domínguez Gómez *et al.*, 2011)). Se asume la más reciente, que relaciona el coeficiente de dispersión con la longitud de onda según la relación:

$$b(\lambda) = b(580nm) \cdot \left(580 \frac{nm}{\lambda}\right)^{0.5} \quad (2.35)$$

El coeficiente de retrodispersión es igual al 2 % de la dispersión (Kirk, 1994):

$$b_b(\lambda) = 0.02 \cdot b(\lambda) \quad (2.36)$$

El espectro de reflectancia depende del coeficiente de absorción y retrodispersión y del análisis de los espectros de los diferentes elementos que hay en el agua, se llega a las siguientes conclusiones (Domínguez Gómez *et al.*, 2011):

- 1.La reflectancia de una masa de agua a longitudes de onda por encima de los 1000 *nm* es muy pequeña ( $R \simeq 0$ ) debido a que el agua absorbe toda la energía que le llega.
- 2.Entre 700 *nm* y 1000 *nm* sólo existe un máximo en torno a 805 *nm* que identifica la cantidad de sólidos en suspensión que existen en esa masa de agua.
- 3.Entre 400 *nm* y 700 *nm*, la reflectancia nos dará información de la existencia de todos los pigmentos fotosintéticos que están presentes y, en consecuencia, del tipo de microalgas en el agua.
- 4.La reflectancia de una masa de agua a longitudes de onda por debajo de 400 *nm* depende de la cantidad de materia amarilla y seston que haya en ella; normalmente esta respuesta también

será muy pequeña.

La teledetección ha permitido realizar diversos estudios de masas de agua continentales mediante imágenes multiespectrales (Domínguez Gómez *et al.*, 2011). Sin embargo, la identificación de pigmentos mediante teledetección sólo se ha podido realizar a partir de la década de 1990 con la aparición de las imágenes hiperespectrales del sensor AVIRIS (Richardson *et al.*, 1990 en (Domínguez Gómez *et al.*, 2011)). Esta línea de trabajo se ha mejorado con el tiempo (Aguirre y Gómez, 2001 en (Domínguez Gómez *et al.*, 2011)), permitiendo identificar el grupo de algas existentes en las masa de agua, sin olvidar que las imágenes hiperespectrales han permitido obtener algoritmos para la cuantificación de otros pigmentos, como puede ser la ficocianina, pigmento características de las cianobacterias (Verdú *et al.*, 2005 en (Domínguez Gómez *et al.*, 2011)).

Para realizar un estudio de calidad de agua con teledetección es necesario tener en cuenta el tipo de sensor (que puede ser activo, como el Radar o el LiDAR, o, más comúnmente, pasivo), su resolución (la distancia mínima que puede distinguir) y las dimensiones de la masa de agua a estudiar. Para elegir la resolución del sensor hay que tener en cuenta que:

- En aguas oceánicas (en aguas profundas y lejos de la costa) se pueden utilizar sensores de baja resolución espacial (centenares de metros o superiores).
- En aguas epicontinentales pueden utilizarse, para grandes masas de agua, sensores de baja resolución espacial, pero lo normal es utilizar sensores de media y alta (decenas de metros o inferiores).

Una vez determinada la resolución espacial, se analiza el objetivo del trabajo y se determina el rango espectral a utilizar (visible, infrarrojo cercano o térmico).

### **Calidad del agua mediante sensores pasivos**

La utilización de sensores pasivos permite estudiar dos rangos espectrales bien determinados y diferenciados:

- 1. Infrarrojo térmico (longitud de onda entre los 3.5  $\mu m$  y los 20  $\mu m$ )
- 2. Visible e infrarrojo cercano (longitudes de onda entre los 0.4  $\mu m$  y los 3  $\mu m$ ).

La Agencia Espacial Europea (ESA), realizó a principios de la década de 1990 un estudio de los parámetros de calidad de aguas oceánicas y cuáles eran los sensores remotos adecuados para estudiarlos en función de la resolución espectral y espacial, así como su extrapolación y aplicación a aguas epicontinentales en función de las características espaciales de la masa de agua a estudiar (las conclusiones, actualizadas a la época actual, se resumen en la tabla siguiente, adapta de Schmitt,

---

1993).

Los sensores diseñados para el estudio de las aguas oceánicas pueden ser utilizados para estudios de aguas epicontinentales, puesto que su resolución espectral es adecuada para la observación de las variables de calidad del agua (pigmentos, sólidos de suspensión, etc.). Sin embargo, es necesario que las resoluciones espacial y radiométrica sean las adecuadas para la dinámica y extensión de la masa de agua bajo estudio.

Actualmente, se dispone de otros sensores aptos para este tipo de estudios, ya sean aerotransportados, como son los DS-1268 y CASI, o a bordo de plataformas orbitales, o como los SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor), MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer), MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer, a bordo del satélite ENVISAT), Thematic Mapper (TM, a bordo de los satélites Landsat), IKONOS, Quick Bird o World View2.

## 2. MARCO TEÓRICO

**Tabla 2.2:** Características de las masas de agua y sensores adecuados para su estudio. Adaptada de Schmitt (1993)

Parámetros	Long. de onda	Sensor	Bandas	Resolución
Temperatura superficial	ca. 10.5-12.5 $\mu\text{m}$	Landsat ETM-TM-OLI	6	120 m
		AVHRR	4,5	1.1km
		SEVIRI	2	5km
		ATSR		1km
		CZCS	6	Ca. 825 m
		MODIS	27-36	1000m
Sólidos en suspensión	440, 520, 550, 670 $\mu\text{m}$	Landsat-TM	1,2,3	30 m
		SPOT-XS	1,2	20m
		AVHRR	1,2	1.1km
		CZCS	1,2,3,4	Ca.825m
		MODIS	2	500m
		MERIS	13,14	300m
		SeaWiFS	8	300m
		World View 2	NIR1, NIR2	2m
Concentración de pigmentos	443, 520, 550 $\mu\text{m}$	Landsat-TM	1,2,3	30 m
		SPOT-XS	1,2,3	20m
		AVHRR	1,2	1.1km
		CZCS	1,2,3,4,5	Ca.825m
		MODIS	3,4	500m
		MERIS	2,3,4,5	300m
		SeaWiFS	2,3,4,5	300m
		World View 2	Blue, Green	2m

### Temperatura superficial de masas de agua mediante sensores pasivos.

La teledetección espacial usa el rango del infrarrojo térmico con una resolución espacial baja (si consideramos el umbral entre resolución alta y baja de 100m/píxel). La ventaja de este rango del infrarrojo térmico ofrece para este tipo de estudios es que se conoce la relación entre la radiancia espectral que llega al sensor y la temperatura de brillo de la superficie del agua es esa longitud de onda (Melpia, 1991; Banderas y Caselles, 1992 en Domínguez Gómez *et al.*, 2011); esto ha permitido obtener, para cada sensor, ecuaciones que realizan dicha transformación de forma automática y fidedigna (Price, 1983; Bartolucci, 1985; Sobrino et al., 1991 en Domínguez Gómez *et al.*, 2011). Esta circunstancia

---

ha permitido realizar multitud de estudios de masas de agua en el infrarrojo térmico con sensores de diferente resolución espacial:

- Baja (superior al kilómetro): el sensor más utilizado en el Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) embarcado en los satélites de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y MetOp del sistema EPS (EUMETSAT Polar System), con 1.1 km de resolución espacial. El sensor AVHRR ha servido para realizar estudios de afloramientos en aguas marinas y sus consecuencias (Robinson et al., 1997; Triñanes et al., 1997; Torres et al., 1999 en (Domínguez Gómez *et al.*, 2011)), así como la estructuración oceánica debido a afloramientos (Sordo et al., 1999 en (Domínguez Gómez *et al.*, 2011)); también se ha usado para la evaluación de temperatura superficial del agua, tanto en aguas oceánicas (Robinson et al., 1992, 2; Pérez-Marreno et al., 1999 en (Domínguez Gómez *et al.*, 2011)), como en grandes lagos (Bolgrien et al., 1995 en (Domínguez Gómez *et al.*, 2011)).
- Media (entre 10 y 1000 m): los sensores más utilizados han sido los que llevan instalados los satélites Landsat, MultiSpectral Scanner (MSS) y Thematic Mapper (TM), en sus bandas en el infrarrojo térmico. Con estas bandas se han estudiado lagos (Ritchie et al., 1990), embalses (Peña y Serrano, 1992; Peña y Serrano, 1994) y lagunas (Domínguez et al., 1997; Domínguez 1998; Domínguez y Peña, 1999 en (Domínguez Gómez *et al.*, 2011)).
- Alta (inferior a 10 m): para obtener esta resolución es necesario utilizar sensores aeroportados, como el Thermal Infrared Multispectral Scanner (TIMS; Anderson, 1992) o el Airbone Thematic Mapper (ATM; Gutiérrez et al., 1994; Peña et al., 1997 en (Domínguez Gómez *et al.*, 2011)). Además estudiar pequeñas masas de agua, permiten analizar la temperatura de la superficie de los ríos.

### **Validación del uso de sensores remotos.**

Como se mencionó anteriormente la teledetección mediante sensores pasivos, se basa en las inferencias por detección óptica sobre los constituyentes presentes en el agua se hacen a partir de los cambios que las masas de agua causan en el campo de luz solar, que al incidir y penetrar en la superficie del agua, se propaga en la columna de agua y eventualmente una fracción retorna y emerge de la superficie (Figura 2.12). Es esta fracción de la radiación incidente, alterada por la columna de agua, que cuando es registrada por sensores remotos permite inferir sobre la composición y las concentraciones de los constituyentes del agua.

Para parametrizar, calibrar y validar, tanto los algoritmos de estimaciones de los constituyentes del agua como algoritmos de corrección atmosférica de las imágenes, medidas específicas de radiación e

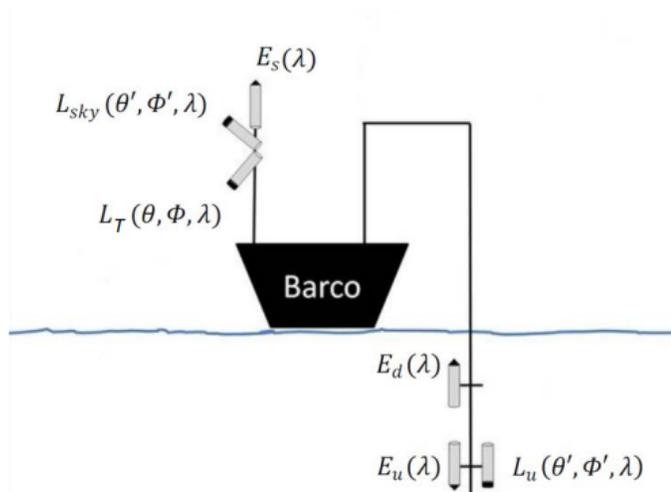
irradiación se realizan in situ, antes y después de que la luz solar interactúe con la columna de agua. Es importante resaltar que algunas medidas deben ser hechas concomitantes con el paso del satélite. Las principales medidas in situ recomendadas por protocolos de estudio del color del agua son:

- Irradiación incidente en la superficie del agua,  $E_s(\lambda)$ : Se trata de la irradiación planar formada por la radiación solar directa y difusa del cielo.  $E_s(\lambda)$  carga la información de la composición espectral y de la intensidad de la irradiación incidente en el instante de las demás medidas radiométricas.  $E_s(\lambda)$  se utiliza en la determinación de la reflectancia de sensoriamiento remoto  $R_{rs}(\lambda)$  y del coeficiente de atenuación difuso  $k_d(\lambda)$  en la columna de agua.
- Radiancia ascendente de la superficie del agua,  $L_T(\theta, \phi, \lambda)$ : Se trata de la radiancia total medida por un sensor espectral de radiancia en la posición  $(\theta, \phi)$  por encima de la superficie del agua (Figura siguiente).  $L_t(\theta, \phi, \lambda)$  está formado por la radiación emergente de la columna de agua  $L_w(\theta, \phi, \lambda)$  más la radiancia especular reflejada por la superficie del agua  $L_{RS}(\theta, \phi, \lambda)$  (radiación que alcanzó la superficie, pero no penetró en la superficie agua). La variable radiométrica de interés en la óptica hidrológica es  $L_W(\theta, \phi, \lambda)$ , pues es ella que carga la información de los cambios causados en el campo de luz por la columna de agua. Sin embargo, no es posible medirla directamente. Su obtención se realiza removiendo  $L_{RS}(\theta, \phi, \lambda)$  de la medida de  $L_T(\theta, \phi, \lambda)$ , a partir de  $L_W(\theta, \phi, \lambda)$  se utiliza en la determinación de  $R_{rs}(\lambda)$ .
- Radiación del cielo,  $L_{sky}(\theta', \phi', \lambda)$ : Se trata de la radiación solar, que después de ser diseminada los constituyentes atmosféricos, se propaga hacia la superficie del agua. Parte de esta radiación penetra en el agua y una parte de la que es reflejada por la superficie va en la dirección del sensor que mide  $L_T(\theta, \phi, \lambda)$  contribuyendo así a la fracción  $L_{RS}(\theta, \phi, \lambda)$  de  $L_T(\theta, \phi, \lambda)$ . Como se muestra en la Figura 3.12, el sensor que mide  $L_{sky}(\theta', \phi', \lambda)$  se apunta al cielo en el mismo plano azimutal del sensor que mide  $L_T(\theta, \phi, \lambda)$  pero con 90 grados de diferencia en el ángulo zenital en relación al sensor de medida de  $L_T(\theta, \phi, \lambda)$ . Los detalles de la posición de los sensores se describen en el capítulo 4. Las medidas de  $L_{sky}(\theta', \phi', \lambda)$  se utilizan en el procesamiento para la remoción de la radiación especular en la superficie del agua (*sun glint* y *sky glint*).
- Irradiancia descendente en la columna de agua,  $E_d(\lambda)$ : Se trata de la medida de irradiación planar del campo de luz que penetró en la superficie del agua. Medidas de  $E_d(\lambda)$  proporcionan información sobre la composición espectral y la intensidad de la radiación a lo largo de la columna de agua.  $E_d(\lambda)$  también se utiliza para la determinación del coeficiente de atenuación difusa de la columna de agua  $k_d(\lambda)$ , que se describe en la sección 7 de este capítulo. Medidas de  $E_d(\lambda)$  se realiza con un colector coseno posicionado perpendicular a la superficie del agua (Figura siguiente). Este sensor se descarga lentamente en la columna de agua mientras las medidas se

---

realizan.

- Irradiancia ascendente en la columna de agua,  $E_u(\lambda)$  Como resultado del esparcimiento en la columna de agua, en cualquier profundidad que tenga un flujo de luz descendente, existirá también un flujo ascendente. La irradiación  $E_u(\lambda)$  es la medida de la irradiación plana de este flujo de luz ascendente. Medidas de  $E_u(\lambda)$  proporcionan información sobre la composición espectral e intensidad de la radiación ascendente en la columna de agua.  $E_u(\lambda)$  se utiliza junto con  $E_d(\lambda)$  para determinar la reflectancia de la irradiación  $R(z, \lambda)$  definida anteriormente. La  $R(z, \lambda)$  es una variable útil pues existen relaciones empíricas y teóricas entre fitoplancton, sólidos suspendidos, propiedades ópticas inherentes y la  $R(z, \lambda)$  (Bukata et al., 1995 en (Domínguez Gómez *et al.*, 2011)).
- Radiancia ascendente en la columna de agua,  $L_u(\lambda)$ : Se trata de la medida de la radiación ascendente aproximadamente vertical en la columna de agua. Como  $l_u(\lambda)$ , la medida de  $L_u(\lambda)$  se puede hacer a lo largo de la columna de agua. Sin embargo, los valores más usados son los medidos justo debajo de la superficie, denominados radiancia de subsuperficie  $L_u(\lambda, 0^-)$ . Medidas de  $L_u(\lambda, 0^-)$  se utilizan en la determinación de la reflectancia de la percepción remota de subsuperficie  $R_{rs}(\lambda, 0^-)$  que se utiliza en modelos bio-ópticos analíticos y también para extrapolar la  $R_{rs}(\lambda, 0^-)$  para la reflectancia de la percepción remota  $R_{rs}(\lambda)$ .

