

CONSTRUCCIÓN DE INDICADORES AMBIENTALES NACIONALES A PARTIR DE INFORMACIÓN PROVENIENTE DEL ANÁLISIS DE IMÁGENES SATELITALES

ID N° 608897-12-LE15

INFORME FINAL



CENTRO DE
INTELIGENCIA TERRITORIAL
UNIVERSIDAD ADOLFO IBÁÑEZ
DESIGN.LAB



Santiago, Octubre de 2015

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCCIÓN..... | 5 |
| I. MARCO CONCEPTUAL | 6 |
| 1. Indicadores ambientales | 6 |
| II. ANTECEDENTES | 8 |
| 1. Antecedentes para la construcción de indicadores ambientales..... | 8 |
| 1.1 Revisión de antecedentes nacionales..... | 8 |
| 1.2 Revisión de antecedentes internacionales..... | 8 |
| 2. Proyectos y programas de observación terrestre | 10 |
| 2.1 Principales características de los satélites y sensores satelitales seleccionados | 12 |
| 3. Propuesta de indicadores ambientales | 13 |
| III. INSUMOS SATELITALES..... | 14 |
| 1. Imágenes satelitales gratuitas disponibles para Chile..... | 15 |
| 1.1 Criterios de búsqueda y selección de insumos satelitales | 16 |
| 2. Pretratamiento de los insumos | 20 |
| 2.1 Homologación y sistematización de los insumos espaciales..... | 20 |
| 2.2 Homologación de formatos y estructura lógica de los datos..... | 20 |
| 2.3 Marco espacial de análisis de los insumos satelitales. Corrección geométrica. | 21 |
| 3. Tratamiento de los insumos cartográficos | 22 |
| 3.1 Obtención de radiancia y reflectancia..... | 23 |
| 3.2 Corrección topográfica | 24 |
| IV. DEFINICIONES Y CRITERIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE INDICADORES | 25 |
| 1. Ambiente bosques..... | 27 |
| 1.1 Marco contextual, definiciones y criterios determinados para la construcción del indicador | 27 |
| 1.2 Variables y métodos usados en la caracterización del bosque nativo | 27 |
| 1.2.1 Bandas espectrales usadas en la obtención de los indicadores del bosque nativo | 28 |
| 1.2.2 Índice vegetacional utilizado: NDVI..... | 28 |
| 1.2.3 Firma espectral y método de clasificación | 28 |
| 1.3 Indicadores ambientales construidos para el bosque nativo..... | 30 |
| 1.3.1 Superficie anual cubierta por bosque nativo | 30 |
| 1.3.2 Vigor vegetacional anual del bosque nativo | 31 |
| 1.3.3 Superficie anual del bosque nativo incendiada..... | 32 |

| | | |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.3.4 | Obtención de Tendencias en Áreas Protegidas..... | 33 |
| 2. | Ambiente marino costero..... | 33 |
| 2.1 | Marco contextual, definiciones y criterios determinados para la construcción del indicador | 33 |
| 2.2 | Variables componentes del indicador: Clorofila a, Sólidos en suspensión y Turbidez..... | 34 |
| 2.2.1 | Modelos y métodos seleccionados para obtener la clorofila a..... | 35 |
| 2.2.2 | Modelos y métodos seleccionados para obtener los sólidos en suspensión..... | 36 |
| 2.2.3 | Modelos y métodos seleccionados para obtener la turbidez | 37 |
| 2.2.4 | Normalización de las variables físicas | 37 |
| 2.3 | Calidad anual del agua del mar superficial..... | 38 |
| 3. | Ambiente lacustre | 38 |
| 3.1 | Marco contextual, definiciones y criterios determinados para la construcción del indicador | 38 |
| 3.2 | Variables componentes del indicador: superficie lámina de agua y grado de eutrofización..... | 38 |
| 3.2.1 | Superficie lámina de agua | 39 |
| 3.2.2 | Grado de eutrofización..... | 39 |
| 3.3 | Eutrofización anual de la superficie lacustre..... | 39 |
| 4. | Ambiente glaciares | 40 |
| 4.1 | Marco contextual, definiciones y criterios determinados para la construcción del indicador | 40 |
| 4.2 | Variables componentes del indicador: superficie cubierta por cuerpos glaciares..... | 40 |
| 4.2.1 | Superficie cubierta por cuerpos glaciares | 40 |
| 4.3 | Superficie Anual Cubierta por Cuerpos Glaciares..... | 41 |
| 5. | Ambiente urbano..... | 41 |
| 5.1 | Marco contextual, definiciones y criterios determinados para la construcción del indicador | 41 |
| 5.2 | Variables componentes del indicador: vegetación por manzana urbana | 42 |
| 5.2.1 | Superficie cubierta con vegetación por manzana urbana..... | 42 |
| 5.3 | Superficie anual promedio de vegetación por manzana urbana | 42 |
| 6. | Ambiente humedales alto andino | 43 |
| 6.1 | Marco contextual, definiciones y criterios determinados para la construcción del indicador | 43 |
| 6.2 | Variables componentes de los indicadores: superficie cubierta con vegetación y superficie inundada | 43 |
| 6.2.1 | Obtención de la superficie cubierta con vegetación en el humedal..... | 44 |
| 6.2.2 | Obtención de la superficie inundada en el humedal..... | 44 |
| 6.3 | Indicadores propuestos para los humedales del Alto Andino..... | 44 |
| 6.3.1 | Superficie anual cubierta con vegetación en el humedal | 44 |

| | | |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.3.2 | Superficie anual inundada en el humedal | 45 |
| 6.3.3 | Obtención de Tendencias en Humedales Altos Andinos..... | 45 |
| V. | RESULTADOS..... | 46 |
| 1. | Herramientas y modelos ambientales..... | 46 |
| 2. | Indicadores desarrollados para el ambiente de bosque nativo | 46 |
| 2.1 | Superficie anual cubierta con bosque nativo (SACBN) | 47 |
| 2.1.1 | SACBN: resultados y tendencias. Periodo 1990 - 2015 | 47 |
| 2.2 | Vigor vegetacional anual del bosque nativo (VVABN)..... | 61 |
| 2.2.1 | VVABN: resultados y tendencias. Periodo 1990 - 2015..... | 61 |
| 2.3 | Tendencias Anuales de NDVI para Áreas Protegidas (MODIS) | 74 |
| 2.4 | Superficie anual del bosque nativo incendiada: Caso de Estudio Conguillío y China Muerta. | 77 |
| 3. | Indicador desarrollado para el ambiente marino costero..... | 80 |
| 3.2 | CAAMS: resultados y tendencias. Periodo 1990 - 2015 | 80 |
| 4. | Indicador desarrollado para el ambiente lacustre | 94 |
| 4.2 | EASL: resultados y tendencias. Periodo 1990 - 2015..... | 95 |
| 5. | Indicador desarrollado para el ambiente glaciar..... | 108 |
| 5.2 | SACCG: resultados y tendencias. Periodo 1990 - 2015 | 109 |
| 6. | Indicador desarrollado para el ambiente urbano..... | 122 |
| 6.2 | SACVMU: resultados y tendencias. Periodo 1990 - 2015..... | 123 |
| 7.2.1 | SAIH: resultados y tendencias. Periodo 1990 – 2015..... | 143 |
| 7.3 | Tendencias Anuales de NDVI para Humedales altos andinos (MODIS)..... | 150 |
| VI. | GLOSARIO DE TÉRMINOS | 152 |
| VII. | BIBLIOGRAFÍA | 158 |

INTRODUCCIÓN

La formulación de indicadores ambientales en el presente proyecto, elaborado por el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) y el Centro de Inteligencia Territorial de la Universidad Adolfo Ibáñez (CIT-UAI), se enmarca en el trabajo que se encuentra realizando el MMA para mejorar la gestión, el monitoreo y el análisis medioambiental en el territorio nacional, acercándose a los estándares internacionales entregados por organismos como la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) y la Organización de las Naciones Unidas (ONU), a través de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Además, se han considerado los trabajos relevantes realizados en la materia por países como Estados Unidos, España e India, específicamente en lo referente a la construcción de indicadores ambientales mediante Teledetección, percepción remota o imágenes satelitales.

Dentro de las indicaciones y recomendaciones que surgen a partir de la Evaluación de Desempeño Ambiental de la OCDE y la CEPAL del año 2005, se señala la necesidad de “desarrollar un conjunto nacional de indicadores para medir el desempeño ambiental con respecto a objetivos nacionales y a compromisos internacionales” (OCDE-CEPAL, 2005: 18), como parte del mejoramiento de la gestión ambiental del país. En el mismo documento se indica el deber de perfeccionar la información ambiental, en lo referente a la relevancia de las políticas y la capacidad de medición (periodicidad, cobertura nacional y comparabilidad ambiental), apuntando a “producir información ambiental, informes de la situación del medio ambiente e indicadores ambientales con el fin de fortalecer la toma de decisiones y la información pública, tomando en cuenta las metodologías internacionales” (OCDE-CEPAL, 2005: 32).

El objetivo principal de este estudio se relaciona a la construcción de indicadores ambientales nacionales a partir de información proveniente del análisis de imágenes satelitales, que apoyen la gestión y planificación ambiental del país. La información presentada es enfocada específicamente a los ambientes bosques, marino costero, lacustre, glaciar, urbano y humedales. En cuanto a los métodos utilizados para el desarrollo de indicadores, el uso de metodologías relacionadas a la Teledetección y el análisis de imágenes satelitales permiten su construcción de manera más eficiente que los métodos clásicos de toma de datos *in situ*. La información que proveen los sensores espaciales multiespectrales se caracteriza por ser obtenida en grandes volúmenes, de forma económica, rápida, precisa y con cobertura global. Por esta razón, el análisis de imágenes satelitales y el uso de tecnologías de información permiten la construcción y la periódica actualización de indicadores ambientales de manera automatizada, permitiendo estudiar las tendencias y las dinámicas de los distintos ambientes, en escalas espacio temporales multidimensionales.

I. MARCO CONCEPTUAL

1. Indicadores ambientales

La comprensión y uso del concepto de indicadores ambientales utilizado en el presente documento hace referencia a la definición realizada por el MMA y los organismos internacionales a los cuales Chile pertenece.

El MMA (2013) define el concepto de indicadores utilizando como fuente el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), indicándolo como “valor observado representativo de un fenómeno a ser estudiado. Los indicadores señalan, brindan información y describen el estado del medio ambiente con una relevancia superior a lo directamente asociado a la mera observación. En general, los indicadores cuantifican la información al agregar y sintetizar datos distintos y múltiples, simplificando así la información capaz de esclarecer fenómenos de gran complejidad” (PNUMA, 2009).

Respecto a la definición presentada por la OCDE, en base a Naciones Unidas (1997), los indicadores corresponden a un parámetro o valor derivado de parámetros que proporciona información para describir el estado de un fenómeno, ambiente o área, con un significado que va más allá del directamente asociado con el valor del parámetro en sí mismo.

A su vez la CEPAL (2009) señala que los indicadores ambientales y de desarrollo sostenible, “constituyen un sistema de información selecta que permite a los países, los actores interesados (stakeholders) o bien a las comunidades de territorios específicos (...) evaluar su progreso en cuanto a determinadas metas cuando éstas existen, o al menos con respecto a los niveles observados en un año base” (CEPAL, 2009: 12).

El MMA también señala la importancia de utilizar indicadores medio ambientales ya que permiten medir y dimensionar variables, facilitando la comprensión y seguimiento de los problemas, dar cuenta de tendencias, y evaluar lo que se ha realizado en la materia. Respecto a los modelos de clasificación y agrupamiento, se consignan indicadores referidos a fuerzas motrices, presiones, estado, impacto, respuestas (MMA; 2013):

- **Fuerzas motrices (FM):** se refieren a factores o variables indirectas que están detrás de las presiones más específicas que afectan al medio ambiente.
- **Presiones (P):** se refieren a factores o variables directas que afectan el estado de los componentes del medio ambiente de manera individual o colectiva. Estas presiones pueden ser de orden antrópico o deberse a procesos naturales.
- **Estado (E):** se refiere a la situación en que se encuentran los componentes del medio ambiente, producto de las fuerzas motrices y de las presiones.
- **Impacto (I):** el estado de los componentes ambientales está asociado a impactos de distinto orden, tanto en la calidad de vida o en la salud de las personas, así como en los servicios ecosistémicos que entrega el medio ambiente.
- **Respuestas (R):** se refiere a las acciones que realizan tanto las autoridades, como la sociedad en general, ya sea en orden a disminuir los impactos ambientales o también para adaptarse a éstos.

Estas acciones afectarán el estado de los componentes del medio ambiente, así como las presiones y las fuerzas motrices.

1.1 Definiciones a considerar

En base a lo establecido por la CEPAL (2009: 18-19), se considera relevante tener como referencia las siguientes definiciones relativas al desarrollo y construcción de los indicadores ambientales.

| Concepto | Definición |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variable | Fenómeno que se estudia, cuyo valor en el tiempo y/o en el espacio, varía. Variables ambientales usuales son: la calidad del aire en una ciudad, la cantidad de lluvia anual en una provincia, la carga de contaminante X que lleva un curso de agua superficial (río, por ejemplo), o la calidad de los suelos en un territorio determinado. Al ser variables, su valor varía en el tiempo y entre los diversos territorios, permitiéndonos acceder a información respecto de su estado, evolución y tendencia. |
| Indicador | Los indicadores son estadísticas seleccionadas por su capacidad de mostrar un fenómeno importante. Los indicadores, a menudo resultan de procesar series estadísticas en formas de agregación, proporción, tasas de crecimiento (entre otras), para poder mostrar el estado, la evolución y las tendencias de un fenómeno que interesa monitorear. Los indicadores se diseñan y producen con el propósito de seguir y monitorear algunos fenómenos o conjuntos de dinámicas que requieren algún tipo de intervención o programa. Por lo tanto, los indicadores se intencionan desde su origen, y requieren de un cuidadoso proceso de producción en el que se calibran varios criterios como la disponibilidad y calidad de información, la relevancia del indicador, el aporte del indicador al Sistema de Indicadores, entre otros. |

Fuente: CEPAL, 2009.

II. ANTECEDENTES

1. Antecedentes para la construcción de indicadores ambientales

Con el fin de conocer las iniciativas metodológicas desarrolladas a nivel nacional e internacional acerca de la construcción de indicadores ambientales a partir de información proveniente de imágenes satelitales, se hizo una revisión de investigaciones y proyectos acordes a los objetivos del presente estudio.

1.1 Revisión de antecedentes nacionales

La revisión de indicadores ambientales construidos a nivel nacional consistió en la revisión de documentos desarrollados por instituciones públicas con competencia ambiental y la búsqueda de investigaciones referidas a la aplicación de metodologías de Teledetección en evaluaciones medio ambientales. Como fuentes principales se consultaron los trabajos desarrollados por el MMA, específicamente el Informe del Estado del Medio Ambiente 2011 y el Primer Reporte del Estado del Medio ambiente 2013, documentos que entregan información respecto a los principales componentes del medio ambiente a distintas escalas territoriales, permitiendo dar a conocer los principales problemas ambientales del país. También se consultó el Informe Anual de Estadísticas del Medio Ambiente 2014, documento desarrollado por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE), cuyo objetivo es entregar series estadísticas y variables medio ambientales desglosadas a nivel regional para analizar comparativamente el estado del medio ambiente a nivel país.

La revisión de la información desarrollada por estas instituciones da cuenta de la inexistencia de indicadores construidos mediante metodologías de Teledetección y análisis satelital, sino más bien se remiten a recopilar información secundaria proveniente de distintas instituciones nacionales con competencia ambiental, así como a la consulta de investigaciones en la materia. Sin embargo, a partir de los documentos consultados, fue posible recopilar los antecedentes necesarios para establecer el marco conceptual en base al cual se desarrolla el estudio.

En cuanto a las investigaciones nacionales en la materia, estas se remiten a la construcción y comparación de índices mediante imágenes satelitales para conocer el estado y evolución de ciertos ambientes, como se observa en la Tabla 1. A nivel nacional se reconocen dos investigaciones de interés: “Comparación de índices de vegetación a partir de imágenes MODIS en la Región del Libertador Bernardo O’Higgins, Chile, en el período 2001-2005” de Sánchez y Carvacho (2010), y “Efectos del crecimiento urbano del Área Metropolitana de Concepción sobre los humedales de Rocuant-Andalién, Los Batros y Lengua” de Smith y Romero.

1.2 Revisión de antecedentes internacionales

Se realizó una revisión bibliográfica en las plataformas de las revistas científicas de mayor impacto internacional, referente a la construcción de variables e indicadores ambientales basados en Teledetección satelital. Dentro de esta revisión se consultaron investigaciones publicadas en siete revistas electrónicas del área temática, entre ellas:

- *International Journal of Remote Sensing;*

- *Geoscience and Remote Sensing Letters;*
- *Remote Sensing of Environment;*
- *International Journal of Remote Sensing;*
- *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing;*
- *International Review of Geographical Information Science and Technology;*
- Revista de Teledetección de España.

De esta revisión se obtuvo un conjunto extenso de variables, índices e indicadores por ambiente o ecosistema, cubriendo la mayor diversidad de situaciones geográficas que fuesen comparables a la realidad nacional. En la Tabla 1 se puede apreciar un resumen sistematizado de la bibliografía consultada separada por los seis ambientes naturales o ecosistemas considerados en este estudio.

En los anexos digitales se puede encontrar la tabla completa donde se incluye información complementaria que permite ahondar en la investigación acerca de la construcción de indicadores ambientales mediante Teledetección, así como también permite futuros desarrollos de proyectos y líneas de investigación.