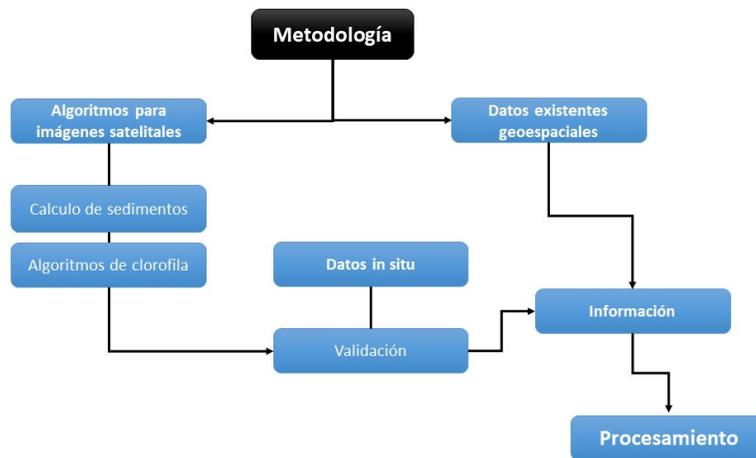


**Figura 2.12:** Configuración esquemática de sensores para medidas *in situ* de magnitudes radiométricas recomendadas por protocolos de estudio del color del agua.



# Metodología y datos

En este contexto, el procesamiento digital de las imágenes se aplica en la extracción de información espectral de estos datos orbitales. Dicha información es de gran importancia para realizar la investigación presente, ayuda a obtener valores puntuales y actuales para realizar un análisis de problemáticas ambientales en cuencas lacustres con tecnologías de la información geográfica, debido a que la Teledetección permite obtener información cuantitativa del área de estudio, generando parte de la información para el desarrollo de Sistemas de Información Geográfica. En resumen la metodología de la investigación se muestra a continuación:



**Figura 3.1:** Esquema de metodología, elaboración propia.

La selección del sensor se realiza en función del tipo de estudio que se realiza, de acuerdo a las dimensiones de la cuenca lacustre, la resolución temporal que ofrece el sensor, y la información que se desea obtener. De acuerdo con todo eso, se utilizaron las imágenes de Landsat 8 OLI, adquirida el 12 de

mayo del 2019, con el siguiente ID LC08\_L1TP\_226087\_20190412\_20190422\_01\_T1, imagen descargada del portal de la U.S. Geological Survey, disponible en: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

#### **Algoritmos para imágenes satelitales.**

Con el avance de la tecnología se han creado varios algoritmos para dar soporte a las aplicaciones de Teledetección en agua, como métodos de corrección atmosférica, algoritmos de clasificación de nubes y técnicas para la corrección del efecto especular y de adyacencia. De hecho, las incertidumbres en el procesamiento de las imágenes acaban afectando la exactitud de la reflectancia del agua, y consecuentemente, en las estimaciones de los COA (constituyentes ópticamente activos (COA), como los sólidos en suspensión, los pigmentos fotosintetizantes (clorofila) y la materia orgánica disuelta a color).

Por ejemplo, el esparramiento atmosférico puede representar hasta el 90% de la radiación medida por el sensor en la región visible en píxeles de agua, lo que hace que esta corrección sea bastante importante para los estudios cuantitativos en aguas continentales (Barbosa *et al.*, 2019). En aguas oceánicas, los algoritmos de corrección atmosférica utilizan la premisa del pixel oscuro en la región del NIR (reflectancia nula) para corregir los efectos del esparramiento de los aerosoles.

Es por ello que se deben realizar las correcciones de protocolo de una imagen satelital, para lograr un mejor resultado en la aplicación de los algoritmos. Una de éstas, es la corrección atmosférica o reflectividad de superficie, donde los valores de radiancia  $L_{\lambda sat}$  se convierten en valores de reflectividad a tope de la atmósfera ( $\rho_{\lambda TOA}$ ), sin considerar efectos atmosféricos y asumiendo una superficie uniforme Lambertiana bajo condiciones libre de nubes, por medio de:

$$\rho_{\lambda TOA} = \frac{\pi L_{\lambda sat}}{E_{\lambda 0} d^{-2} \cos \theta_z} \quad (3.1)$$

Donde  $\pi(sr)$  representa la hipótesis de superficie Lambertiana,  $d$  es la distancia Tierra-Sol medida en unidades astronómicas ( $ua$ ),  $E_{\lambda 0}$  es la irradiancia solar espectral exoatmosférica (en  $W m^{-2} \mu m^{-1}$  y  $\theta_z$  es el ángulo cenital solar. Para las regiones del espectro EM donde se situán las bandas 5 y 7 (IRM) que corresponden la longitud de onda de 0.851 - 0.879 y 2.107 - 2.294 ( $\mu m$ ), de los sensores considerados, la atmósfera no introduce efectos significativos y, por lo tanto, la reflectividad de superficie ( $\rho_{\lambda S}$ ) fue estimada a partir de la ecuación (3.1) ( $\rho_{\lambda S} = \rho_{\lambda TOA}$ ) para las bandas 5 y 7). Por otro lado para las bandas en regiones del espectro V e IRC, los efectos atmosféricos de dispersión no pueden despreciarse y es por ello que la  $\rho_{\lambda S}$  se estimó, considerando una superficie uniforme Lambertiana y con condiciones libres de nubes, por medio de la siguiente ecuación, Schroeder et al., 2006; Soundani et al., 2006 (Citado por Rivas Raúl, 2011):

---


$$\rho_{\lambda S} = \frac{\pi(L_{\lambda sat} - L_{\lambda p})}{T_{\lambda v}(E_{\lambda 0}d^{-2} \cos \theta_z T_{\lambda z} + E_{\lambda down})} \quad (3.2)$$

Donde  $L_{\lambda p}$  ( $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ ) es la radiancia registrada como resultado de la interacción de la radiación EM con los componentes atmosféricos (del inglés *path radiance*),  $T_{\lambda v}$  es la transmisividad atmosférica en la dirección de la iluminación solar y  $E_{\lambda down}$  es la irradiancia difusa del cielo hacia abajo ( $Wm^{-2}\mu m^{-1}$ ). Para estimar los valores de los parámetros atmosféricos  $T_{\lambda z}$ ,  $T_{\lambda v}$ ,  $E_{\lambda down}$  y  $L_{\lambda p}$  se utilizó método conocido como Resta de Superficies Oscuras (DOS, del inglés Dark Object Subtraction) (Gilmore *et al.*, 2015).

Este método supone que la imagen de satélite contiene ciertos píxeles con una  $\rho_{\lambda S}$  (denominada por simplicidad como  $\rho_{\lambda}$  de aquí en adelante) cercana a cero (zonas oscuras), como ejemplo aquellos correspondientes al agua clara y profunda, a una densa forestación o a una sombra entre otros, y que en dichos píxeles es posible asociar la señal registrada principal y casi exclusivamente a la producida por efectos de la dispersión atmosférica (o scattering) denominada  $L_{\lambda p}$  Chavez, 1988 (Citado por (Rivas Raúl, 2011)). Por lo tanto, de acuerdo al método DOS, es necesario sustraer a cada  $L_{\lambda sat}$  el valor de  $L_{\lambda p}$  introducido por la atmósfera. La radiancia  $L_{\lambda p}$  se estimó usando la expresión de Schroeder *et al.*,2006; Chavez *et al.*,1996; Moran *et al.*,1992 en Rivas Raúl, (2011):

$$L_{\lambda p} = ND_{\lambda dark}G_{\lambda} + B_{\lambda} \frac{(E_{\lambda 0} \cos \theta_z T_{\lambda z} T_{\lambda v})}{d^{-2}\pi} \quad (3.3)$$

Donde  $ND_{\lambda dark}$  es el  $ND_{\lambda}$  mínimo en cada banda espectral para una dada región de interés (ROI - del inglés *Region of Interest*), elegida como zona oscura, de al menos 1000 píxeles (Teillet y Fedosejevs, 1995 en Rivas Raúl, (2011)). Este método asume una atmósfera *Rayleigh* sin aerosoles y una reflectividad en superficie del 1 % para el objeto oscuro ( $B_{\lambda}$ ). Los valores de  $\rho_{\lambda}$  obtenidos con el método DOS presentan un error del orden del 10 % (Barnaby y Pellikka, 2003 en Rivas Raúl, (2011)).

$T_{\lambda v}$  y  $T_{\lambda z}$  se calcularon a partir de las ecuaciones:

$$T_{\lambda v} = \exp\left(\frac{-\tau_{\lambda r}}{\cos \theta_v}\right) \quad (3.4)$$

$$T_{\lambda z} = \exp\left(\frac{-\tau_{\lambda r}}{\cos \theta_z}\right) \quad (3.5)$$

Siendo  $T_{\lambda r}$  el sensor óptico para la dispersión *Rayleigh* obtenido por medio de la ecuación propuesta por Kaufman (1989) en Rivas Raúl (2011):

$$T_{\lambda r} = \frac{0.008569}{\lambda_m^4 (1 + 0.0113\lambda_m^2 + 0.0113\lambda_m^4)} \quad (3.6)$$

Donde  $\lambda_{ef}$  (en  $\mu m$ ) es la longitud de onda efectiva de cada banda (tabla 3.1). Finalmente,  $E_{\lambda_{down}}$  es en considerada nula, debido a que su contribución es insignificante con respecto a  $E_{\lambda_0}$  (Song et al., 2001; Barnaby y Pellikka, 2003 en Rivas Raúl, (2011))

**Tabla 3.1:** Tabla adaptada de  $\lambda_{ef}$  de las bandas de los sensores TM y ETM, región V-IRC del espectro EM. (Rivas Raúl, 2011).

Banda	$\lambda_{ef}$ Sensor TM	$\lambda_{ef}$ Sensor ETM+	$\lambda_{ef}$ Sensor OLI
Banda 1 (azul)	0.485	0.479	0.482
Banda 2 (verde)	0.560	0.561	0.560
Banda 3 (rojo)	0.660	0.661	0.660
Banda 4 (IRC)	0.830	0.835	0.833

Muchos autores, mencionan que, es necesario no sólo las correcciones sino, también la aplicación de algún filtro o índice que permita distinguir las condiciones del área de estudio. La selección del índice aplicado se realiza mediante la experimentación con diferentes índices, dejando con mejores resultados el índice MNDWI Han-Qiu (2005). El índice de diferencia de agua normalizado (NDWI) de McFeeters (1996) fue modificado por la sustitución de una banda de infrarrojo medio como la banda 5 de Landsat TM para la banda de infrarrojo cercano utilizada en el NDWI.

El NDWI modificado (MNDWI) puede mejorar las características de aguas abiertas al tiempo que suprime e incluso elimina de manera eficiente ruido de la tierra acumulada, así como la vegetación y el ruido del suelo. El agua mejorada la información que utiliza el NDWI a menudo se mezcla con el ruido de tierra acumulado y el área de agua extraída se sobrevalora así.

En consecuencia, el MNDWI es más adecuado para mejorar y extraer información de agua para una región de agua con una fondo dominado por áreas de tierra edificada debido a su ventaja en la reducción e incluso eliminando el ruido de tierra acumulado sobre el NDWI. Han-Qiu (2005).

Dentro de la investigación se llevarán a cabo 3 algoritmos para el cálculo de Sedimentos de Suspensión (SS), para realizar un análisis cuantitativo entre los resultados obtenidos de cada uno y entre los mismos. Los mismos se describen a continuación:

- El algoritmo Topliss de artículo: “Algoritms for remote sensing of high concentration, inorganic suspended sediment (Topliss *et al.*, 1990)”, que propone algoritmos para el cálculo de sedimentos en suspensión, dependiendo el sensor y el rango de concentración.

$$square : \log_e SSC = -9.2R\left(\frac{4}{5}\right) + 2.8R\left(\frac{4}{5}\right)^2 + 9.4 \quad (3.7)$$

---

Las bandas de la imagen usadas para el algoritmo son 3, 4 y 5 para Landsat 8, ya que éstas cubren longitudes de onda de 530-590 nm, 640-670 nm y 850-880 nm respectivamente, este rango del espectro solar es donde mejor respuesta ofrece la reflectancia en aguas continentales.

- El algoritmo del total de sólidos suspendidos (TSS) (J. Wang, Lu, Liew, & Zhou, 2009) del libro *Introducción al sensoramiento remoto de sistemas acuáticos*. Barbosa *et al.* (2019).

$$\log_N TSS = 3.18263 \times \log_N(R(\lambda_1)) - 1.40060 \quad (3.8)$$

Es un algoritmo semi-empírico que utiliza la banda 5, debido a que la formula comprende un rango del espectro de 860 nm, lo que corresponde a dicha banda.

- Algoritmo para la concentración de sólidos en suspensión, del artículo *Teledetección aero-portada hiperespectral del embalse de Ribarroja* (Ruiz-Verdú *et al.*, 2001).

$$[SS] = 872.83 \times B31 - 1.2927 \quad (3.9)$$

En el caso de este algoritmo, requiere un rango del espectro de 757.4  $\mp$ 11.8, ya que dicho algoritmo se obtuvo a través de ecuaciones de regresión después de varias pruebas con el fundamento de la relación existente entre la reflectividad y las propiedades ópticas aparentes del agua, que se obtiene de soluciones numéricas de la ecuación de transferencia radiativa (Mobley, 1994).

Para el caso de los algoritmos de la clorofila, se aplicaron los siguientes:

- Algoritmo para la concentración de clorofila, del artículo *Teledetección aero-portada hiperespectral del embalse de Ribarroja* (Ruiz-Verdú *et al.*, 2001).

$$[chl - a] = 69.372 \times B23 - 7.105 \quad (3.10)$$

Donde la Clf-a es la concentración de clorofila a en mg/m<sup>3</sup>, se realiza la banda 23 del sensor MERIS, debido que se obtuvo una mejor correlación en las ecuaciones de regresión de dicho artículo. Para el caso de la investigación se utilizará la banda que contiene el ancho de banda más aproximado, de Landsat 8 OLI.

- Algoritmo semiempírico para la estimación de clorofila (chl-a) (Londe, 2008) del libro *Introducción al sensoramiento remoto de sistemas acuáticos*. (Barbosa *et al.*, 2019).

$$\log_N(chl - a) = 2.5231 \times \log_N\left(\frac{R(\lambda_2)}{R(\lambda_1)}\right) + 2.9052 \quad (3.11)$$

Que es un algoritmo semiempírico, que utiliza la banda 4 y 5, debido a que la fórmula comprende un rango del espectro de  $\lambda_1 = 650 \text{ nm}$ , y  $\lambda_2 = 840 \text{ nm}$  lo que corresponde a dichas bandas.

---

## Trabajo de Campo

Los datos radiométricos *in situ*, como la radiación y la irradiación espectral, son esenciales para estudio del comportamiento espectral de los cuerpos de agua y para la parametrización de algoritmos enfocados en la estimación de los COA. Sin embargo, las mediciones radiométricas son susceptibles a las incertidumbres causadas por factores externos, como la reflexión especular. Por lo tanto, el procesamiento de estos datos tiene por objeto garantizar la consistencia de las medidas y sus derivaciones matemáticas.

La metodología para realizar la toma de muestras de campo es clara y se puede dividir en:

- Planificación del muestreo
- Toma de datos de campo
- Análisis de los datos

Planificación Es la fase de mayor importancia, ya que de ella depende que los datos obtenidos en el muestreo sean fiables y, en consecuencia, utilizables desde el punto de vista científico. El objetivo del muestreo es validar los datos obtenidos a partir de las firmas espectrales, en las imágenes de Landsat 8 para la recolección de información en la Laguna Sauce Grande. Las variables a medir se pueden dividir en:

- a) Variables físicas del agua: son aquellas que determinan las propiedades aparentes (reflectividad y coeficiente de atenuación) e inherentes (coeficiente de absorción y retrodispersión) del agua. De igual forma, la temperatura, que por estudios de teledetección sólo podemos estudiar la temperatura superficial de la masa de agua.
- b) Variables biológicas de calidad del agua: son aquellas que determinan la parte viva existente en el agua (fitoplancton) y la materia muerta (sólidos en suspensión y materia orgánica disuelta). El estudio de fitoplancton se realiza a partir de los pigmentos fotosintéticos existentes, siendo la clorofila-a el pigmento más presente, por lo que su concentración es un parámetro característico en el estudio. La materia muerta se caracteriza estudiando los sólidos en suspensión, que son las partículas que no se disuelven en el agua, y la materia orgánica disuelta o materia amarilla, que corresponde a las partículas orgánicas disueltas en el agua. A nivel microscópico, los sólidos en suspensión se pueden caracterizar mediante dos variables: la turbidez, medida con un turbidímetro en NTU (nephelometric turbidimeter units), y la transparencia, medida como profundidad del disco de Secchi, en metros.

Las variables que se desean medir son correspondientes las firmas espectrales se utilizó un espectro

### 3. METODOLOGÍA Y DATOS

---

radiómetro de campo, modelo Ocean Optics HR2000+ UV/VIS con rango operativo de 200 a 1100 *nm*, que se tomaron en los puntos de muestreo en la laguna.

El muestreo se realizó de acuerdo a las necesidades de la variable, pero considerando una buena ubicación dentro de la Laguna. Las firmas espectrales que se tomaron fueron 2 con el espectroradiómetro, que posteriormente se compararon con la firma que presenta la laguna en la imagen satelital. Una de las recomendaciones que se considera para un muestreo más preciso para cualquier validación *in situ*, es la programación de la fecha del muestreo, respecto al paso del sensor sobre el área de estudio, por ello que se programo la toma de muestras el día 17 julio del 2019, con un rango de tolerancia de 2 días antes o después, ya que se tiene en cuenta las condiciones atmosféricas que se presenten en la fecha programada.

Para la toma de datos en campo, se previene tanto las condiciones climáticas al acercarse la fecha y todos los detalles de la instrumentación para la toma de muestras y realizar un breve reporte del muestreo que posteriormente permita hacer un análisis más preciso de los datos obtenidos.

#### Reporte de Trabajo de campo

La fecha programada tuvo que ser recorrida debido a las condiciones atmosféricas que se presentaron durante esa semana y al período vacacional de la Universidad. El 9 de agosto de 2019, se realizó una toma de datos en campo el espectro radiómetro modelo HR 200, el cual permite la captura de firmas espectrales mediante el uso del software Ocean view, en campo. La toma de muestras se dividió en 2 partes, la primera se realizó en la Laguna Sauce Grande, alrededor de las 10 am y 11:30 am, debido a que es el horario óptimo para la toma de muestras debido a que la posición del sol favorece la toma de la reflectancia.



**Figura 3.2:** Fotografía de la Laguna Sauce Grande, Monte Hermoso, Buenos Aires, Argentina.

---

La metodología del instrumental es sencilla, se debe calibrar con el color blanco y negro para posteriormente, usarlo en la toma de la muestra. Dicha metodología la marca como protocolo general el software para la toma de la nueva adquisición.



**Figura 3.3:** Fotografía de metodología para la toma de muestras con el espectro radiómetro.

La toma de la muestra se llevó a cabo en el muelle de la laguna, ya que se lograba tener una buena distribución de la laguna y con el buen clima se lograba obtener una buena respuesta, que registraba el espectro radiómetro.



**Figura 3.4:** Fotografía de la toma de muestras con el espectro radiómetro.



**Figura 3.5:** Fotografía de la captura de la muestra con el software Ocean View del espectro radiómetro.



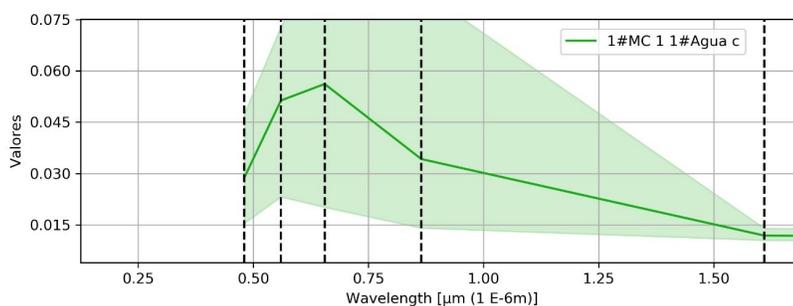
**Figura 3.6:** Fotografía de las zonas alrededor de la Laguna Sauce Grande.



Figura 3.7: captura de los valores de coordenada del lugar.

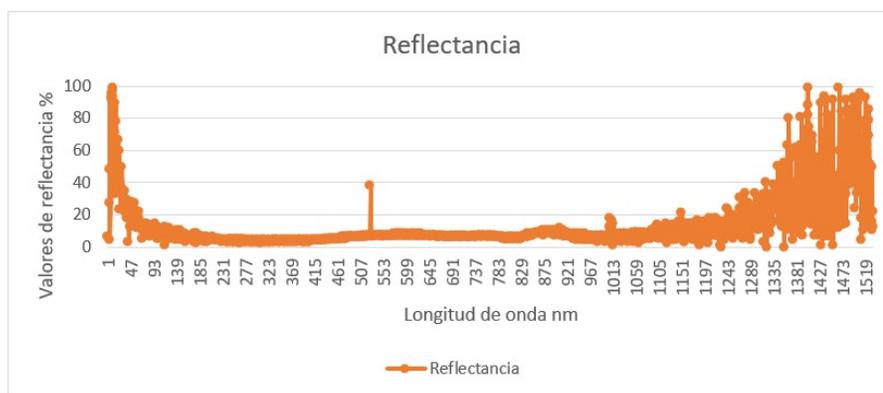
### Análisis de los datos del espectro radiómetro

Los valores que genera el espectro radiómetro y en general el software Ocean View permite guardarlos en formato txt, para poder manipularlos en los diferentes softwares y así graficar las firmas obtenidas. Los datos generados en campo tienen una gran variabilidad debido a que el espectro radiómetro capta la reflectividad de todo el entorno que rodea la fibra óptica, es por eso que se requiere depurar los datos que generan ruido y normalizarlos para poder compararlos con los datos que genera la imagen satelital de Landsat 8 OLI, debido a que la imagen obtiene la firma de la clasificación supervisada y genera la firma a partir de dicho muestreo y muestra la firma normalizada en toda la imagen con porcentajes de reflectancia que cada una de las áreas categorizadas como agua continental.



**Figura 3.8:** Gráfica de firma espectral de la clasificación de Agua continental en la imagen L8 OLI LC08.L1TP.226087.20190412.20190422.01.T1 genera en Qgis 3.4, elaboración propia.

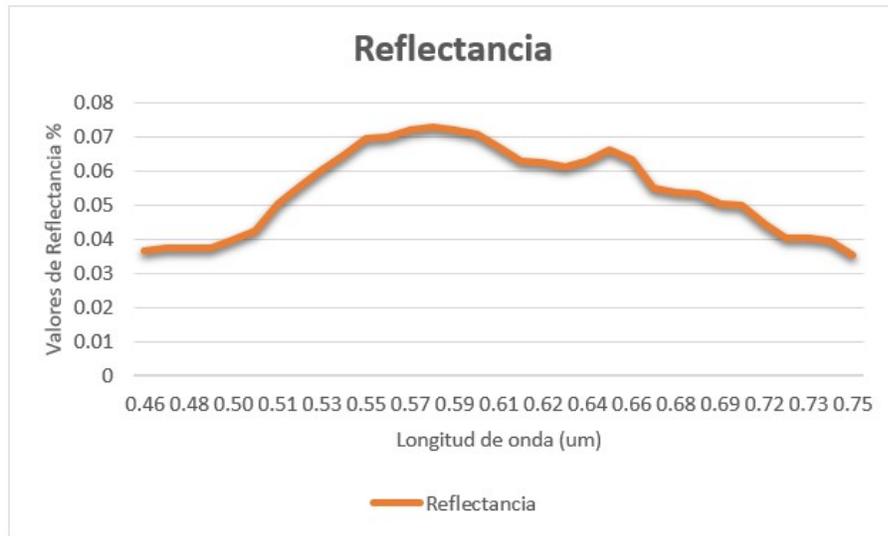
De los datos obtenidos en campo tenemos los datos en crudo y se puede visualizar la firma que se genera con ellos:



**Figura 3.9:** Gráfica de firma espectral de la muestra en campo con espectro radiómetro de la Laguna Sauce Grande, datos de la muestra: Reflection.11-21-36-340, Date: Fri Aug 09 11:21:36 GMT-03:00 2019. Elaboración propia..

Mediante la delimitación de rangos en la longitud de onda, conversión de unidades y cálculo de promedios entre valores de similares, se logró normalizar los valores, para poder visualizar mejor la

firma espectral registrada en campo, depurando los valores anómalos o los ruidos registrados en campo.



**Figura 3.10:** Gráfica de firma espectral de la muestra en campo con espectro radiómetro de la Laguna Sauce Grande, datos de la muestra: Reflection\_11-21-36-340, muestra normalizada. Elaboración propia.

### 3.1. Recopilación de información para los SIG's

La búsqueda de la información que se requiere es vital para el desarrollo de la investigación y para el implemento de los Sistemas de Información Geográfica. Uno de los desafíos que se enfrenta en el mundo tecnológico actual, es la gran cantidad de información que ofrece, pero que no siempre cuenta con las cualidades o normativas que regulan y verifican la información. Por eso es necesario conocer de manera teórica las características de cada tema de forma introductoria para lograr recopilar la información, respetando las características que sean pertinentes para la investigación.

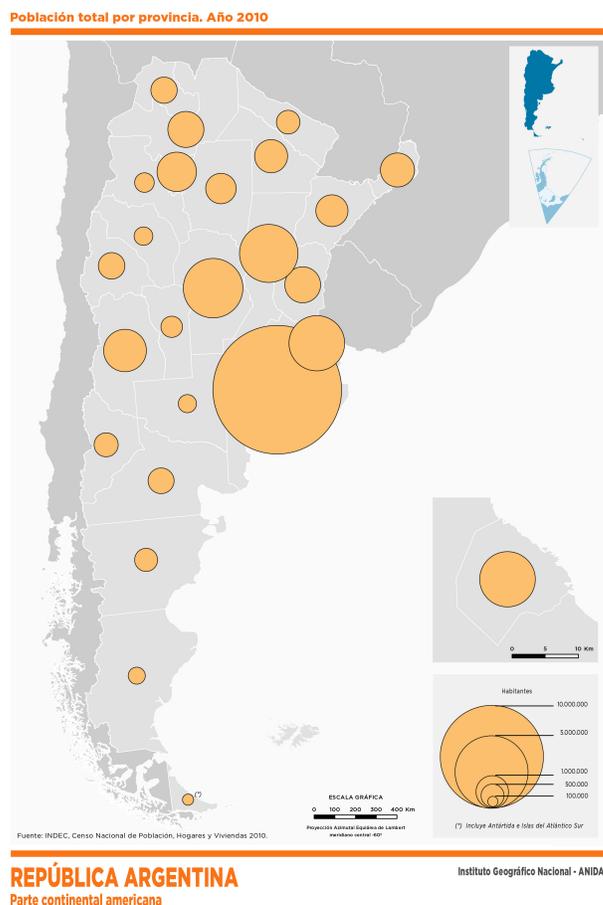
Considerando la información obtenida con teledetección, de la laguna Sauce Grande de sedimentos y clorofila, como información desarrollada y verificada en campo. Se recopilará información, siguiendo la línea de trabajo, para lograr cubrir los objetivos planteados.

#### 3.1.1. Urbanismo

El tamaño de la población es el primer dato significativo que se obtiene de los censos nacionales, dado que constituye el denominador básico para cualquier cálculo de indicadores generales, como la diferencia entre varones y mujeres que constituye el índice de masculinidad, o el índice de envejecimiento de la población nacional, que expresa la relación entre la cantidad de personas adultas

### 3. METODOLOGÍA Y DATOS

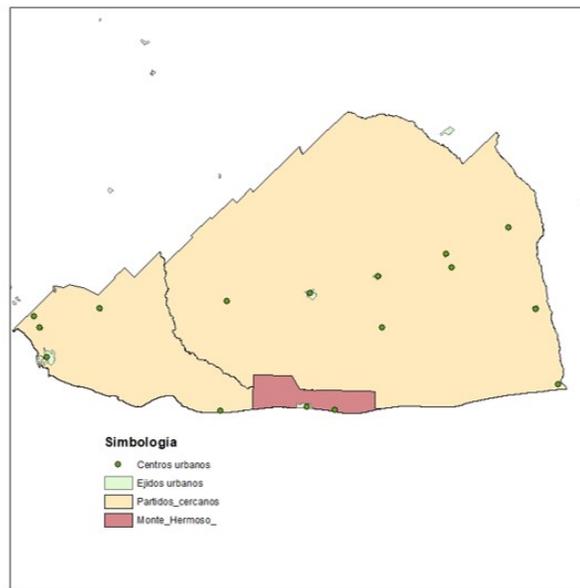
mayores y la cantidad de niños y jóvenes. En Argentina, el último Censo Nacional de Población, Hogares y Vivienda realizado en 2010 arrojó un total de 40.117.096 habitantes. IGN (2019).



**Figura 3.11:** Mapa de Población de la República Argentina del Instituto Geográfico Nacional. Organización política. En: Atlas Nacional Interactivo de Argentina [en línea].

La distribución de la población total según el nivel departamental, de partidos y comunas, muestra los sectores con mayores concentraciones demográficas en correspondencia con la localización de las grandes urbes argentinas. La población es uno de las influencias principales en el medio ambiente, debido a que somos el principal ser vivo que modifica dicho ambiente, es por eso que se considera vital tener presente la presencia urbana dentro del área de estudio de la Laguna Sauce Grande, siendo una información vital para el desarrollo de los SIGs.

De acuerdo al área de estudio, se sabe que el partido correspondiente es Monte Hermoso, con una población de 6499 habitantes. Para ello se gestionará la información en formato shape.



**Figura 3.12:** Imagen de los Centros urbanos más cercanos al área de estudio. Elaboración propia.

### 3.1.2. Uso de suelos

Una de las variables más indispensable para conocer las condiciones en las que se encuentra el área de estudio es el uso de suelos de la región. En ciencias sociales (geografía humana, antropología, economía agrícola) el uso de la “tierra” (término más utilizado en español, referido a land –es decir, terreno, y no a soil –es decir, suelo) es entendido como un conjunto de acciones humanas que denotan manejo, Meyer y Turner II, 1994 (Citado por Velázquez Alejandro (2019)). Cada acción de manejo es resultado de un contexto cultural consensuado entre los diversos grupos sociales (*stakeholders*) con jurisdicción sobre la “tierra” entendida como un capital o patrimonio.

En general se diferencian dos tipos de ellos: el manejador de la tierra (*land manager*) y el gestor de la tierra (*land policy maker*). El manejador sigue o genera prácticas de manejo que con el tiempo se convierten en tradiciones, por ejemplo el tiempo de descanso de una parcela. El gestor norma a través de acuerdos, reglas y leyes los usos como, por ejemplo, la utilización de agroquímicos para incrementar la producción anual.

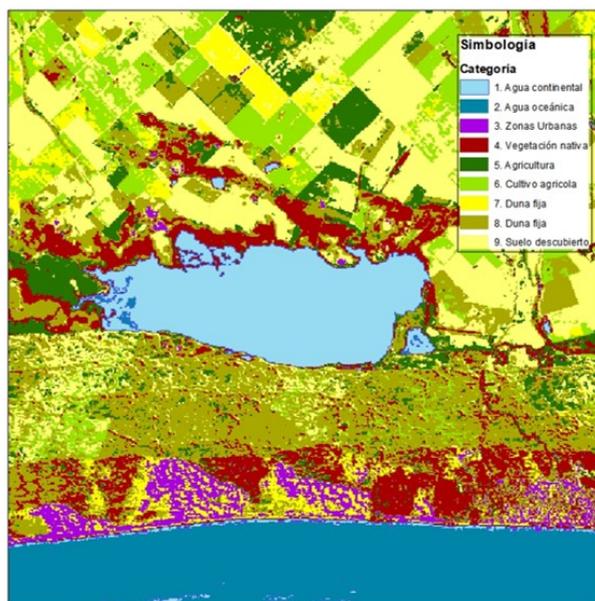
Cuando uno de los actores no sigue el consenso, se genera un conflicto sobre el uso de la “tierra” y dado que este término lleva implícita una connotación de tenencia, el manejo que prevalece se inclina a favor del grupo social que tiene derechos legales (*land rightholders*) Platt, 2004 (Citado por Velázquez Alejandro (2019)).