Tabla 1. Sistematización de la revisión bibliográfica revisada por ambiente¹

| Ambiente | Título | Autor | Año | País | Temática asociada a indicadores ambientales |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Bosque | Comparación de índices de vegetación a partir de imágenes MODIS en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile, en el período 2001-2005 | Carvacho, L. y Sánchez, M. | 2010 | Chile | Recursos forestales Recursos forestales dañados Bienestar de recursos forestales |
| | Remote Detection of Forest Damage | Rock, B.N; Vogelmann, J.E; Williams, D.L; Vogelmann, A.F; Hoshizaki, T. | 1986 | Estados Unidos | |
| | Indicator determination of forest and land fires vulnerability using Landsat -5 TM data (case study: Jambi Province) | Nurdiana, A; Risdiyanto, I. | 2015 | Indonesia | |
| | Mapping bur severity in a disease-impacted forest landscape using landsat and ASTER imagery | Chen, G; Metz, M; Rizzo, D; Meentemeyer, R. | 2015 | Estados Unidos | |
| | Evaluating Spectral Indices for Assessing Fire Severity in Chaparral Ecosystems (Southern California) Using MODIS/ASTER (MASTER) Airborne Simulator Dato | Harris, S; Veraverbeke, S; Hook, S. | 2011 | Estados Unidos | |
| | Leaf area index estimation using LIDAR and forest reflectance modelling of airborne Hyperspectral data | Lange, H; Solberg, S. | 2008 | Noruega | |
| | Joint leaf chlorophyll content and leaf area index retrieval from landsat data using a regularized model inversion system (REGFLEC)** | Houborg, R; McCabe, M; Cescatti, A; Gao, F; Schull, M; Gitelson, A. | 2014 | Estados Unidos | |

¹ Tabla completa de revisión bibliográfica se encuentra en archivo Excel en anexos digitales.

| Ambiente | Título | Autor | Año | País | Temática asociada a indicadores ambientales |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------|----------------|-----------------------------------------------------|
| Marino costero | Mapas SST de alta resolución mediante combinación de datos TM-AVHRR. | Triñanes, J.A; Cotos, J.M; Torres, J; Arias, J. | 1993 | España | Temperatura superficial del mar Calidad del agua |
| | Sea surface temperature extraction by MODIS remote sensing data in Lianyungang Sea Area. | Lu, Xia. | 2010 | China | |
| | Metodología para el seguimiento multitemporal de la calidad de las aguas costeras en Andalucía a través del tratamiento de imagines Landsat-TM | Fernández-Palacios, A; Moreira, J.M. | 1997 | España | |
| | Predicting water quality by relating Secchi-Disk Transparency and Chlorophyll a Measurements to Landsat Satellite Imagery For Michigan Inland Lakes, 2001-2006 | Fuller, L.M; Minnerick, R.J. | 2007 | Estados Unidos | |
| Lacustre y embalses | Hacia una relación única para el estudio del estado trófico de lagos y embalses con Thematic Mapper. | Doña, C; Dominguez, J.A; Caselles, V. | 2009 | España | Estado trófico del agua |
| | Study on method for assessment of the physical structure integrity in chagan lake in China based on remote sensing. | Fu, B.L; Li, Y; Zhang, B; Yin, B.S; Zhu H.L; Xin, Z.F. | 2014 | China | |
| Glaciar | Análisis multitemporal de imágenes LANDSAT TM en la cartografía de las masas de hielo y nieve aplicadas a la modelización hidrológica. | Alonso, C; Moreno, V. | 1996 | España | Superficie glaciar |
| | Detection of earlier snowmelt in the Wind River Range, Wyoming, Using Landsat Imagery, 1972-2013. | Hall, D; Crawford, C.J; Digirolamo, N.E; Riggs, G.A; Foster, J.L. | 2015 | Estados Unidos | |
| Urbano | Impacts of urban biophysical composition on land surface temperature in urban heat island clusters. | Guo, G; Wu, Z; Xiao, R; Chen, Y; Liu, X; Zhang, X. | 2015 | China | Superficie de vegetación urbana |
| | The role of local land use on the urban heat island effect of Tel Aviv as Assessed from satellite remote sensing. | Mindali, O.R; Michael, Y; Helman, D; Lensky, I.M. | 2015 | Israel | |
| Humedales | Remote sensing of the effects of irrigation activities on vegetation health in ephemeral wetlands of semi arid Australia. | Simon N. Bengier | 1998 | Australia | Biodiversidad |
| | Wetland inundation mapping and change monitoring using Landsat and airborne LiDAR data | Huang, C; Peng, Y; Lang, M; Yeo, I.Y; McCarty, G. | 2014 | Estados Unidos | |
| | Efectos del crecimiento urbano del Área Metropolitana de Concepción sobre los humedales de Rocuant-Andalién, Los Batros y Lenga. | Smith, P; Romero, H | 2009 | Chile | |

Fuente: CIT-UAI, 2015.

2. Proyectos y programas de observación terrestre

A partir de los ambientes e indicadores obtenidos de la revisión bibliográfica, se recopilieron algoritmos y modelos utilizados en investigaciones y puestos a disposición de la comunidad científica internacional en diferentes plataformas virtuales. Se consultaron fuentes relevantes tales como *United States*

Environmental Protection Agency (EPA); Centro de recursos de ArcGis (ArcGIS Resources, ESRI); European Space Agency (ESA).

De esta revisión se extrajeron las expresiones matemáticas de las variables o índices espectrales desarrollados en las diferentes investigaciones analizadas. Por otra parte, de las plataformas virtuales visitadas se obtuvieron los insumos satelitales y la información relevante para crear estrategias o criterios de decisión, que permitieron seleccionar los métodos y las herramientas a utilizar para construir los indicadores ambientales.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en relación al contenido teórico base que sustenta a la mayor parte de las investigaciones realizadas en Teledetección satelital, siempre enfocados en la capacidad de generación de información ambiental con una adecuada resolución espacio-temporal, contrastable con información levantada en campañas de terreno. En la Tabla 2 se pueden apreciar los principales proyectos y programas de observación terrestre, desarrollados por países miembros o adherentes de la OCDE.

Tabla 2. Principales características de los proyectos y programas de observación terrestre revisados

| Proyecto o programa | Instituciones o Estados patrocinantes | Plataformas satelitales | Sensores considerados | Cobertura temporal | Observaciones |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Land Remote Sensing Program (LRSP) | U.S. Geological Survey (USGSS) National Aeronautics and Space Administration (NASA) | Landsat 5 | Thematic Mapper (TM) | 1984 - 2011 | Media resolución espacial |
| | | Landsat 7 | Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM) | 1999 - presente | Sensor con problemas de barrido en algunos periodos |
| | | Landsat 8 | Operational Land Imager (OLI) | 2013 - presente | El sensor TIRS sufrió problemas de calibración gran parte del verano 2015 (HS) |
| Thermal Infrared Sensor (TIRS) | | | | | |
| Earth Observing System (EOS) | NASA | Terra Aqua | Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) | 2000 - presente | Resolución espacial causa problemas de límites o contornos. Menor resolución espacial |
| | NASA Ministerio de Economía de Japón | Terra | Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) | 2000 - presente | El subsistema SWIR no funciona normalmente desde el año 2008 |
| SPOT-VEGETATION | Bélgica Francia Italia Suecia Comisión Europea | SPOT 4 | VEGETATION - 1 | 1998 - presente | Solo vegetación, lo que restringe los ambientes a estudiar. Mayor resolución espacial |
| | | SPOT 5 | VEGETATION - 2 | 2002 - presente | |

Fuente: CIT-UAI, 2015.

Se seleccionaron las series de imágenes satelitales Landsat y MODIS, cuyas características se señalan en el siguiente capítulo, debido a su mejor resolución espacial, temporal y espectral, además del correcto funcionamiento de sus respectivas misiones, para la construcción de los indicadores ambientales en base a los programas de la USGS y la NASA.

Se deja en claro que el alto potencial de otros programas, como los programas SPOT-VEGETATION y *Copernicus*, es trascendental para futuras consideraciones metodológicas, así como también la información generada por otros satélites y sensores multispectrales de alta resolución espacial, pero baja resolución espectral (Quickbird, Kompsat, SPOT, entre otras). Si bien el programa de observación terrestre *Copernicus* de la ESA es destacable, compuestos por la familia de satélites Sentinel y sensores in situ (estaciones terrestres, además de sensores en aviones y barcos), este no se ha considerado para el presente estudio, debido a su reciente lanzamiento e implementación (año 2014).

2.1 Principales características de los satélites y sensores satelitales seleccionados

En la Tabla 3 se presentan las principales características de la familia Landsat y MODIS, junto a los rangos y resoluciones espectrales que caracterizan a cada banda espectral de los sensores de la familia Landsat y del sensor MODIS. Cabe destacar que la mayor parte de los satélites recorren los rangos del espectro electromagnético asociados a la luz visible (Blue, Green y Red) y la radiación infrarroja (infrarrojo cercano (NIR) y corto (SWIR)). Salvo los sensores ASTER, los de la familia Landsat y los pertenecientes a MODIS, el resto no incluye bandas espectrales centradas en la región del infrarrojo térmico.

Tabla 3. Principales características de los de los sensores de la familia Landsat y MODIS

| Landsat | | | | | MODIS | | | |
|---------|-----------------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------|------------|---------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Sensor | Banda | Resolución espectral (um) | Resolución espacial (m) | Aplicaciones | Banda | Resolución espectral (um) | Resolución espacial (m) | Aplicaciones |
| TM | B1 (Blue) | 0,45 - 052 | 30 | Mapeo de aguas costeras | B1 (Red) | 0,620 – 0,670 | 250 | Bordes de Tierra Nubes Aerosoles |
| | B2 (Green) | 0,52 – 0,60 | | Mapeo vegetación | B2 (NIR) | 0,841 – 0,876 | | |
| | B3 (Red) | 0,63 – 0,69 | | Absorción de clorofila | B3 (Blue) | 0,459 – 0,479 | | |
| | B4 (NIR) | 0,76 – 0,90 | | Delimitación de cuerpos de agua | B4 (Green) | 0,545 – 0,565 | | |
| | B5 (SWIR1) | 1,55 – 1,75 | | Agricultura | B5 (NIR) | 1,23 – 1,25 | | |
| | B6 (LWIR) | 10,40 – 12,50 | 120 (30) | Propiedades termales del suelo | B6 (SWIR) | 1,628 – 1,652 | 500 | Propiedades de Tierra Nubes Aerosoles |
| | B7 (SWIR2) | 2,08 – 2,35 | 30 | Identificación de minerales | B7 (SWIR) | 2,105 – 2,155 | | |
| ETM | Bandas B1 a B7 similar a TM | 0,45 – 12,50 | 30 | Vegetación Calidad del agua Agricultura | B8 – B16 | 0,405 – 0,877 | 1000 | Color del Océano Fitoplancton Biogeoquímica |
| | B8 (Pan) | 0,52 – 0,90 | 15 | Albedo | B17 – B19 | 0,89 – 0,965 | | Vapor de agua atmosférico |
| OLI | B1 | 0,43 – 0,45 | 30 | Aguas costeras | B20 – B23 | 3,66 – 4,08 | | Temperatura de la superficie y las nubes |
| | B2 (Blue) | 0,45 – 0,51 | | Tipos de vegetación | B24 – B25 | 4,43 – 4,55 | Temperatura atmosférica | |
| | B3 (Green) | 0,53 – 0,59 | | Calidad del agua | B26 – B28 | 1,36 – 7,47 | Vapor de agua Nubes tipo Cirrus | |

| | | | | | | | | |
|------|-------------|---------------|----------|-------------------------------|-----|---------------|--|------------------------------------------|
| | B4 (Red) | 0,64 – 0,67 | | Áreas urbanas | B29 | 8,40 – 8,70 | | Propiedades de las nubes |
| | B5 (NIR) | 0,85 – 0,88 | | Áreas húmedas | B30 | 9,58 – 9,88 | | Ozono |
| | B6 (SWIR1) | 1,57 – 1,65 | | Humedad en la vegetación | B31 | 10,78 – 11,28 | | Temperatura de la superficie y las nubes |
| | B7 (SWIR2) | 2,11 – 2,29 | | Agricultura | B32 | 11,77 – 12,27 | | |
| | B8 (Pan) | 0,50 – 0,68 | | Albedo | B33 | 13,18 – 13,48 | | Altitud máxima de nubes |
| | B9 (Cirrus) | 1,36 – 1,38 | | Nubes | B34 | 13,48 – 13,78 | | |
| TIRS | B10 (LWIR1) | 10,60 – 11,19 | 100 (30) | Corrientes marinas | B35 | 13,78 – 14,08 | | |
| | B11 (LWIR2) | 11,50 – 12,51 | | Stress térmico en las plantas | B36 | 14,08 – 14,38 | | |

Fuente: CIT-UAI, 2015.

3. Propuesta de indicadores ambientales

Para cada uno de los seis ambientes naturales considerados en el presente estudio por el MMA – bosques, marino costero, lacustre, glaciar, urbano y humedales –, se han propuesto y construido los indicadores medio ambientales sintetizados en la Tabla 4. En ella se puede apreciar el indicador o los indicadores propuestos para cada ambiente.

Tabla 4. Indicadores desarrollados por ambiente y sus variables componentes

| Ambiente | Nombre Indicador Ambiental | Variables e Índices Ambientales |
|----------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Bosques | Superficie anual cubierta por bosque nativo | Superficie anual cubierta por bosque nativo |
| | Vigor vegetacional en el bosque nativo | Vigor vegetacional del bosque nativo |
| | Superficie anual cubierta por bosque nativo incendiado | Superficie cubierta por incendios forestales |
| Marino costero | Calidad anual superficial del agua de mar | Índice de calidad superficial del mar |
| Lacustre | Eutrofización anual de la superficie lacustre | Grado de eutrofización de lagos y lagunas |
| Glaciar | Superficie anual cubierta por cuerpos glaciares | Superficie cubierta por glaciares |
| Urbano | Porcentaje de vegetación por manzana urbana | Superficie cubierta con vegetación por manzana urbana |
| Humedales | Superficie anual cubierta con vegetación en el humedal | Superficie inundada del humedal |
| | Superficie anual inundada en el humedal | Superficie cubierta con vegetación en el humedal |

Fuente: CIT-UAI, 2015.

III. INSUMOS SATELITALES

A partir de los antecedentes expuestos respecto a los ambientes y características de los sensores, en la Tabla 5 se pueden observar las principales variables o índices ambientales, caracterizados con su expresión o formulación, y las situaciones geográficas en las que se han estudiado. Las expresiones de son aplicables a cualquier sensor que posea bandas centradas en las regiones espectrales en las que estas son definidas.

Tabla 5. Índices y variables seleccionados por ambiente

| Ambiente | Índice o Variable | Expresión o método | Situación geográfica |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bosques | Superficie cubierta por bosque nativo | $Sup\ BN = \alpha_1 L_1 + \alpha_2 L_2 + \alpha_3 L_3 + \alpha_4 L_4 + \alpha_5 L_5$ <p>Donde: L: Radiancia espectral corregida bandas Landsat α: parámetros de regresión</p> | Bosque Nativo a escala nacional al interior de las Áreas Protegidas del SNASPE |
| | Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) | $NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$ <p>Donde: NIR: reflectividad en la banda del infrarrojo cercano. RED: reflectividad en la banda del rojo.</p> | |
| | Normalized Burnt Ratio (NBR) | $NBR = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)}$ <p>Donde: NIR: reflectividad en la banda del infrarrojo cercano. SWIR: reflectividad en la banda del infrarrojo de onda corta.</p> | |
| Marino costero | Clorofila a (Ca) | $Ca = -3,533 + 0,455L_4 + 0,321L_5$ <p>Donde: C_a = Clorofila a (mg/m³) L₄ = Radiancia banda OLI4 L₅ = Radiancia banda OLI5</p> | Estuarios, bahías y efluentes (área de influencia de 2,5 km) determinados por el MMA y CIT |
| | | $Ca = -206,318 + 3,747L_2 + 3,014L_3 - 2,253L_4 + 4,657L_6 + 3,732L_7$ <p>Donde: L_i = Radiancia bandas OLI (i = 2,3,4,6,7)</p> | |
| | $Ca = \sqrt{(0,73\rho_3 + 0,883)}$ <p>Donde: ρ :reflectividad corregida banda 3 (TM)</p> | | |
| | $SS = -8,093 + 0,278L_3 + 0,429L_4$ <p>Donde: SS = Sólidos en suspensión (mg/l) L₃ = Radiancia banda OLI3 L₄ = Radiancia banda OLI4</p> | | |
| | Sólidos en suspensión (SS) | $SS = 33,703 - 1,179L_2 + 3,243L_4 + 1,577L_5$ | |

| Ambiente | Índice o Variable | Expresión o método | Situación geográfica |
|-----------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| | | <p>Donde:</p> $L_i = \text{Radiancia bandas OLI } (i = 2,4,5)$ | |
| | | $SS = 4,197L_4 - 42,86$ <p>Donde:</p> $L_4 = \text{Radiancia banda OLI4}$ | |
| | Turbidez (Tu) | $Tu = -8,20 + 0,266 L_3 + 0,716L_4 + 0,094L_5$ <p>Donde:</p> $T_u = \text{Turbidez (Unidades Nefelométrica de Turbidez, UNT)}$ $L_i = \text{Radiancia bandas OLI } (i = 3,4,5)$ | |
| Lacustre | Índice de agua del CEDEX | $ICEDEX = \frac{NIR}{RED} - \frac{NIR}{SWIR}, NDWI$ <p>Donde:</p> <p>NIR: reflectividad en la banda del infrarrojo cercano. RED: reflectividad en la banda del rojo. SWIR: reflectividad en la banda del infrarrojo de onda corta.</p> | Lagunas y lagos determinadas por el MMA y CIT |
| Glaciar | Normalized Difference Snow Index (NDSI) | $NDSI = \frac{(GREEN - SWIR)}{(GREEN + SWIR)}$ <p>Donde:</p> <p>GREEN: reflectividad en la banda del verde. SWIR: reflectividad en la banda del infrarrojo de onda corta.</p> | Glaciares de montaña, glaciaretos y campos de hielo |
| Urbano | Superficie anual promedio cubierta con vegetación por manzana urbana | $P_{veg} = \frac{50}{Sm} (Sv_i + Sv_v)$ <p>Donde:</p> <p>Sv: Superficie de la manzana cubierta con vegetación por estación. Sm: Superficie total de la manzana.</p> | Ciudades con más de 100.00 hab. |
| Humedales | Normalized Difference Water Index (NDWI) | $NDWI = \frac{(GREEN - NIR)}{(GREEN + NIR)}$ <p>Donde:</p> <p>GREEN: reflectividad en la banda del verde. NIR: reflectividad en la banda del infrarrojo cercano.</p> | Humedales Alto Andino |

Fuente: CIT-UAI, 2015.