### 3. METODOLOGÍA Y DATOS

Uno de los métodos más convencionales para la adquisición del uso de suelos, es la clasificación supervisada mediante imágenes satelitales, para obtener información detallada y delimitada de los partidos implicados en el área de estudio. La leyenda con la que se trabajo fue la siguiente:

Capa	Uso de suelos	Descripción
1	Agua continental	Se clasifica toda el agua que se encuentra dentro del continente, tanto de formas naturales como artificiales.
2	Agua oceánica	Se puede identificar la parte oceánica que se encuentre cerca del área de estudio.
3	Zonas Urbanas	Asentamientos de población, que se identifican en los alrededores.
4	Vegetación nativa	Dentro de ella podemos encontrar vegetación leñosa, bosque, foresta y algunos parques naturales transitables.
5	Agricultura	Se refiere todo tipo de cultivo que el hombre desarrolla, de manera temporal o permanente.
6	Cultivo <u>agrícola</u>	Zonas de cultivo que se genera a través de procesos naturales dan como resultado cereales, frutas, vegetales, forraje y otros.
7	Dunas viva	Acumulación de arena sin vegetación.
8	Duna fija	Acumulación de arena acompañada de vegetación.

**Figura 3.13:** Tabla de los usos de suelos establecidos para la clasificación supervisada en Qgis 3.4 Elaboración propia, adaptación de la cobertura



**Figura 3.14:** Imagen de la clasificación supervisada realizada en el software Qgis 3.4. Elaboración propia.

Para lograr una clasificación precisa, fue necesaria una investigación de los partidos más cercanos a la

laguna de Sauce grande y así poder identificar las diferentes coberturas y acciones que ocurren en la zona. Generando el insumo general del uso de suelos en formato raster y en formato shape.

### 3.1.3. Índice de productividad

Es un índice que permite estimar la productividad potencial de los suelos en función a una serie de parámetros ambientales relacionados mediante un modelo matemático multiplicativo. (Morales Poclava (2019)) Considerando la información actualmente disponible referente a clima, topografía, usos de suelos junto al uso de herramientas informáticas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se propuso utilizar el índice de Productividad, que considera los usos de suelo como insumo para obtener los valores del índice para cada una de las categorías, basado en el modelo GWLF, como se muestra en la siguiente tabla:

Capa	Cobertura comparada	Uso de suelos	Estimación de condición hidrológica				Estimación de índice de productividad (%)		
			Condición	Grupo hidrológico del suelo (cm/h)				Alto	Moderado
				A	B	C	D		
3	Espacio abierto (céspedes, parques, campos de golf, cementerios, etc.) Condición para la cubierta de césped	Zonas Urbanas	Baja	68	79	86	89	NA	NA
4	Pradera: pasto continuo, protegido del pastoreo, generalmente cortado para heno	Vegetación nativa	Media	30	58	71	78	NA	NA
5	Cultivos con residuos de cosecha y en fila recta	Agricultura	Alta	64	75	82	85	0.425	0.515
6	Pastos, pastizales o pastos continuos forrajeros para pastoreo.	Cultivo agrícola	Media	49	69	79	84	0.004	----
7	Artemisa con sotobosque de hierba	Dunas viva	Media	-	51	63	70	NA	NA
8	Pradera: pasto continuo, protegido del pastoreo, generalmente cortado para heno	Duna fija	Media	30	58	71	78	NA	NA
9	Barbecho desnudo	Suelo descubierto	Media	77	86	91	94	NA	NA

SE Tabla comparativa de las capas de uso de suelos con las tablas del modelo GWLF (Enf. Conservación Ambiental - TORC)

**Figura 3.15:** Tabla comparativa de las capas de uso de suelos con las tablas del modelo GWLF

En el caso del Grupo hidrológico se consideró el grupo B como selección general de todas las capas,

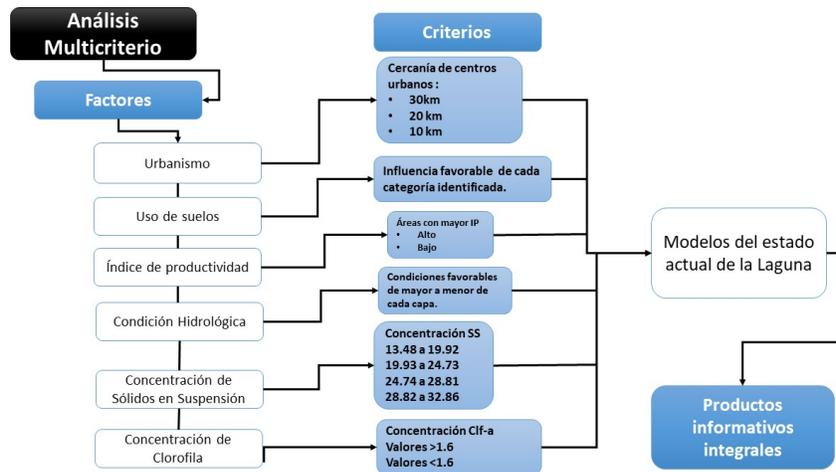
### 3. METODOLOGÍA Y DATOS

---

debido a que cumple más con las características del lugar, que se describe lo siguiente: Grupo B: Infiltración moderada cuando está completamente mojada. Principalmente suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien a bien drenados con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas. Velocidad moderada de transmisión de agua. Tabla B-1 del modelo GWLF (Evans y AVGWLF, 2006).

### 3.2. Procesamiento de la información

El manejo de la información depende del proceso que se utilice para la interpretación correcta de la misma. En el caso de la investigación se realizó un análisis multicriterio de la información obtenida y generada, que se puede resumir en el siguiente diagrama y considera los siguientes factores y criterios.



**Figura 3.16:** Esquema del procesamiento de la información, mediante el análisis multicriterio, elaboración propia.

#### 3.2.1. Determinación de áreas de investigación

De acuerdo a las condiciones que presenta el área de investigación se realizará una delimitación más exacta, no solo considerando la laguna si no la influencia de sus alrededores, quedando delimitada de la siguiente forma:



Figura 3.17: Mapa de Delimitación de áreas de trabajo. Elaboración propia.

Con dicha delimitación, se depuro la información recopilada y generada de cada factor, para realizar el análisis, procesando la información de manera más rápida y eficaz. Obteniendo cada uno de los valores, delimitados y registrados de manera gráfica, a través de mapas y de sus valores estadísticos de manera interna y dinámica.

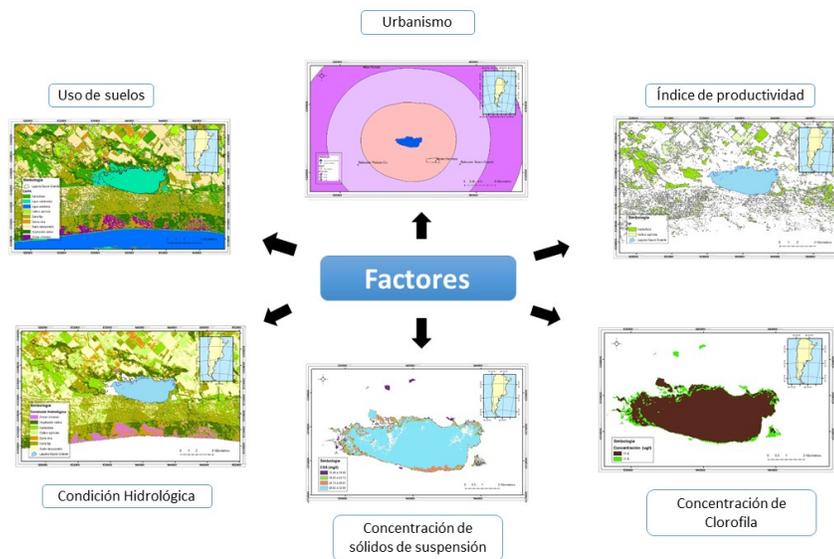


Figura 3.18: Ilustración de Factores delimitados. Elaboración propia.

### 3.3. Organización e implementación de los SIGs en áreas de investigación.

La organización de la información comenzó mediante la división de los factores en 2 modelos que permitieran evaluar la situación de la laguna. El primer modelo utilizó los factores de Concentración de sólidos en suspensión (CSS) y la Concentración de Clorofila- a, debido a que trabajan en la misma escala, es decir, sus datos se encuentran dentro de la laguna y su comportamiento determinó las condiciones en las que se encuentra. Mientras que en el segundo modelo, interactúan todos los factores que presentan valores fuera de la laguna.

Para cada uno de los modelos se asignaron valores o pesos a las diferentes clases de cada variable, implementando el método AHP, desarrollado por Saaty Thomas en 1980, permite valorar numéricamente a los juicios que las personas le dan a cada variable, utilizando una escala del 1 al 9 (Tabla siguiente). Dicho procedimiento parte de establecer una matriz cuadrada en la cual el número de filas y columnas está definido por el número de factores a ponderar, así se establece la matriz de comparación entre pares de factores, comparando la importancia de uno sobre cada uno de los demás (Gómez y Cabrera, 2008).

Escala de juicios de valor propuesta por Saaty:

(1/9)	(1/7) (1/5)	(1/3) 1 3	5 7	9
Menor importancia		Igual importancia	Mayor importancia	

**Tabla 3.2:** Tabla de Juicios de valor, Fuente: Gómez y Cabrera (2008).

La ventaja del método AHP es la incorporación de aspectos cualitativos que pueden quedar fuera del análisis dada su complejidad pero que revisten interés para los factores en la decisión final (Gómez y Cabrera, 2008).

### 3. METODOLOGÍA Y DATOS

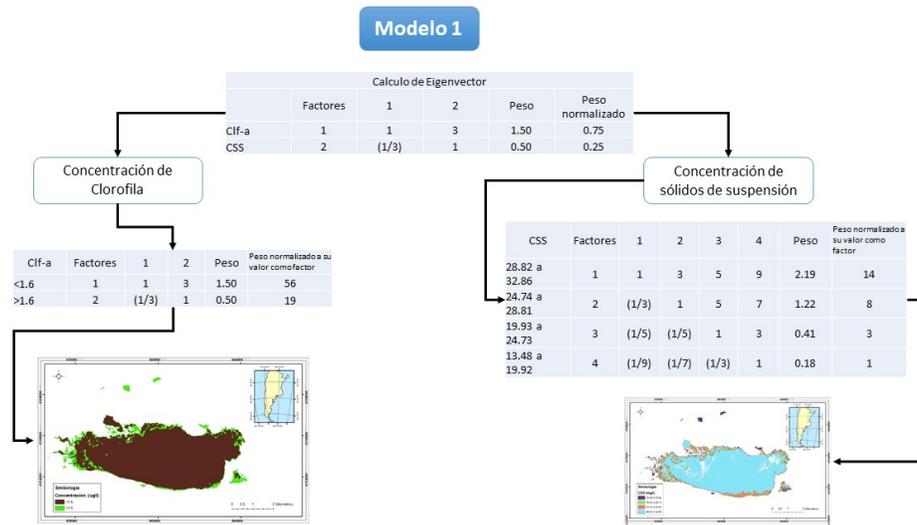


Figura 3.19: Esquema de organización de Análisis Multicriterio para el Modelo 1. Elaboración propia.

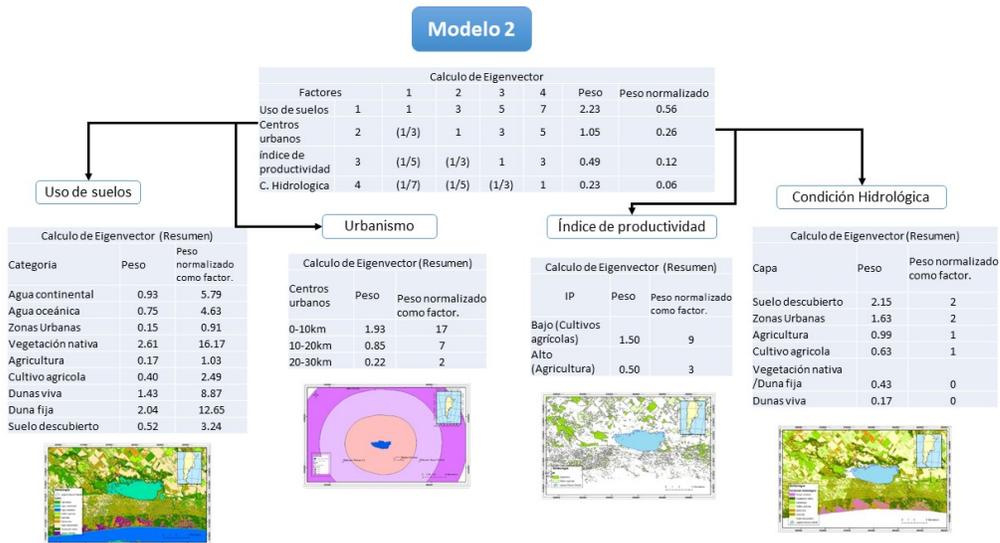


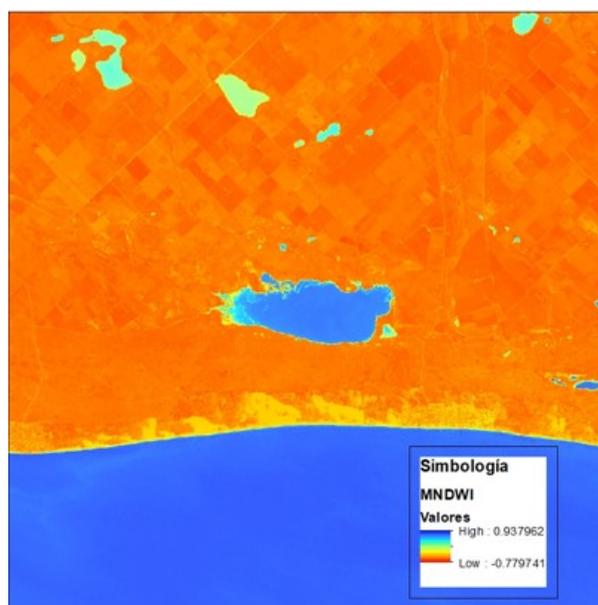
Figura 3.20: Esquema de organización de Análisis Multicriterio para el Modelo 2. Elaboración propia.

## Resultados y Discusión

---

### 4.1. Resultados de algoritmos de teledetección

El primer resultado en los procesos de las imágenes, en el caso de la imagen de landsat 8, que contiene Laguna Sauce Grande, se optó por realizar un índice de agua para delimitar el área de la laguna. Obteniendo valores positivos para la el área de la laguna y permitiendo convertirse en una máscara para delimitarla.

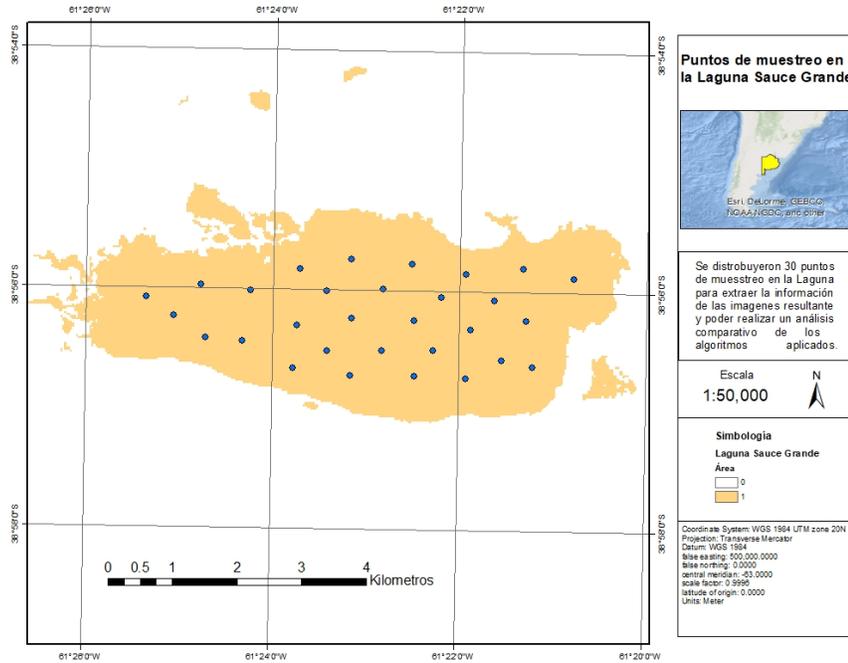


**Figura 4.1:** Aplicación de índice de agua MNDWI en imagen satelital landsat 8 del área de estudio de la Laguna Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina.