De esta manera, se ha logrado caracterizar al menos una dimensión o componente de cada uno de los 6 ambientes o ecosistemas requeridos por el MMA, logrando obtener 12 variables o índices ambientales, directamente relacionados con la construcción de los indicadores medio ambientales.

1. Imágenes satelitales gratuitas disponibles para Chile

Con el fin de generar un diagnóstico de los insumos satelitales disponibles para Chile, cuya obtención sea de forma gratuita, se realizó una búsqueda de imágenes satelitales en las siguientes fuentes:

- *United States Geological Survey (USGS);*
- *Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System (LAADS) de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) de los Estados Unidos;*

- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) de Brasil;
- ASTER Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM), puesta a disposición por el gobierno japonés y la NASA.

1.1 Criterios de búsqueda y selección de insumos satelitales

Se utilizaron como criterios de búsqueda de los insumos satelitales los siguientes aspectos: **la cobertura espacial, las distintas resoluciones de las imágenes satelitales consideradas y la extensión de la superficie cubierta con nubes en cada una de ellas (máx. 60% en la escena)**. Además, debido a que los satélites Landsat 5 y 7 ya no se encuentran operativos, la recolección de insumos provistos por Landsat 8 ha sido exhaustiva, puesto que es el único satélite operativo de la familia Landsat que permite proyectar a futuro un plan o programa de monitoreo ambiental basado en Teledetección.

El análisis de la cobertura de la imaginería satelital disponible permite plantear lo siguiente:

- Dada la resolución y cobertura de los productos Landsat, es posible generar variables e indicadores ambientales contrastables y validables con datos levantados en campañas de terreno y laboratorio (parámetros OCDE).
- En aquellas zonas del país donde no exista cobertura por algún satélite Landsat (cobertura espacial y temporal), principalmente en las zonas sur y austral del país, se podrían utilizar los productos MODIS, de menor resolución espacial, pero mayor resolución temporal y espectral. Se debe analizar la correspondencia de la resolución espacial y la escala indicada para caracterizar a los cuerpos naturales.

De esta forma, se propone que la construcción de series de tiempo de los indicadores ambientales seleccionados siga los criterios de selección de la Tabla 6, en relación a los insumos satelitales descargados y los entregados por el MMA. Por otra parte, en la Tabla 7 se indican la cantidad de imágenes descargadas desde la USGS por año, desde 1990 hasta el 2015, en relación a los sensores Landsat 5, 7 y 8.

Tabla 6. Criterios de selección de sensor satelital por periodo de análisis

| Periodo | Sensor satelital | Cobertura |
|-------------|-----------------------------------|----------------------------|
| 1990 | Landsat 5 (TM) | Arica Parinacota-O'Higgins |
| 1995 | Landsat 5 (TM) | Arica Parinacota-O'Higgins |
| 2000 - 2004 | Landsat 5 (TM) y 7 (ETM) | Arica Parinacota-Los Lagos |
| 2005 - 2009 | Landsat 5 (TM) | Arica Parinacota-Aysén |
| 2010 - 2011 | Landsat 5 (TM) | Arica Parinacota-Los Lagos |
| 2003 - 2013 | MODIS ² (Aqua y Terra) | Nacional |
| 2013 – 2015 | Landsat 8 (OLI y TIRS) | Nacional |

Fuente: CIT-UAI, 2015.

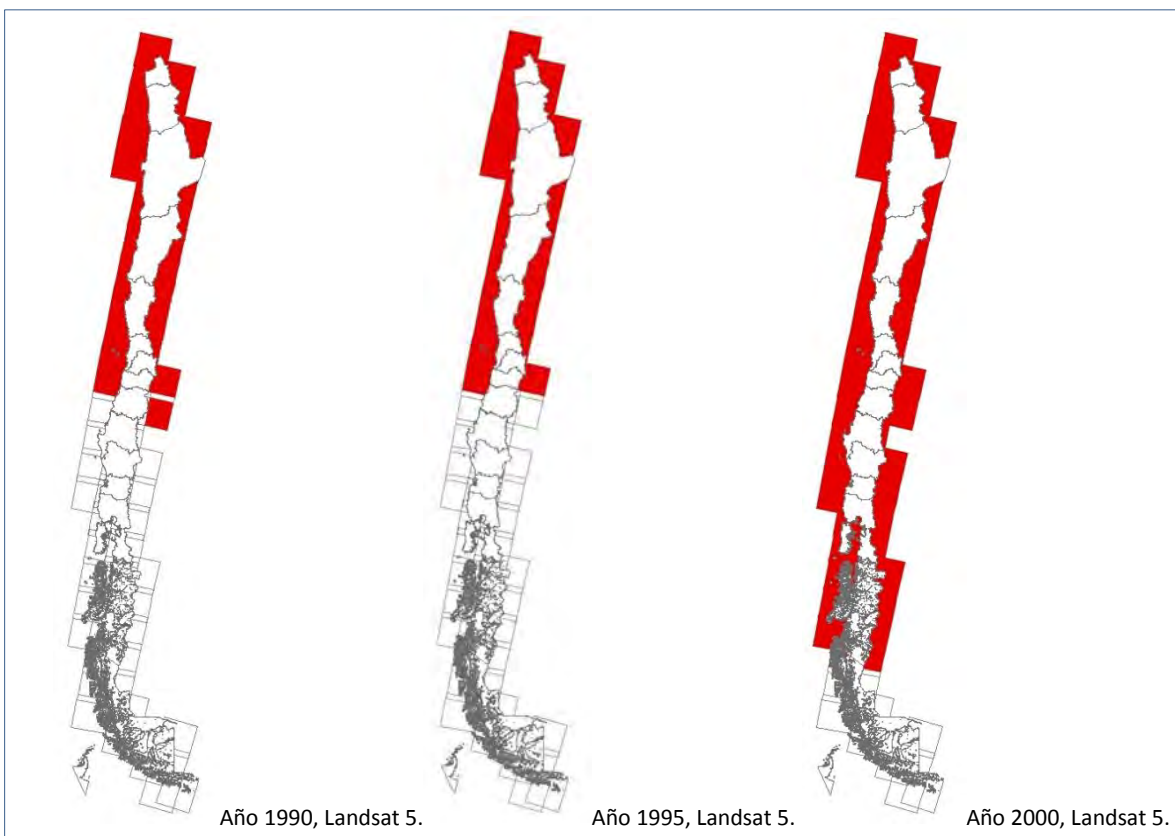
² No utilizadas en el presente proyecto.

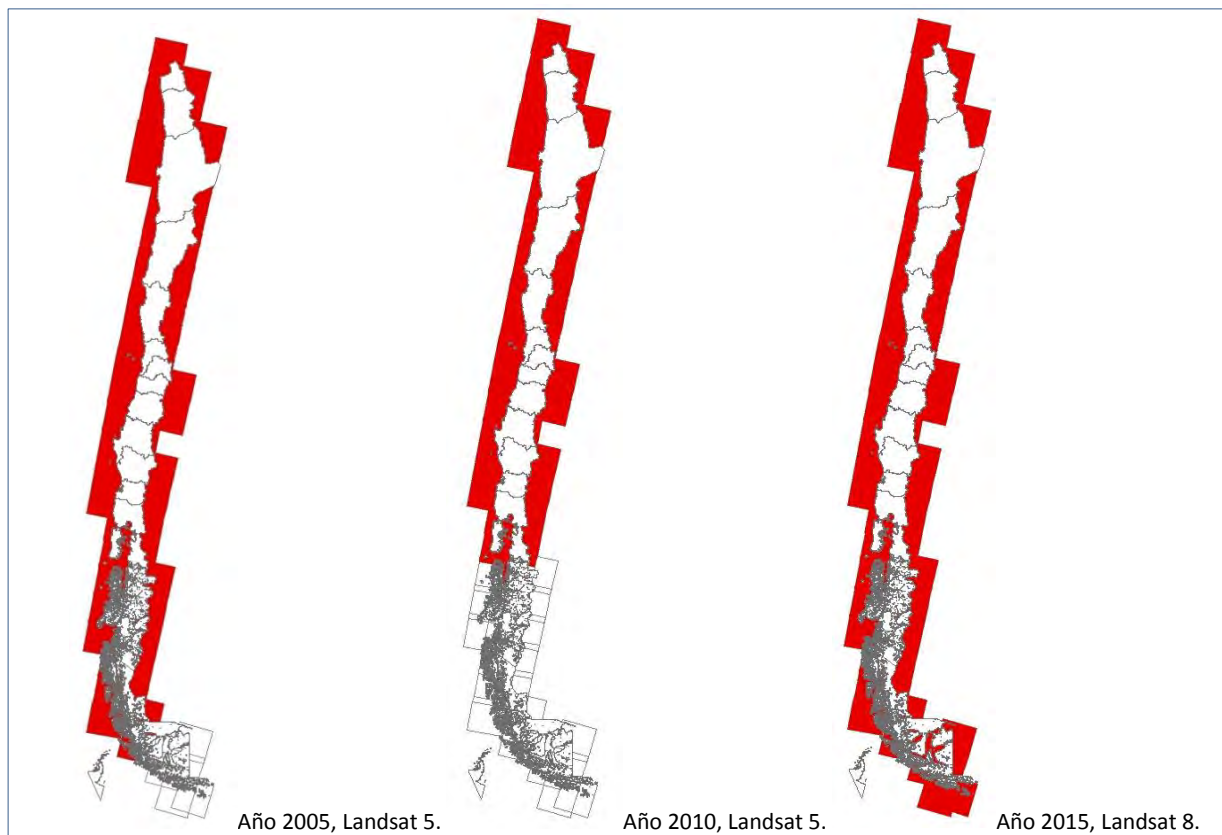
Tabla 7. Total de imágenes satelitales (Landsat) descargadas por año

| Año | Unidad | Año | Unidad |
|--------------|--------|------|--------------|
| 1990 | 79 | 2007 | 92 |
| 1995 | 42 | 2008 | 111 |
| 2000 | 315 | 2009 | 143 |
| 2001 | 466 | 2010 | 122 |
| 2002 | 410 | 2011 | 137 |
| 2003 | 301 | 2012 | - |
| 2004 | 119 | 2013 | 278 |
| 2005 | 222 | 2014 | 566 |
| 2006 | 119 | 2015 | 268 |
| TOTAL | | | 3.790 |

Fuente: CIT-UAI, 2015.

Figura 1. Mosaico de imágenes satelitales a nivel nacional





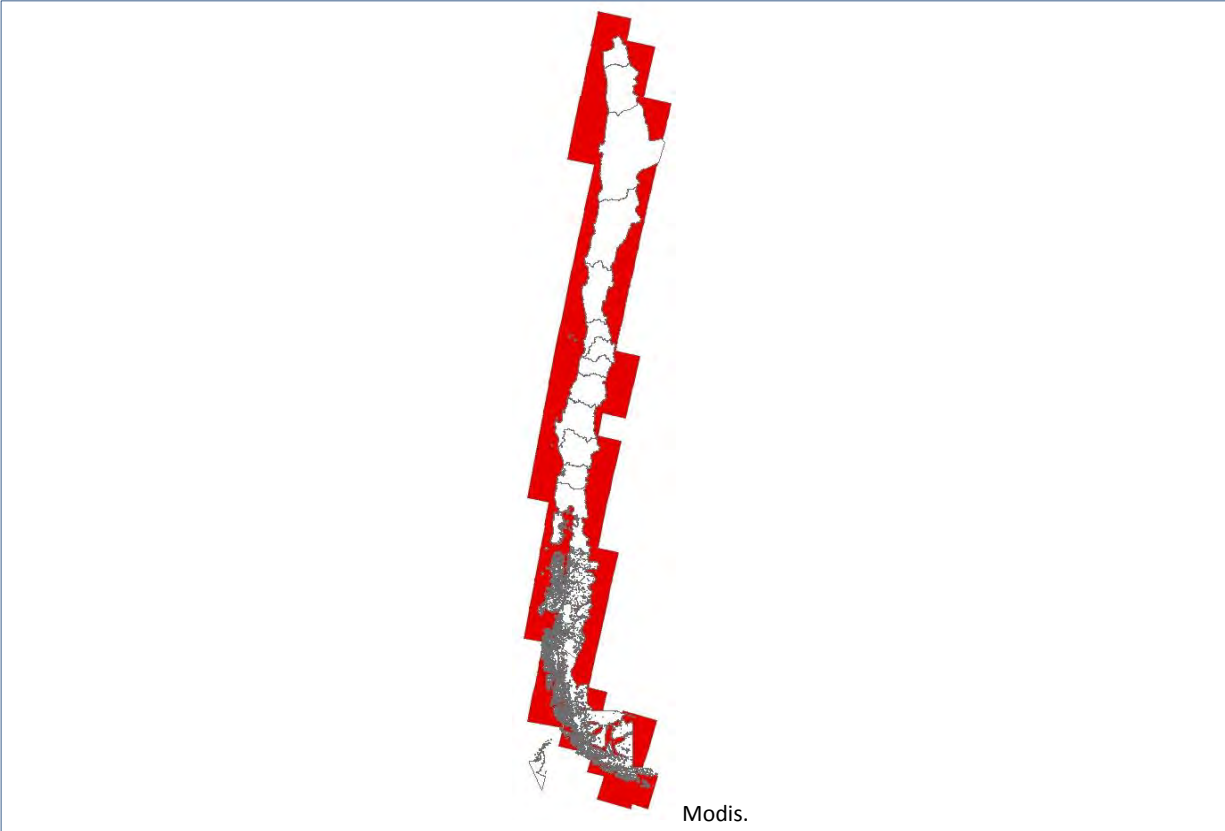
Fuente: CIT-UAI, 2015.

Tabla 8. Total de imágenes satelitales (Modis) obtenidas por año

| Año | Unidad |
|--------------|--------------|
| 2003 | 175 |
| 2004 | 228 |
| 2005 | 257 |
| 2006 | 191 |
| 2007 | 181 |
| 2008 | 177 |
| 2009 | 0 |
| 2010 | 180 |
| 2011 | 165 |
| 2012 | 107 |
| 2013 | 33 |
| TOTAL | 1.694 |

Fuente: CIT-UAI, 2015.

Figura 2. Mosaico de imágenes satelitales a nivel nacional



Fuente: CIT-UAI, 2015.

2. Pretratamiento de los insumos

Esta etapa es esencial para el desarrollo de la automatización en los procesos componentes de cada indicador ambiental. Se deben homologar todas las coberturas, en términos de formato y estructura lógica apta para un SIG, como también en términos de una correcta espacialización geográfica. De esta forma, el pre procesamiento de los insumos se encuentra compuesto por dos subetapas secuenciales. En la primera de estas subetapas se homologan los formatos de los insumos y se define la estructura lógica de la base de datos a generar, mientras que en la segunda se homologan los insumos satelitales en términos espaciales.

2.1 Homologación y sistematización de los insumos espaciales

El gran peso computacional de los datos masivos relacionado con el procesamiento de las imágenes satelitales, implica un alto nivel de complejidad en su tratamiento a escala nacional. El desarrollo de los formatos en que se puede almacenar, distribuir y procesar la información científica ha crecido desde las últimas décadas del milenio pasado, progresando a la par del desarrollo tecnológico y el uso de los SIG. Es por ello que es conveniente definir criterios que permitan simplificar la programación de los procesos involucrados en el tratamiento de la información. Para el presente estudio se ha determinado operar la información satelital en el formato nativo del software acordado en las bases (GRID, de ESRI), condicionando ciertas reglas en el tratamiento masivo de los datos procesados. No obstante, las coberturas con las variables físicas y los indicadores ambientales desarrollados tendrán el mismo formato que el de las imágenes satelitales usadas.

2.2 Homologación de formatos y estructura lógica de los datos

Las imágenes satelitales gratuitas entregadas a la comunidad por la USGS, también distribuidas por el INPE, así como también el MDE ASTER GDEM, son entregadas en formato TIFF (*Tagged Image File Format*), formato de gran flexibilidad y uso en los diferentes SIG. No obstante, las imágenes satelitales MODIS, como también sus diversos productos, entre ellos los compuestos de NDVI o la cobertura con el contenido de vapor atmosférico, son entregadas con la extensión HDF (*Hierarchical Data Format*), formato recomendado por la NASA³, otorgado gratuitamente desde su sitio web. La mayoría de las plataformas SIG disponibles no leen en forma correcta o directa el formato HDF, por lo que es necesario utilizar el programa HEG-EOS. Este software es capaz de procesar los archivos con el formato nativo de las imágenes MODIS, entregando las bandas espectrales, o sus productos, con una primera georreferenciación en formato GEOTIFF, tipo de formato TIFF utilizado comúnmente para distribuir, almacenar y procesar imágenes satelitales de media resolución espacial.

Con el fin de automatizar la cadena de procesos en la modelación de cada indicador, bajo las condiciones del software seleccionado para el presente estudio (*Model Builder*), se procedió a cambiar el nombre original de cada imagen satelital seleccionada. Las herramientas y modelos diseñados en *Model Builder* permiten nombres de archivos con solo 13 caracteres, mientras que el nombre original de cada imagen contiene 21 caracteres. Este inconveniente se solucionó definiendo un código único para cada imagen,

³ <http://newsroom.gsfc.nasa.gov/sdptoolkit/HEG/HEGHome.html>

que sustituiría al nombre original. En la Tabla 9 se resumen los criterios determinados para recrear el código único en cada imagen satelital de la familia Landsat.

Tabla 9. Criterios para formar el código único Landsat para cada imagen seleccionada

| Sensor satelital | Nombre original imagen | Descomposición nombre original | | | | | | Código único |
|------------------------|------------------------|--------------------------------|------|-----|------|-------------|--------|--------------|
| | | Sensor | Path | Row | Año | Día del año | Escena | |
| Landsat 5 (TM) | LT52320841995286CUB00 | LT5 | 232 | 084 | 1995 | 286 | CUB00 | L5328495286 |
| Landsat 7 (ETM) | LE70010722000258SGS00 | LE7 | 001 | 072 | 2000 | 258 | SGS00 | L7017200258 |
| Landsat 8 (OLI y TIRS) | LC82270972015082LGN00 | LC8 | 227 | 097 | 2015 | 082 | LGN00 | L8279715082 |

Fuente: CIT-UAI, 2015.