El índice aplicado permite delimitar la laguna, de manera visual y matricial, ya que los valores dentro de la laguna tienen valores positivos, logrando ser una máscara que delimita por pixel los valores de agua mediante un cálculo con las bandas de la imagen.

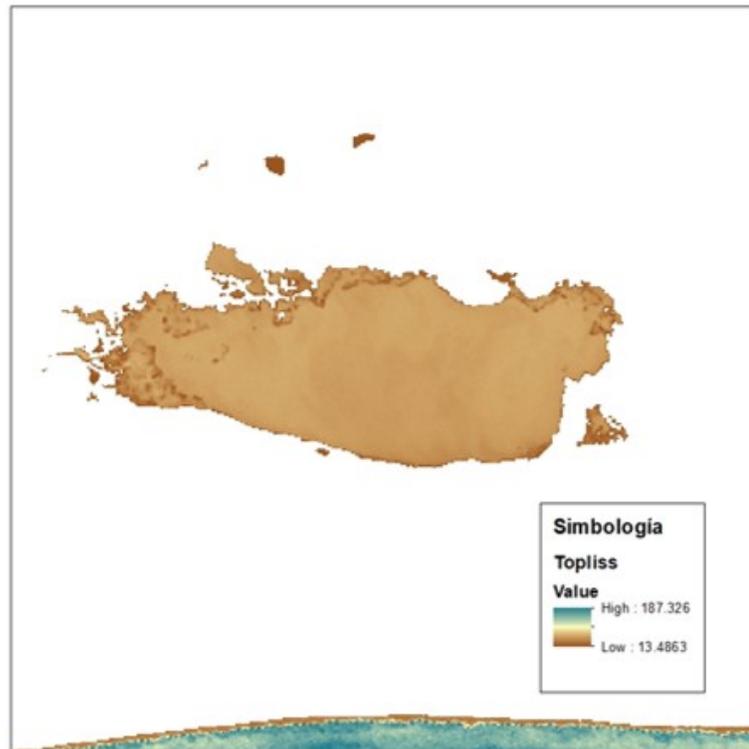
## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el implemento de dicho índice, se delimitó el área de cada una de las bandas a utilizar y se aplicaron los algoritmos propuestos para cada objetivo y se distribuyeron 30 puntos sobre la laguna para extraer información de las imágenes.



**Figura 4.2:** Mapa de puntos de muestreo en la Laguna Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. Elaboración propia.

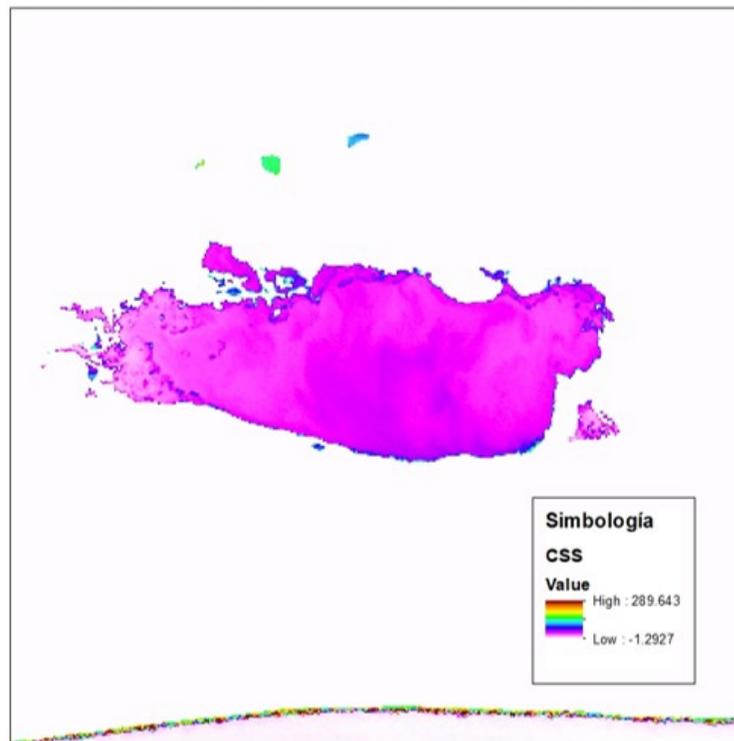
En el caso del cálculo de concentración de sólidos de suspensión se propusieron 3 algoritmos, de los cuales 2 generaron resultados lógicos de la cantidad de sólidos de suspensión en mg/l. Los resultados del algoritmo Topliss del artículo: “*Algorithms (sic) for remote sensing of high concentration, inorganic suspended sediment (Topliss et al., 1990)*” aplicado en la imagen, son los siguientes:



**Figura 4.3:** Imagen del cálculo del algoritmo Topliss, en el área de estudio con valores de concentración de sólidos de suspensión en mg/l. Elaboración propia.

Respecto al algoritmo del total de sólidos suspendidos (TSS) del libro Introducción al sensoramiento remoto de sistemas acuáticos.(Barbosa *et al.*, 2019). Este algoritmo aplicado a la imagen, tuvo resultados con valores negativos en toda el área, no delimitó la laguna y no cuenta con valores lógicos de concentración de sólidos de suspensión, por ese motivo que no se ilustran los resultados.

El tercer y último algoritmo para la concentración de sólidos en suspensión, del artículo Teledetección aero-portada hiperespectral del embalse de Ribarroja de A. Ruiz-Verdú, J. A. Domínguez y R. Peña,Ruiz-Verdú *et al.* (2001) brindo el siguiente resultado utilizado en la imagen:



**Figura 4.4:** Imagen del cálculo del algoritmo CSS de Ribarroja de A. Ruiz-Verdú, J. A. Domínguez y R. Peña. Ruiz-Verdú *et al.* (2001), en el área de estudio con valores de concentración de sólidos de suspensión en mg/l. Elaboración propia.

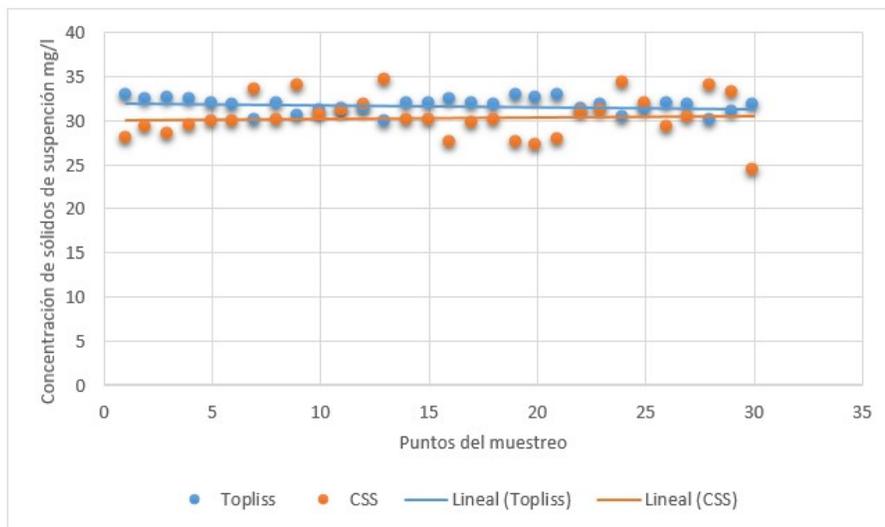
Los resultados de los 3 algoritmos propuestos para concentración de sedimentos, fueron variantes y es por eso que se eligieron únicamente dos, debido al mejor resultado obtenido y analizado estadísticamente, como se muestra a continuación:

**Tabla 4.1:** Valores de muestro de los algoritmos para el cálculo de sólidos de suspensión. Elaboración propia.

Puntos de muestreo	Topliss	CSS
1	32.69096	27.95801
2	32.32566	29.17844
3	32.66144	28.40765
4	32.3274	29.46749
5	31.92393	29.82077
6	31.697	29.82077
7	30.03477	33.35357
8	32.00446	30.10981
9	30.39572	33.7711
10	31.09438	30.75214
11	31.25091	31.0412
12	31.41094	31.68353
13	29.85003	34.54189
14	31.96688	30.10981
15	32.01649	30.0777
16	32.35632	27.54049
17	31.98443	29.66017
18	31.76059	30.10981
19	32.85253	27.54049
20	32.61239	27.09087
21	32.78096	27.79742
22	31.4179	30.81638
23	31.6376	31.07331
24	30.34312	34.25285
25	31.32223	31.84411
26	31.87938	29.17844
27	31.63502	30.30252
28	30.09079	33.93166
29	30.95346	33.22512
30	31.65019	24.45732

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores concentración de sólidos de suspensión, obtenidos en el muestreo de las imágenes que arrojaron como resultado la aplicación de los algoritmos. En la siguiente gráfica se puede observar el comportamiento de los valores y los cuales se mantienen en un rango de 25 a 35 mg/l de concentración, generando un rango lógico de sedimentos de suspensión. Dentro de los valores podemos observar que los valores del algoritmo de Topliss se comportan de manera más uniforme y se acercan más a su línea de tendencia.



**Figura 4.5:** Gráfica del muestreo de concentración de sólidos de suspensión de los algoritmos propuestos. Elaboración propia.

Otros de los valores a considerar se muestran en la siguiente tabla, donde se puede observar el comportamiento de los valores con un análisis estadístico básico.

**Tabla 4.2:** Análisis estadístico de los valores obtenidos de algoritmos de Sólidos de Suspensión

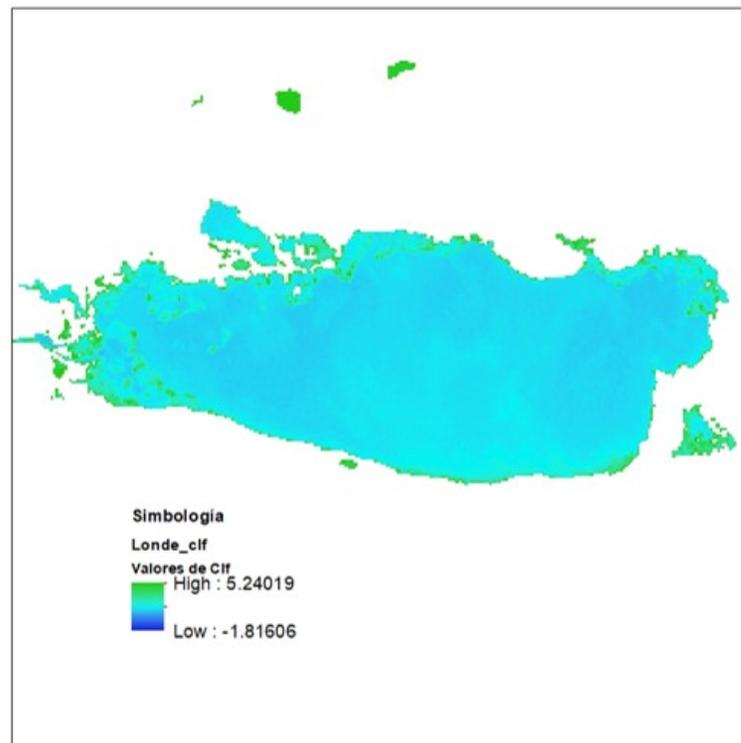
	Topliss	CSS
PROMEDIO	31.6309293	30.2971613
VARIANZA	0.70719851	5.58217084
DESVIACIÓN	0.84095096	2.36266181
RMSE	0.82681632	2.32295038

La diferencia entre ambos algoritmos es mínima en el promedio de sus respectivos valores, sin embargo en el comportamiento se puede analizar que tiene valores más grandes en sus estadísticas, mostrando una varianza mayor entre sus datos y por consecuencia una mayor desviación estándar y una raíz de error cuadrático medio mayor.

Es importante elegir el algoritmo que nos permita tener valores más certeros del comportamiento de los sólidos de suspensión, ya que es uno de los factores que demuestra las condiciones que presenta la laguna, debido a que a mayor concentración de sedimentos se puede tener un mayor conocimiento del estado eutrófico del agua, es decir, existe una mayor posibilidad de que el agua dentro de la laguna contenga nutrientes. Para el caso de los algoritmos de la clorofila, se aplicaron los siguientes:

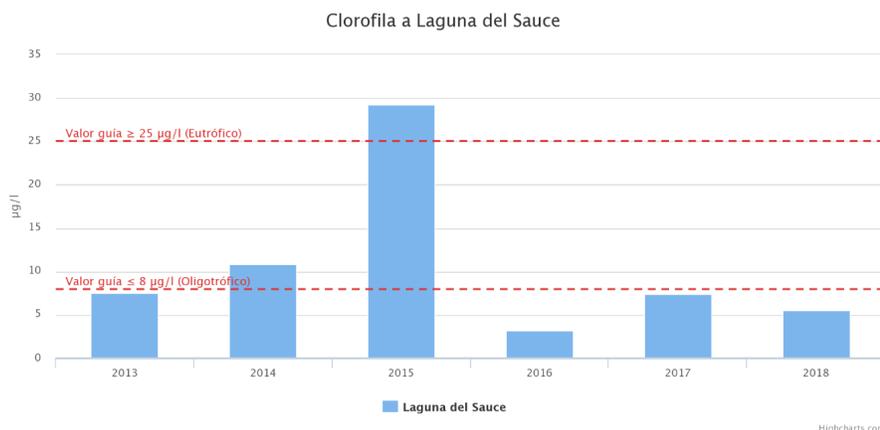
Algoritmo para la concentración de clorofila, del artículo Teledetección aero-portada hiperespectral del embalse de Ribarroja de A. Ruiz-Verdú, J. A. Domínguez y R. Peña. Ruiz-Verdú *et al.* (2001). Donde la  $Clf - a$  es la concentración de clorofila a en  $\frac{mg}{m^3}$ , se realiza la banda 23 del sensor MERIS, se utilizó la banda que contiene el ancho de banda más aproximado, de landsat 8, pero no se lograron resultados lógicos, por ese motivo se descartó el algoritmo para el área de estudio.

El segundo algoritmo propuesto fue un algoritmo semiempírico para la estimación de clorofila ( $chl - a$ ) (Londe, 2008) del libro Introducción al sensoramiento remoto de sistemas acuáticos. Barbosa *et al.* (2019), se obtuvo el siguiente resultado:

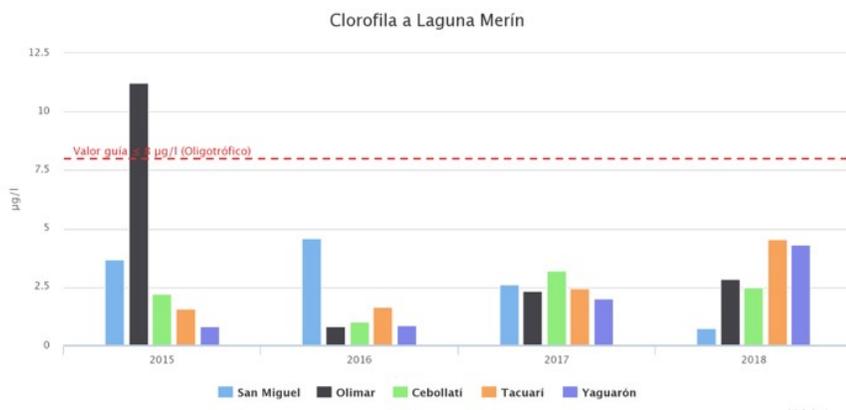


**Figura 4.6:** Imagen del cálculo del algoritmo de estimación de clorofila (chl-a) (Londe, 2008), en el área de estudio con valores de clorofila (clf-a) en ug/l. Elaboración propia.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



**Figura 4.7:** Gráfica del promedio anual de concentración de Clorofila-a de la Laguna del Sauce, (MVOTMA de Uruguay, 2019) Disponible en: [https://www.dinama.gub.uy/indicadores\\_ambientales/ficha/oan-concentracion-de-fosforo-total/](https://www.dinama.gub.uy/indicadores_ambientales/ficha/oan-concentracion-de-fosforo-total/)



**Figura 4.8:** Gráfica del promedio anual de concentración de Clorofila-a de la Laguna Merín, (MVOTMA de Uruguay, 2019) Disponible en: [https://www.dinama.gub.uy/oan/?page\\_id=53](https://www.dinama.gub.uy/oan/?page_id=53)

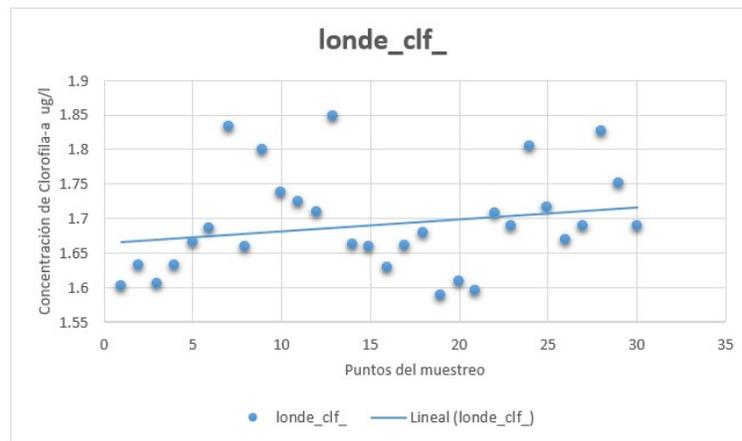
Otra de las fuentes consultadas para comparar los valores obtenidos fue la investigación “Concentración y distribución vertical de la clorofila-a fitoplanctónica en los lagos de Montebello, Chiapas” donde indican que los lagos presentaron una amplia variación en la concentración de clorofila-a, desde 0.2  $\mu\text{g/l}$  en los lagos Ensueño, Pojoj, Tziscaco y Yalalush hasta 79.5  $\mu\text{g/l}$  en el lago Liquidambar. (Maya *et al.*, 2015).

Realizando una comparación con los promedios de dichas investigaciones, podemos ver que la similitud que presentan los valores obtenidos de las imágenes de Landsat 8 y se puede realizar un análisis estadístico de los datos.

**Tabla 4.3:** Tabla comparativa de los valores de concentración de clorofila- a en cuerpos de agua continentales, similares al área de estudio. Elaboración propia.

Laguna	Promedio de concentración de Clf-a	Año	País
Laguna del Sauce	5.54	2018	Uruguay
Laguna de Merin (San Miguel)	0.75	2018	Uruguay y Brasil
Agua tinta	1.4	2015	México
Laguna Sauce Grande	1.69	2019	Argentina

El comportamiento del muestreo se puede apreciar en la siguiente gráfica con los 30 puntos en la imagen del resultado de la aplicación del algoritmo:



**Figura 4.9:** Gráfica del comportamiento del muestreo de los resultados del algoritmo de cálculo de concentración de Clorofila-a (Londe, 2008 en (Barbosa *et al.*, 2019)) Elaboración propia.

**Tabla 4.4:** Estadística de la Concentración de Clorofila-a, resultado del algoritmo propuesto. Elaboración propia.

	londe_clf_
PROMEDIO	1.691317667
VARIANZA	0.005296294
DESVIACIÓN	0.072775638
RMSE	0.071552431

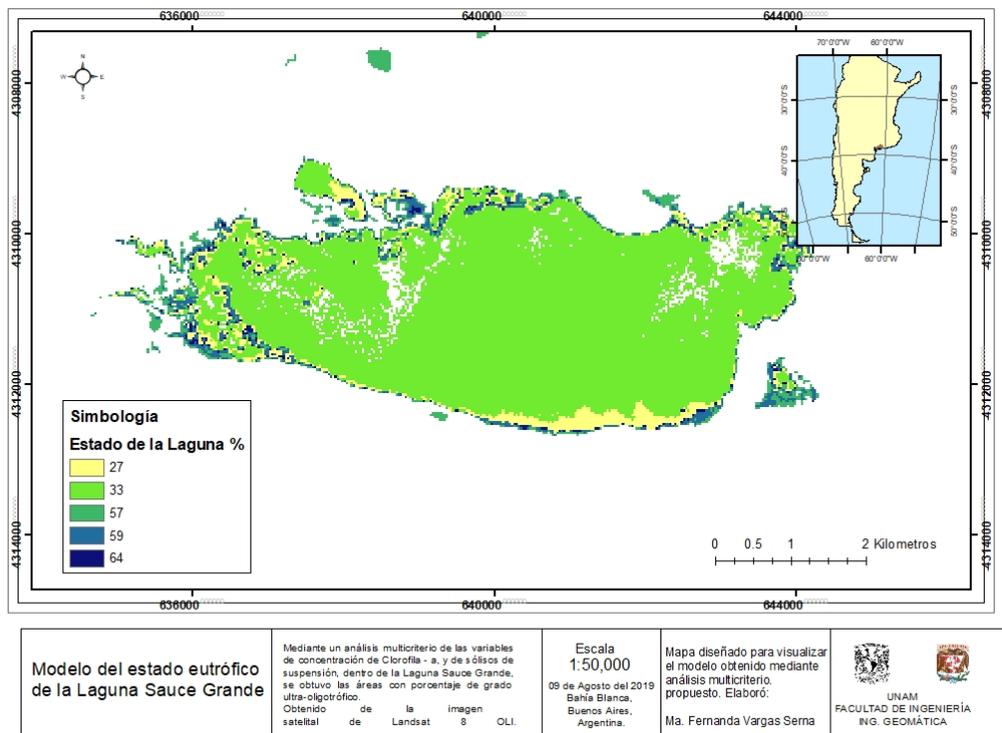
La variación tiene un rango de 1.55 a 1.85 de concentración a lo largo de la laguna, los valores estadísticos son muy regulares, lo que proporciona una validez a los resultados y permite considerar la información para la aplicación de los sistemas de información Geográfica.

#### 4.2. Modelos a partir de los Sistemas de Información Geográfica (SIG's)

Los modelos fueron el resultado del álgebra de mapas, ya que al considerar los factores de cada modelo y reclasificando sus valores correspondientes se obtuvieron los siguientes resultados:

- Modelo 1

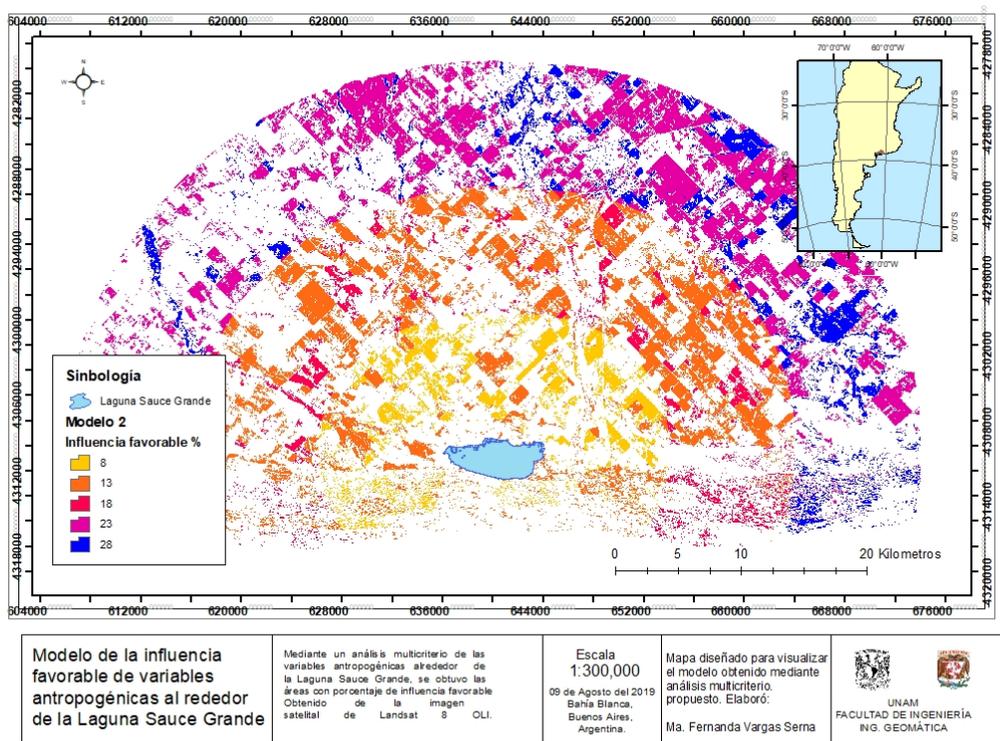
Modelo de las interacciones entre la Concentración de sólidos de suspensión y Clorofila -a , dentro de la Laguna Sauce Grande, mediante el uso de Análisis Multicriterio.



**Figura 4.10:** Mapa del Modelo del estado eutrífico de la Laguna Sauce Grande. Elaboración propia.

- Modelo 2

Modelo de las interacciones favorables entre la los centros urbanos, el uso de suelos, la condición hidrológica y el índice de productividad en los alrededores de la Laguna Sauce Grande, mediante el uso de Análisis Multicriterio.



**Figura 4.11:** Mapa del Modelo de la influencia favorable de las variables antropogénicas alrededor de la Laguna Sauce Grande. Elaboración propia

### 4.3. Análisis de los resultados

Para el caso del primer modelo, que muestra el estado eutrófico de la Laguna Sauce y partiendo de la ordenación según varios indicadores, que define su estado trófico, al que se denomina índice o grado eutrófico. Dicho índice permite clasificar las aguas epicontinentales. De acuerdo al análisis realizado, donde se consideró la concentración de Clorofila – a como prioridad y de acuerdo a la tabla de la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, 1970) se puede estimar el estado eutrófico del agua de la Laguna Sauce Grande, de acuerdo a estos indicadores se puede definir en áreas con porcentajes dentro de la laguna y teniendo en cuenta la concentración de sólidos en suspensión, se obtuvo ese porcentaje, se puede estimar que la Laguna Sauce Grande presente un grado ultra-oligotrófico, debido a que se presentaron valores de clorofila en su mayoría  $>1.0 \text{ ug/l}$ .

Con dicho modelo se pueden recrear y asignar diferentes pesos a cada variable, permitiendo poder análisis posteriores que ayuden a registrar información específica de la Laguna y poder seguir evaluando su comportamiento.

Para el modelo 2, se tuvieron más variables que juegan un papel muy importante en el entorno de la Laguna, la localización de los centros urbanos determinaron los límites del área de estudio, debido a que las actividades humanas son las que modifican y generan las presiones antropogénicas que la influyen en la laguna, y con ello se procedió a manejar las demás variables, que se originaron a partir de los usos de suelos creados a través de la clasificación supervisada de la imagen satelital y se asignaron los valores correspondientes a cada factor y se reclasificaron de acuerdo a su peso correspondiente para unificarlos en el modelo.

Se pueden observar los valores que se obtuvieron son porcentajes, que muestran que el valor máximo fue de 28 % donde todos los factores cumplen de manera favorable los criterios y condiciones que se le asignaron al modelo para que la influencia fuera favorable para la Laguna. La distribución de los porcentajes modela el comportamiento de los factores en cada zona, asignando el porcentaje y respetando las formas geométricas de los usos de suelos de la zona.

También podemos observar las zonas que no generan un modelo favorable para la laguna y quedan descubiertas; con eso, se puede cuantificar más valores, determinar áreas de cada porcentaje, modificar pesos, utilizar el modelo en años anteriores y seguir analizando el comportamiento de los factores antropogénicos.

## Conclusiones

---

Lograr identificar las problemáticas ambientales que influyen en la región donde se encuentra la Laguna Sauce Grande, permitió conocer las variables como: urbanismo, uso de suelos, condición hidrológica, índice de productividad, concentración de clorofila-a y concentración de sólidos de suspensión, que se encuentran presentes en el área de estudio y presentan continuo cambio para determinar las consideraciones pertinentes para el desarrollo de la investigación.

Se evaluaron mediante imágenes satelitales diferentes algoritmos para obtener información cuantitativa de la calidad del agua de la laguna, comparando y seleccionando al algoritmo de Topliss *et al.* (1990), debido a que presentó valores con menor varianza, desviación estándar y menor error medio cuadrático, para la concentración de sólidos de suspensión, en un rango de 30.01 a 32.68 *mg/l* y para la concentración de Clorofila-a se seleccionó el algoritmo de Londe (2008) en Barbosa *et al.* (2019), que de la misma manera presentó una menor variación en un rango de 1.55 a 1.85 *ug/l* de concentración.

Se diagnosticó el estado actual de calidad de agua de las lagunas a partir de los resultados de dichos algoritmos para el desarrollo del modelo 1 mediante los sistemas de información geográfica, el cual dejó en conclusión, que los algoritmos empleados estiman, que la laguna se encuentra en un valor ultra-oligotrófico, es decir, bajo contenido de nutrientes y producción vegetal mínima debido que se muestra la mayor parte de la laguna con un 33% en dicha condición.

Las demás variables que se recopilaron de información permitió establecer los factores antropogénicos que afectan el estado ambiental del cuerpo de agua, delimitando la información y asignando diferentes criterios que ayudaron al desarrollo del modelo 2 que mostró que un 2% a 28% de las variables favorecen a la laguna y se encuentran distribuidas en un radio de 30 km.



# Bibliografía

---

- Aguirre, M. L. y Whatley, R. C. (1995). Late quaternary marginal marine deposits and palaeoenvironments from northeastern buenos aires province, argentina: a review. *Quaternary Science Reviews*, 14(3):223–254. 28
- ANIDA (2019). Atlas nacional interactivo de argentina (ANIDA). Consultado 26 de Abril de 2019. Recuperado de <https://ide.ign.gob.ar/portal/apps/MapJournal/index.html?appid=a6b2bf22093e4f8d9f9a0e59d4ec82ca>. 20
- BancoMundial (2019a). El banco mundial en argentina. Consultado el 3 de Mayo de 2019. Disponible en <https://www.bancomundial.org/es/country/argentina/overview#1>. 17
- BancoMundial (2019b). El banco mundial en méxico. Consultado el 6 de Mayo de 2019. Disponible en <https://www.bancomundial.org/es/country/mexico/overview>. 18
- Barbosa, C. C. F., de Moraes Novo, E. M. L., y Martins, V. S. (2019). *Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: princípios e aplicações*, volumen 1. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. XI, 27, 36, 37, 38, 40, 44, 62, 65, 85, 89, 91, 95
- Binding, C. E., Greenberg, T. A., y Bukata, R. P. (2011). Time series analysis of algal blooms in lake of the woods using the meris maximum chlorophyll index. *Journal of Plankton Research*, 33(12):1847–1852. 41, 43
- Bróndolo, M Zinger S, C. M. D. P. O. (1995). “*El espacio geográfico y problemáticas ambientales. Provincia de Buenos Aires*”. Mendoza, Argentina. Primera Edición. 6, 10, 19, 21
- Cabrera, A. L. (1994). Enciclopedia argentina de agricultura y jardinería, tomo ii, fascículo 1: regiones fitogeográficas argentinas. *ACME: Buenos Aires*. 21
- Capitanelli, G. R. (1998). “*Geografía Física y Medio Ambiente: revalorización y enseñanza*”. Mendoza, Argentina. Primera Edición. 19