La descomposición del nombre original descrito en la Tabla 9 hace referencia al sensor del que proviene la imagen, un par de coordenadas planas del vuelo de la plataforma satelital (Path y Row), el año y el día del año en que fue obtenida cada imagen, además de información de la escena particular (excluida de la formación del código único). Mediante la transformación masiva de los nombres de los archivos de la base de datos generada, las bandas espectrales de cada imagen satelital seleccionada, se encuentran a un paso ser aptas para la sistematización en un SIG.

En el caso de imágenes Modis, el nombre se descompone en 5 partes separadas por puntos:

MOD14.A2007364.1805.005.2009047020343.hdf

La primera parte del nombre hace referencia a la plataforma (MOD cuando es Terra, MYD cuando es Aqua y MCD cuando son combinadas), el número hace referencia al tipo de producto global CMG "Climate Modeling Grid". Después del punto y la letra A, se indica la fecha de adquisición (año, día juliano), en el caso de la imagen de ejemplo esta fue tomada el día 364 del año 2007. Luego de esto, separado por un punto, se indica la hora y los minutos del inicio de la colecta de datos. Posteriormente aparece la versión de procesamiento o colección. Por último se indica la fecha de procesamiento (año, día juliano, hora, minuto y segundo), en el ejemplo se indica que esta fue procesada el año 2009, el día 47 de aquel año a las 02:03:43.

2.3 Marco espacial de análisis de los insumos satelitales. Corrección geométrica.

Con particular uso en el presente estudio, el marco espacial de análisis se entenderá como las definiciones y procesos espaciales preliminares al tratamiento directo de la información espectral en un SIG. Tanto la extensión del análisis espacial, como el sistema de referencia, la resolución espacial y los métodos de resamplado de cada insumo satelital, se deben definir antes de realizar cualquier tipo de procesamiento. La secuencia de pre procesos considerados se compone de:

- Extracción de pixeles sin información (valores NoData)
- Georreferenciación de cada banda espectral. Se determinó que el sistema de referencia sería el WGS 1984, Huso 19 S, UTM.

- Extracción de los píxeles con valores cero y saturados. Se encuentran relacionados con la resolución radiométrica de cada sensor. Los valores se resumen en la Tabla 10:

Tabla 10. Valores de píxeles dummit y saturados por cada sensor

| Sensor | Valor pixel <i>dummit</i> | Valor pixel saturado |
|-----------------|---------------------------|----------------------|
| Landsat 5 (TM) | 0 | 255 |
| Landsat 7 (ETM) | | |
| Landsat 8 (OLI) | | 65.535 |

Fuente: USGS y Metadata. CIT-UAI, 2015.

3. Tratamiento de los insumos cartográficos

Los insumos cartográficos oficiales, construidos y/o usados por alguna institución pública, son habitualmente utilizados como referencia espacial válida en análisis territoriales, manteniendo criterios de uso estadísticos, espaciales y morfométricos. No obstante, también se debe considerar en los análisis de series temporales, construidas en base a imágenes satelitales, o sus derivados, que las variaciones de los cuerpos y las coberturas naturales presentan comportamientos multicíclicos, modificando y marcando tendencias en los umbrales de los índices y variables físicas seleccionadas en el presente estudio. De esta manera, la utilización de los insumos cartográficos oficiales disponibles (con fuente oficial de distintas instituciones públicas) quedó ajustada a los criterios descritos en la Tabla 11, aspectos que son condicionantes para la construcción actual y futura de cada uno de los indicadores ambientales.

Tabla 11. Criterios para la selección de cuerpos a caracterizar por ambiente y cobertura.

| Ambiente | Insumos cartográficos | Criterio de uso para la construcción de indicadores |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bosques | Carta de Ocupación de la Tierra (Fuente: MMA) | Se utiliza la clase de uso del suelo “Bosque Nativo” como espacio muestral para la obtención de firmas espectrales. |
| | Coberturas vectoriales de Áreas Protegidas (AP) (Fuente: MMA) | Selección de AP: Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNASPE). Polígonos con superficie mayor a 270.000 m ² (300 pixeles imágenes Landsat). |
| Marino costero | Cobertura puntual Programa de Observación del Ambiente Litoral (Fuente: MMA) | No se pudo atribuir correctamente la información espacial con la tabulada, por lo que no fue incluida en el proceso. No obstante, se utilizaron los valores de referencia de algunas variables (Ca, SS, Tu). |
| Lacustre | Cobertura con lagos y lagunas (Fuente: MMA) | Polígonos con superficie mayor a 270.000 m ² (300 pixeles imágenes Landsat). |
| Glaciar | Inventario Nacional de Glaciares (Fuente: DGA) | Glaciares de Montaña, Glaciaretos y Campos de Hielo Polígonos con superficie mayor a 270.000 m ² (300 pixeles imágenes Landsat). |
| Urbano | Coberturas con manzanas urbanas (Fuente: INE, años 1992, 2002 y 2011) | Selección de ciudades con más de 100.000 habitantes, que presenten continuidad espacial en el periodo contemplado. |
| Humedales | Cobertura con los humedales del sector Alto Andino (Fuente: MMA) | Selección de humedales sobre los 3.000 msnm. Polígonos con superficie mayor a 270.000 m ² (300 pixeles imágenes Landsat). |

Fuente: CIT-UAI, 2015.

3.1 Obtención de radiancia y reflectancia

La comparación de fenómenos naturales a través del uso de imágenes satelitales de diferentes fechas o años, es un método de análisis espacial ampliamente difundido. Sin embargo, antes de obtener los índices y variables físicas de la serie de imágenes satelitales disponible, es necesario realizar la corrección radiométrica de las bandas espectrales, con el objetivo de normalizarlas temporalmente y volver continuo el tipo de dato almacenado en cada archivo.

Para las imágenes satelitales pertenecientes a las plataformas Landsat 5 y 7, misiones ya discontinuadas, existen los algoritmos y parámetros de corrección publicados y estandarizados para cada sensor (Chander *et al.*, 2009). De esta manera, a continuación solo se describen los algoritmos y parámetros de calibración radiométrica y de reflectividad para el sensor satelital activo a la fecha, Landsat 8. La homologación y adaptación de cada expresión para los otros sensores de la familia Landsat, se puede realizar directamente con ayuda de la información contenida en la Tabla 3 y la bibliografía citada (comparación del rango espectral de los sensores TM, ETM y OLI). La expresión utilizada para transformar a radiancia los valores digitales (DN) de las bandas espectrales de Landsat 8 fue⁴:

$$L_{\lambda} = M_L * Q_{cat} + A_L \quad (1)$$

En donde:

⁴ Fuente de algoritmos para transformación de DN a radiancia-reflectancia: http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php

L_λ = Radiancia espectral resultante (TOA)

M_L = Factor de re-escala multiplicativo radiancia (metadata)

A_L = Factor de re-escala aditivo radiancia (metadata)

Q_{cal} = Valor calibrado del pixel (DN)

Los valores digitales de las bandas espectrales del sensor OLI y TIRS, a diferencia de sus predecesores, pueden transformarse directamente a reflectancia espectral siguiendo la expresión:

$$\rho_\lambda = \frac{M_\rho * Q_{cal} + A_\rho}{\text{sen}(\theta_e)} \quad (2)$$

Siendo:

ρ_λ = Reflectancia resultante (TOA)

M_ρ = Factor de re-escala multiplicativo reflectancia (metadata)

A_ρ = Factor de re-escala aditivo reflectancia (metadata)

θ_e = Ángulo de elevación solar (°) (metadata)

3.2 Corrección topográfica

Usando los valores del azimut y la elevación solar, junto a los valores de la pendiente del terreno y su orientación, ambas obtenidas a través del procesamiento del MDE ASTER, fue posible encontrar el ángulo de incidencia de los rayos solares en la superficie. Esto se logró a través de la realización de un modelo de iluminación, usando la expresión dada por Colbi (1991):

$$\text{Cos}(i) = \text{Cos}(\theta_s)\text{Cos}(\theta_n) + \text{Sen}(\theta_s)\text{Sen}(\theta_n)\text{Cos}(\phi_s - \phi_n) \quad (3)$$

Donde:

$\text{Cos}(i)$ = Coseno ángulo de incidencia

θ_s = Ángulo cenital solar

θ_n = Pendiente de la superficie

ϕ_s = Azimut solar

ϕ_n = Orientación de la superficie

Considerando en la expresión (3) que la pendiente de la superficie es nula (superficie de referencia), entonces es posible aplicar el algoritmo de corrección topográfica C, propuesto por Teillet *et al.* (1982) a través de la expresión:

$$L_{\lambda\text{Corr}} = L_\lambda \left[\frac{\text{Cos}(v)+C}{\text{Cos}(i)+C} \right] \quad (4)$$

Con:

$L_{\lambda\text{Corr}}$ = Radiancia corregida

$\text{Cos}(v)$ = Coseno para una superficie horizontal

$C = \frac{b}{m}$, obtenido de la regresión lineal $L_\lambda = b + m\text{Cos}(i)$, usando mínimos cuadrados entre la radiancia o reflectancia, según corresponda, de cada banda espectral y el modelo de iluminación.