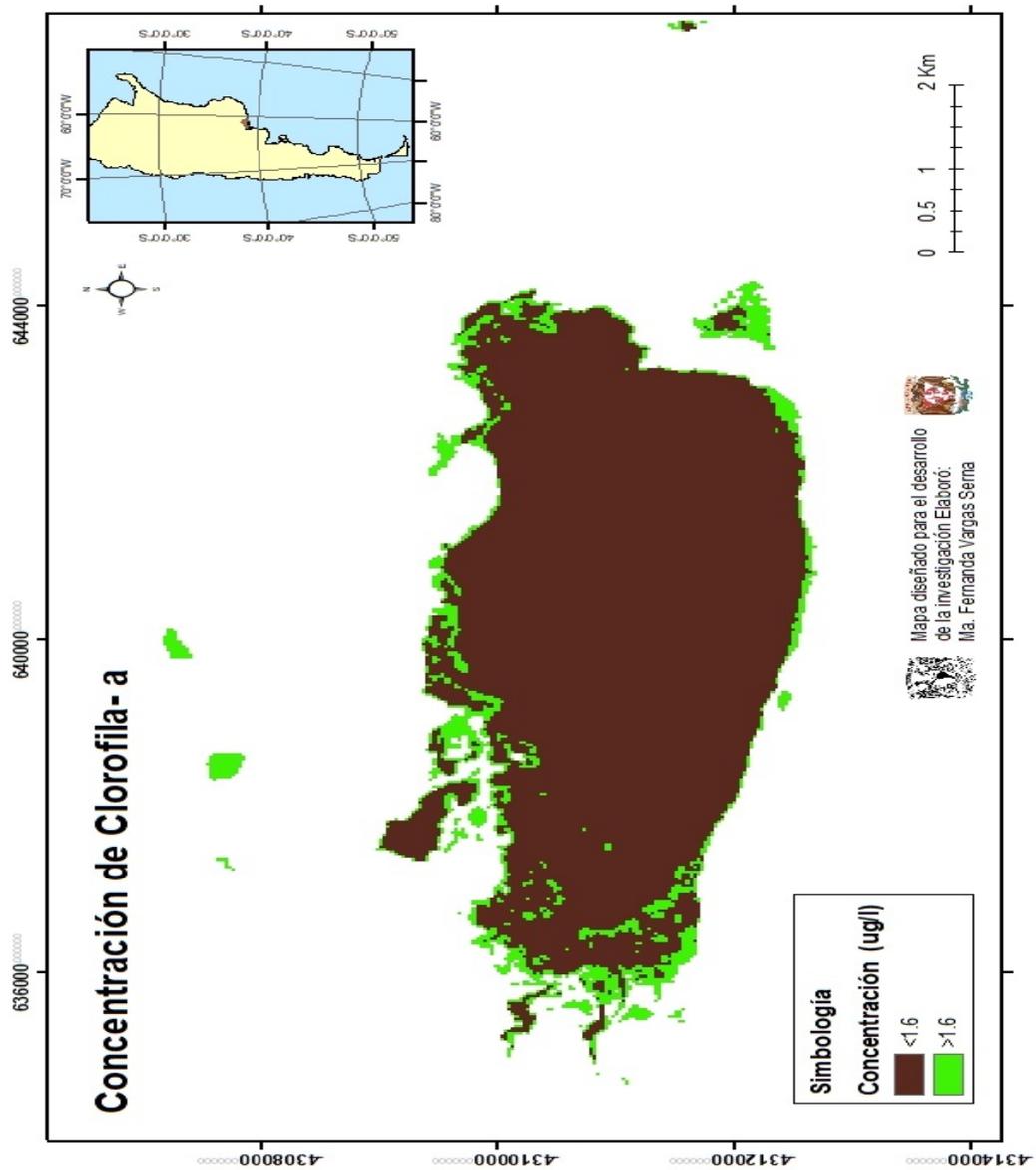
- Contreras, S. (2011). Los 10 problemas ambientales en argentina más destacados. Consultado el 28 de Abril de 2019. Disponible en: <https://www.lifeder.com/problemas-ambientales-argentina/>. 3, 4, 6
- de Ferreras, A. C., de Steffens, A. C., y Diez, P. (2004). El clima del suroeste bonaerense departamento de geografía y turismo. *Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca*. 21
- Domínguez Gómez, J. A., MARCOS MARTÍN, C., CHAO RODRÍGUEZ, Y., DELGADO ROJAS, G., y RODRÍGUEZ PÉREZ, D. (2011). Estudio de aguas continentales mediante teledetección. 25, 26, 29, 30, 31, 32, 47, 48, 49, 50, 53, 54, 56, 57, 59
- Evans, B. M. y AVGWLF, K. J. C. (2006). “A guide to creating software-compatible data sets” *Penn State Institutes oh the Environment The Pennsylvania State University*. The Pennsylvania State University. University Park, PA 16802. 78
- Federico, G. (2011). recursos naturales en argentina”. Consulta, 26 de Abril de 2019. Recuperado de <https://www.econlink.com.ar/recursos-naturales-argentina>. 6
- Fernández, C. (2003). Calidad bacteriológica en aguas recreativas de la laguna sauce grande. *Tesina de grado. Departamento de Biología, Bioquímica y Farmacia, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca*. 21
- Geraldi, A. M. (2009). Estudio geoambiental de la cuenca lagunar las encadenadas del oeste. 21, 22
- Gilmore, S., Saleem, A., y Dewan, A. (2015). Effectiveness of dos (dark-object subtraction) method and water index techniques to map wetlands in a rapidly urbanising megacity with landsat 8 data. *Research@ Locate'15*, pp. 100–108. 63
- Gómez, J. C. O. y Cabrera, J. P. O. (2008). El proceso de análisis jerárquico (ahp) y la toma de decisiones multicriterio. ejemplo de aplicación. *Scientia et technica*, 14(39):247–252. XIX, 81
- Gordon, H. R., Brown, O. B., Evans, R. H., Brown, J. W., Smith, R. C., Baker, K. S., y Clark, D. K. (1988). A semianalytic radiance model of ocean color. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 93(D9):10909–10924. 49, 50
- Guanter, L., Alonso, L., y Moreno, J. (2005). First results from the proba/chris hyperspectral/multiangular satellite system over land and water targets. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2(3):250–254. 27, 28
- Han-Qiu, X. (2005). A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (mndwi). *Journal of remote sensing*, 5:589–595. 64

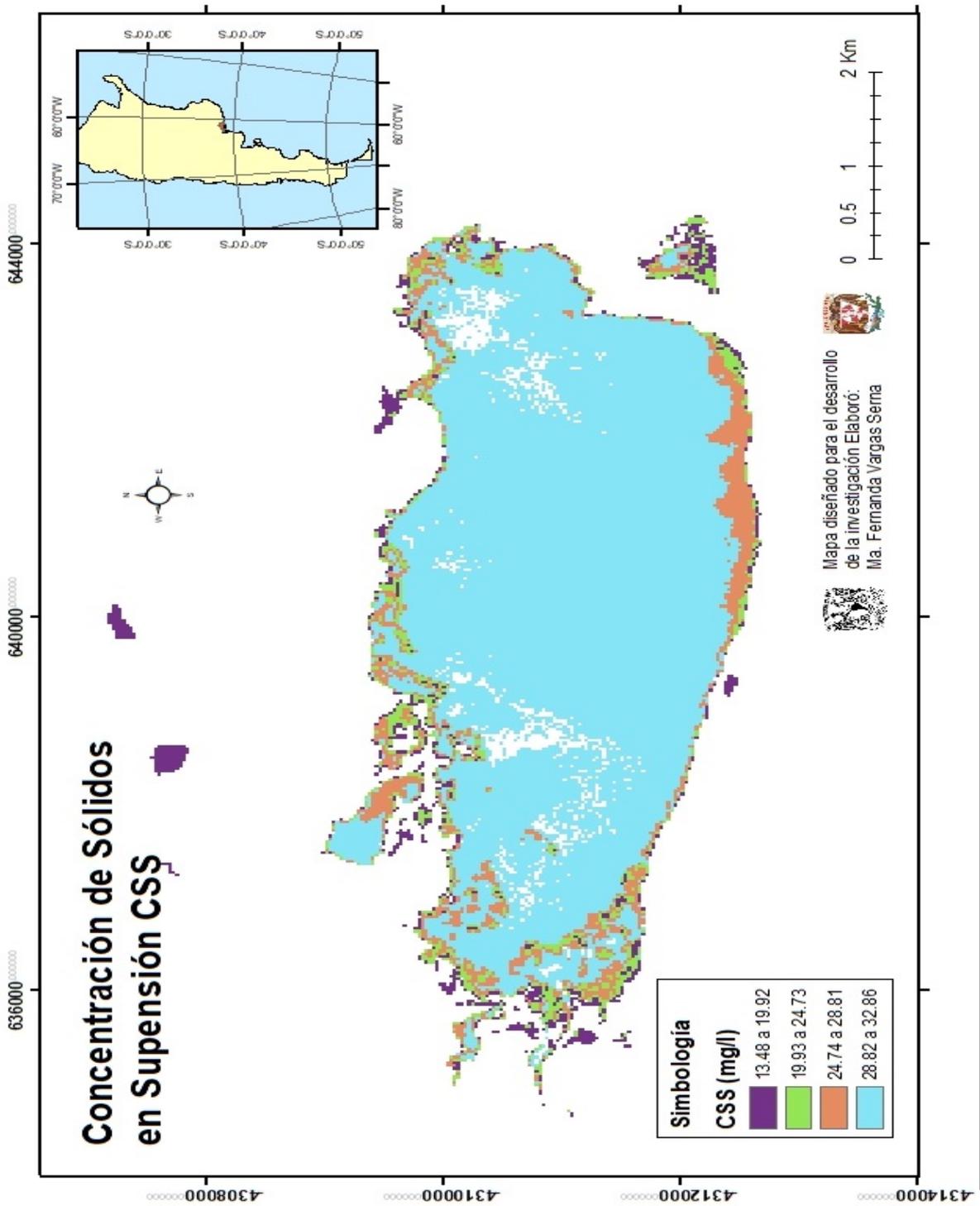
- 
- IGN, I. G. N. (2019). Organización política. Consulta, 30 de Junio de 2019. Recuperado de <https://ide.ign.gov.ar/portal/apps/MapJournal/index.html?appid=2c7297e24ca641dd8c1ba0ae689ff4cf>. 12, 14, 74
- INEGI (2014). Sistema de información geográfica. Consulta, 24 de Abril de 2019. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/internet/sistemainformaciongeografica.pdf>. 12
- Kirk, J. (1992). Monte carlo modeling of the performance of a reflective tube absorption meter. *Applied Optics*, 31(30):6463–6468. 52
- Kirk, J. T. (1994). *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge university press. 39, 47, 49, 52, 53
- Massera, C. B. (2017). *Modelo ambiental con Sistemas de Información Geográfica aplicado a la gestión de riesgo de desastres urbano: el caso Comodoro Rivadavia (Chubut, Argentina) 2008-2017*. Tesis doctoral, Universidad Nacional del Sur. Chubut, Argentina. 12
- Masson-Delmotte, V. (2017). Towards the ipcc special report on global warming of 1.5 c. En *EGU General Assembly Conference Abstracts*, volumen 19, p. 19653. 3
- Maya, V.-F., Patricia, H.-V., Javier, A., Vilma, A.-G., y Luis, O. (2015). Concentración y distribución vertical de la clorofila-a fitoplanctónica en los lagos de montebello, chiapas. *Tendencias de Investigación*, p. 107. 90
- Mobley, C. D. (1994). *Light and water: radiative transfer in natural waters*. Academic press. 37, 39, 43, 50, 51, 65
- Morales Poclava, C; Sobral, R. N. V. V. J. B. A. (2015[Consulta, 2 de Agosto de 2019]). “ajuste del sistema Índice de productividad (ip) y su aplicación mediante herramientas sig para las provincias de salta y jujuy”. Recuperado de [https://inta.gov.ar/sites/default/files/inta\\_indice\\_productividad\\_salju\\_moralespoclava.pdf](https://inta.gov.ar/sites/default/files/inta_indice_productividad_salju_moralespoclava.pdf). 77
- Morello, J. . M. (2000). “singularidades territoriales y problemas ambientales de un país asimétrico y terminal”. pp. 1–12. 2, 7, 8, 9
- Quirós, R. (2004). Cianobacterias en lagos y embalses de argentina: década del 80. *Serie de Documentos de Trabajo del Área de Sistemas de Producción Acuática. Departamento de Producción Animal, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Documento*, (2):23. 29

- Quirós, R., Rosso, J. J., Rennella, A., Sosnovsky, A., y Boveri, M. (2002). Análisis del estado trófico de las lagunas pampeanas (argentina). *Interciencia*, 27(11):584–591. 22
- Rivas Raúl, C. F. y O. D. (2011). “*Teledetección: Recientes aplicaciones en la región pampeana*”. Argentina. Primera Edición. XIX, 28, 62, 63, 64
- Ruiz-Verdú, A., Domínguez, J., y Peña, R. (2001). Teledetección aero-portada hiperespectral del embalse de ribarroja. *Revista de Teledetección*, 16:69–72. XVI, 65, 85, 86, 89
- Tassan, S. y Ferrari, G. M. (1995). An alternative approach to absorption measurements of aquatic particles retained on filters. *Limnology and Oceanography*, 40(8):1358–1368. 46
- Topliss, B., Almos, C., y Hill, P. (1990). Algorithms for remote sensing of high concentration, inorganic suspended sediment. *International Journal of Remote Sensing*, 11(6):947–966. 64, 84, 95
- Velázquez Alejandro, B. G. y S. C. . (2015[Consulta, 3 de Agosto de 2019]). “cambio de uso del suelo”. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/263342417\\_Cambio\\_de\\_uso\\_del\\_suelo](https://www.researchgate.net/publication/263342417_Cambio_de_uso_del_suelo). 75
- Xie, H., Aubry, C., Bélanger, S., y Song, G. (2012). The dynamics of absorption coefficients of cdom and particles in the st. lawrence estuarine system: Biogeochemical and physical implications. *Marine Chemistry*, 128:44–56. 37
- Zibordi, G. (2007). *Marine optics: field radiometry*. Tesis doctoral, University of Southampton. 40

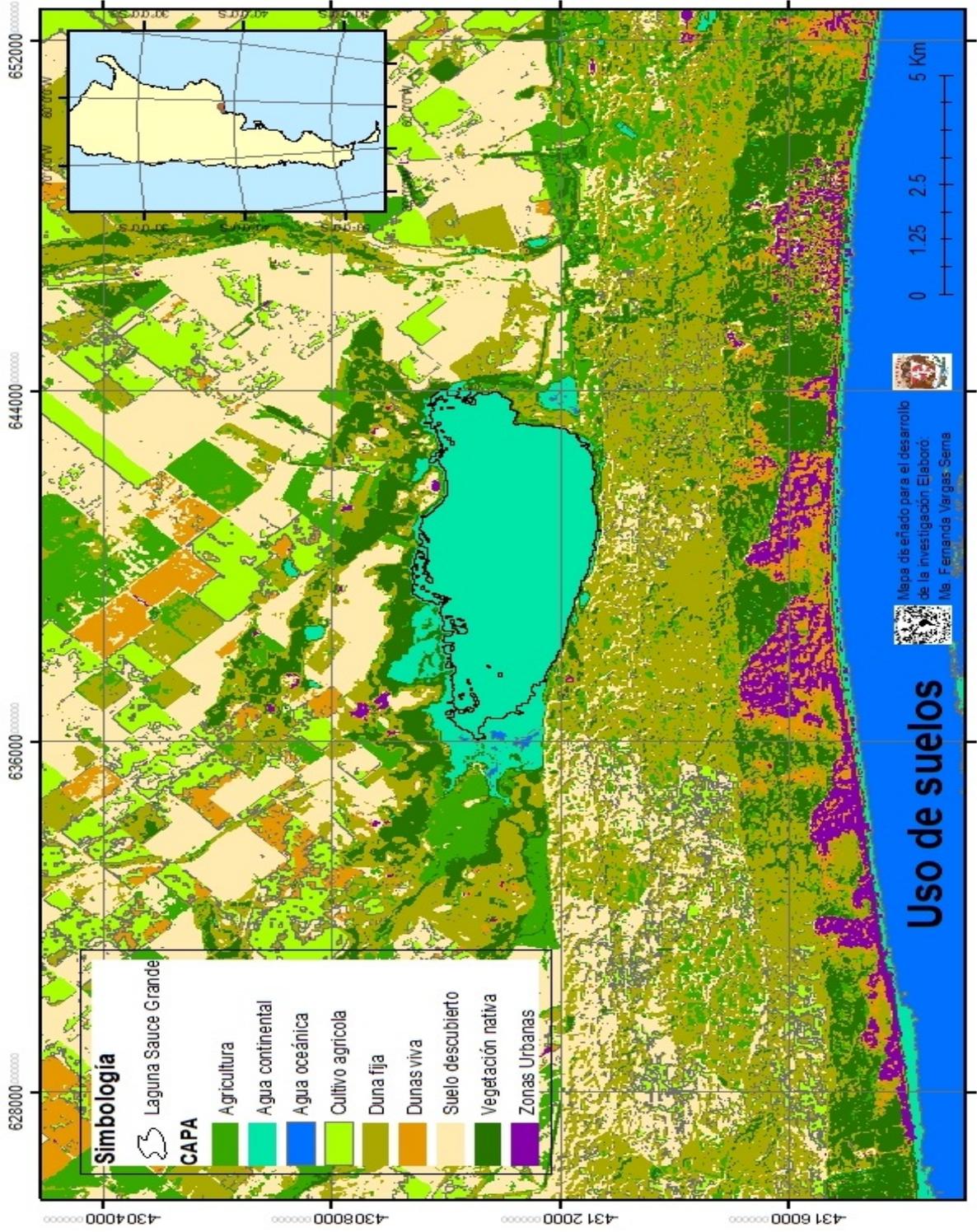


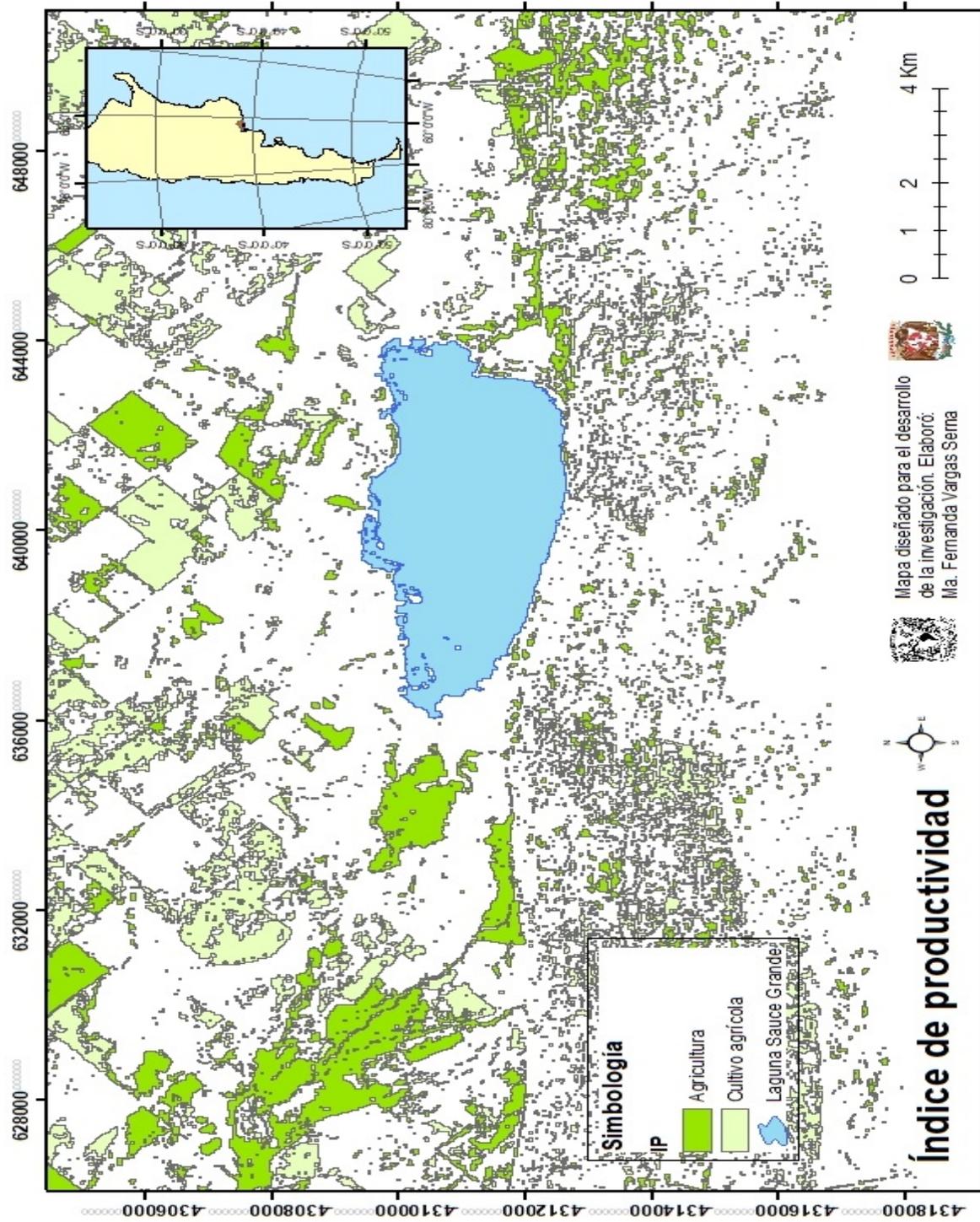
Mapas

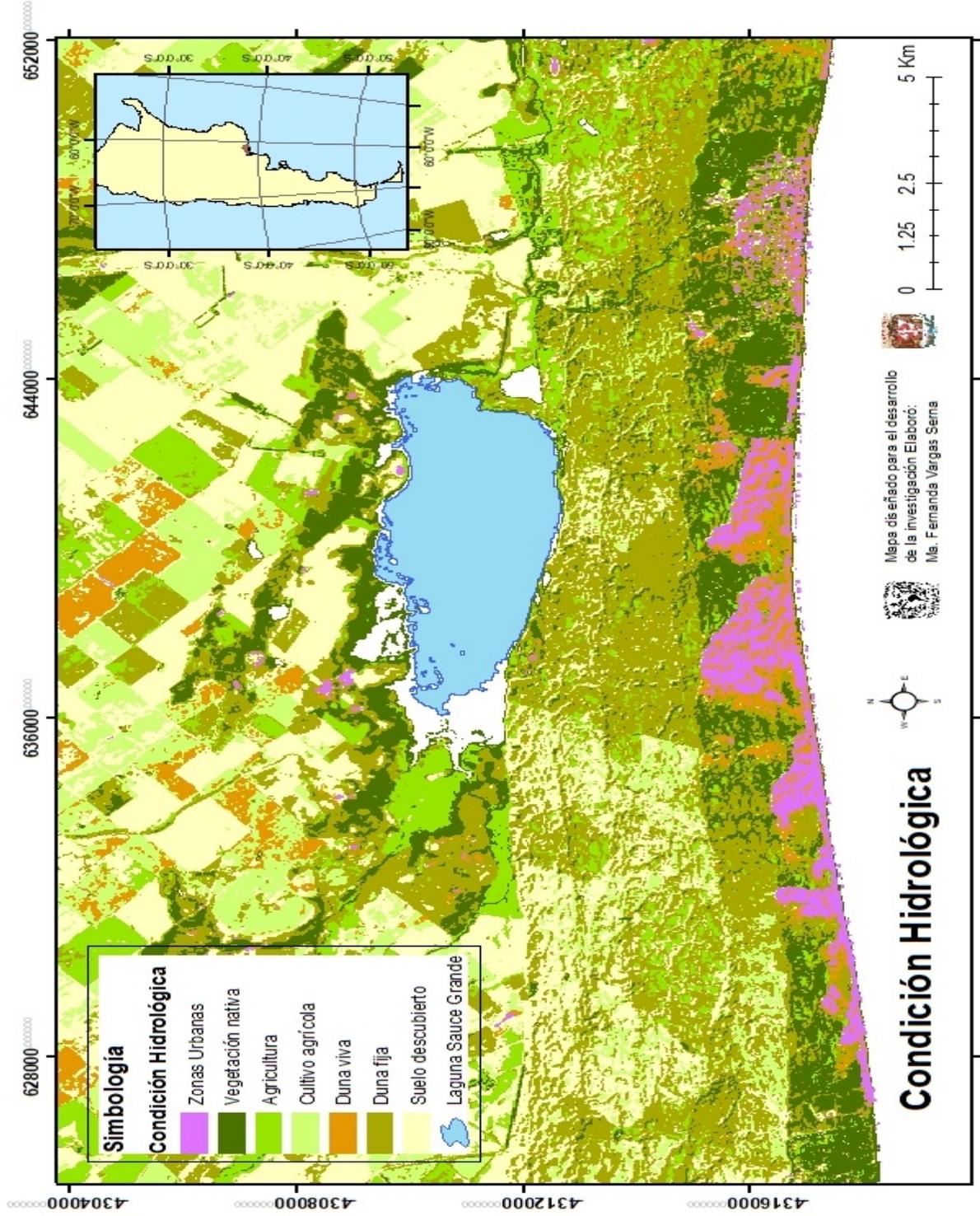


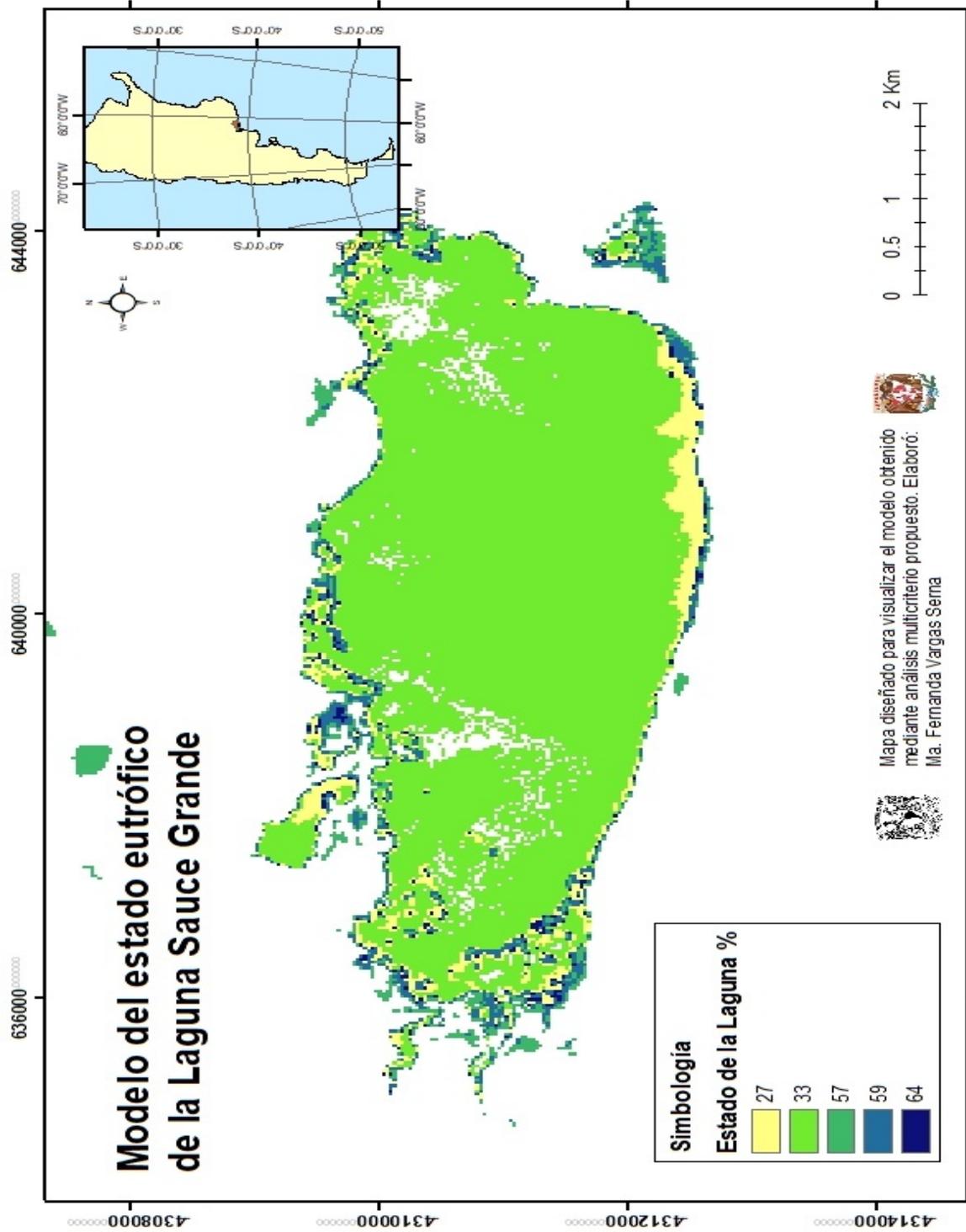


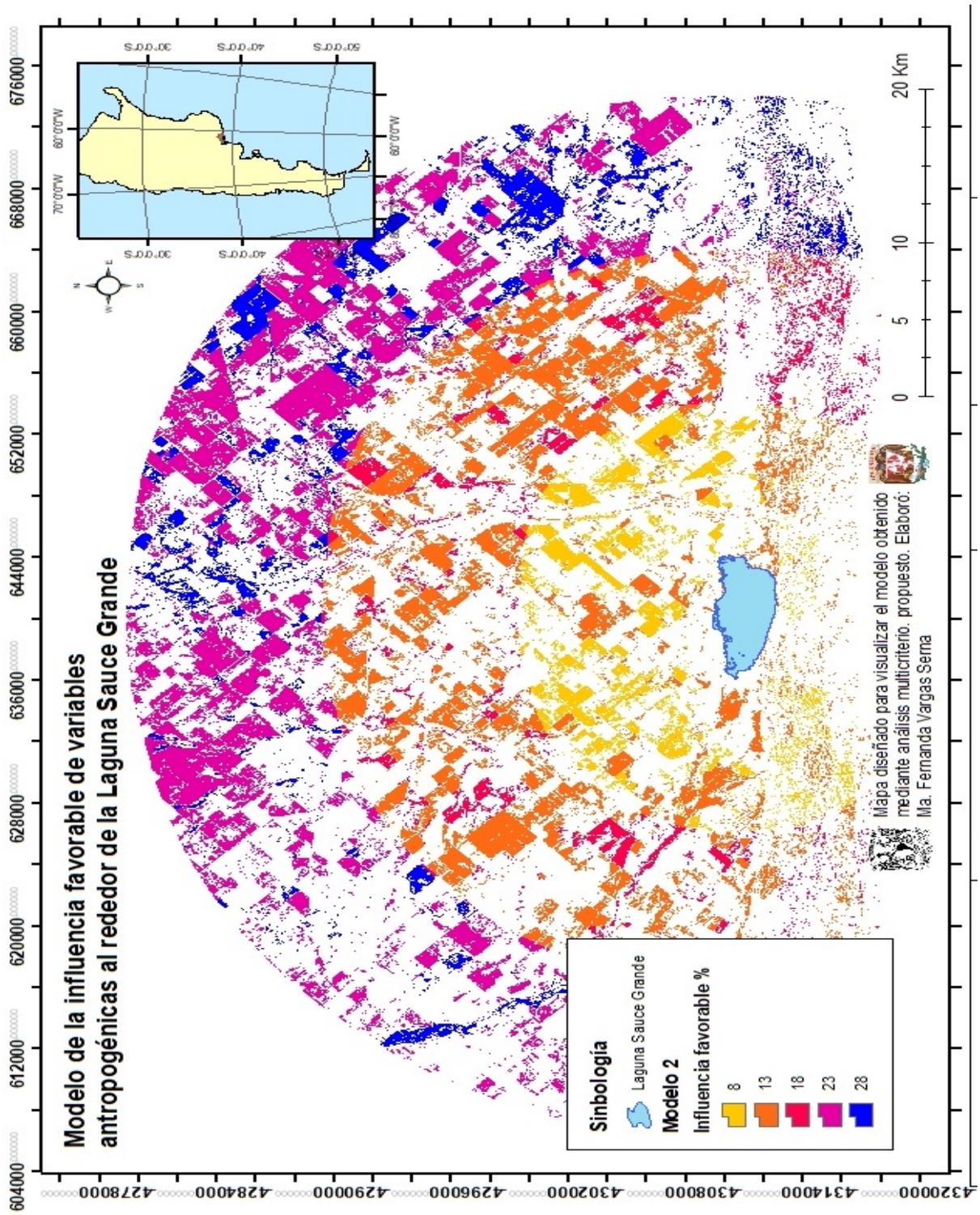












2.jpg