IV. DEFINICIONES Y CRITERIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE INDICADORES

Tabla 12. Resumen de las características de las variables e indicadores medio ambientales desarrollados⁵

| Ambiente | Nombre indicador ambiental | Expresión matemática indicador | Variables e índices ambientales | Variables físicas | Unidad variable física | Escala de análisis | Cobertura regional | Años del indicador | Frecuencia actualización del indicador | Satélites utilizados | Resolución espacial | Otros sensores | Temporada de las imágenes | Imágenes mínimas por año |
|----------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Bosques | Superficie anual cubierta por bosque nativo (SACBN) | $SACBN = \sum_{i=1}^{i=n} SCBN_i$ | Superficie cubierta por bosque nativo (SCBN) | Reflectividad VIS, NIR y SWIR NDVI | Km ² | Bosque Nativo a escala nacional al interior de las Áreas Protegidas del SNASPE | | | | Landsat | 30 metros | Modis Aster Hyperion | Estación húmeda y seca | Dos |
| | Vigor vegetacional anual del bosque nativo (VVABN) | $VVABN = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} NDVI_{BN_i}$ | Vigor vegetacional del bosque nativo (VVBN) | Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) | Adimensional | | | | | Landsat | | Modis Aster Hyperion | Estación húmeda y seca | Dos |
| | Superficie anual de bosque nativo incendiado (SABNI) | $SABNI = \sum_{i=1}^{i=n} SBNI_i$ | Superficie de bosque nativo incendiado (SBNI) | Normalized Burnt Ratio (NBR) | Adimensional | | | | | Landsat | | Modis Aster Hyperion | Estación húmeda y seca | Dos |
| Marino costero | Calidad anual del agua de mar superficial (CAAMS) | $CAAMS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} ICSA_i$ | Índice de calidad superficial del mar Agua (ICSA) | Clorofila a | Mg/m ³ | Bahías Y Efluentes determinados por el MMA y CIT | 1990: XV-VI 1995: XV-VI 2000: XV-XI 2005: XV-XII (50%) 2010: XV-X 2015: XV-XII | Periodo quinquenal entre 1990-2015 | Anual | Landsat | 30 metros | Modis Aster Hyperion | Una imagen por estación | Cuatro |
| | | Sólidos en Suspensión | | Mg/L | | | | | | | | | | |
| | | Turbidez | | Unidad Nefelométrica de Turbidez (UNT) | | | | | | | | | | |
| Lacustre | Eutrofización anual de la superficie lacustre (EASL) | $EASL = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} IEL_i$ | Índice de eutrofización lacustre (IEL) | Clorofila a | Mg/m ³ | Lagos y lagunas determinadas por el MMA y CIT | | | | Landsat | | Modis Aster Hyperion | Una imagen por estación | Cuatro |
| Glaciar | Superficie anual cubierta por cuerpos glaciares (SACCG) | $SACCG = \sum_{i=1}^{i=n} SCCG_i$ | Superficie cubierta por cuerpos glaciares (SCCG) | Normalized Difference Snow Index (NDSI) | Km ² | Glaciares de montaña Glaciarretes Campos de Hielo | | | | Landsat | | Modis Aster Hyperion | Finales de verano y principio de otoño (estaciones sin aporte de las primeras nevazones) | Dos |

⁵ La tabla muestra resumidamente los criterios considerados para la construcción de los indicadores respecto a la cobertura temporal y espacial en base a la disponibilidad de imágenes consideradas en el estudio.

CONSTRUCCIÓN DE INDICADORES AMBIENTALES NACIONALES A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES

| Ambiente | Nombre indicador ambiental | Expresión matemática indicador | VARIABLES e índices ambientales | VARIABLES físicas | Unidad variable física | Escala de análisis | Cobertura regional | Años del indicador | Frecuencia actualización del indicador | Satélites utilizados | Resolución espacial | Otros sensores | Temporada de las imágenes | Imágenes mínimas por año |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------|----------------------------------------|--------------------|--------------------|----------------------------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Urbano | Superficie anual promedio cubierto con vegetación por manzana urbana (SACVMU) | $PVMU_k = 100 \left(\frac{(\sum_{i=1}^n SCVMU_i)_k}{Sup_{MU_k}} \right)$ | Porcentaje cubierto con vegetación por manzana urbana (PCVMU) | Superficie de vegetación urbana | M ² | Ciudades con más de 100.000 habitantes | | | | Landsat | | Modis Aster Hyperion | Estación húmeda y seca | Dos |
| | Humedales | Superficie anual cubierta con vegetación en el humedal (SACVH) | $SACVH = \sum_{i=1}^n SCVH_i$ | Superficie cubierta con vegetación en el humedal (SCVH) | NDVI | Km ² | | | | Humedales Alto Andino | | Landsat | Modis Aster Hyperion | Otoño o primavera (debido a crecidas y desbordes en otras estaciones del año) |
| Superficie anual inundada en el humedal (SAIH) | | $SAIH = \sum_{i=1}^n SIH_i$ | Superficie inundada del humedal (SIH) | Normalized Difference Water Index (NDWI) | Km ² | Landsat | | | | | | Modis Aster Hyperion | Otoño o primavera (debido a crecidas y desbordes en otras estaciones del año) | Dos |

Fuente: CIT-UAJ, 2015.

1. Ambiente bosques

1.1 Marco contextual, definiciones y criterios determinados para la construcción del indicador

Según la Ley N°20.283 de Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal⁶, el bosque nativo corresponde a aquel “bosque formado por especies autóctonas, provenientes de generación natural, regeneración natural, o plantación bajo dosel con las mismas especies existentes en el área de distribución original, que pueden tener presencia accidental de especies exóticas distribuidas al azar”. Esta definición implica, desde un punto de vista de la Teledetección, que el bosque nativo no presentará una firma espectral característica, sino que corresponderá a una serie de firmas o una combinación de ellas, la que cambiará dependiendo de la situación geográfica que se caracterice. Además, su patrón y distribución territorial será dinámica, aumentando en complejidad de monitoreo en aquellos sectores que presenten una fuerte competencia en términos de cobertura espacial.

La dificultad para obtener la superficie cubierta por bosque nativo en aquellas zonas con intenso uso agrícola, silvícola y urbano, no hacen posible abordar su estimación superficial en los límites de tiempo del presente proyecto. Es más, aun quitando aquellos usos del suelo conflictivos, el abandono y la consecuente regeneración natural de la vegetación autóctona en las áreas cubiertas por formaciones competidoras (Bosque nativo/Praderas y matorrales), aumenta en grado de complejidad en los sectores más antropizados. No obstante, se ha diseñado un modelo capaz de obtener resultados satisfactorios al interior de las AP-SNASPE, zonas donde el estado de conservación de las coberturas naturales y su manejo a través del tiempo, permiten tener certeza del espacio muestral. De esta forma, el indicador que mide la superficie cubierta por bosque nativo basa su cobertura geográfica en la Carta de Ocupación de la Tierra (COT) (MMA, 2014) contenido por las AP-SNASPE, tal como se señala en la Tabla 11. Respecto a su cobertura temporal, esta es determinada según la descarga de imágenes detallada en el siguiente capítulo de resultados. Este procedimiento se utilizó para el año 2015, obteniéndose la superficie cubierta por bosque nativo para ese año. Este resultado se utilizó para construir una firma espectral característica del bosque nativo en las AP, en cada año anterior considerado en el presente estudio.

1.2 Variables y métodos usados en la caracterización del bosque nativo

El bosque nativo se caracterizó a través de la obtención de su superficie al interior de las AP-SNASPE, su vigor vegetacional y su superficie incendiada. Para ello se utiliza la reflectividad espectral de las bandas de las imágenes Landsat localizadas en la región visible (Blue, Green y Red), infrarroja cercana (NIR) y corta (SWIR). Siguiendo el criterio definido para la expresión (1), en términos de describir las fórmulas matemáticas de las variables solo para Landsat 8, en la Tabla 13 se exponen las equivalencias entre las bandas de Landsat 5, 7 y 8, además de MODIS, con el fin de permitir una adaptación simple y eficiente de cada expresión en el caso de ser necesario.

Se utilizó el NDVI para caracterizar el comportamiento fenológico y espacial del bosque nativo, mientras que el NBR se usó para determinar la superficie cubierta por bosque nativo incendiado. Ambos índices fueron calculados al interior de las AP-SNASPE presentes en el territorio nacional.

⁶ Ley N°20.238 sobre Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal, promulgada el 11 de julio del año 2008 por el Ministerio de Agricultura. Disponible en: <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=274894>.

Luego de realizar numerosas pruebas con diferentes métodos de clasificación para las distintas clases de uso del suelo, entre ellos, modelos de regresión lineales y no lineales, así como también métodos basados en el agrupamiento muestral o en la clasificación supervisada y no supervisada, se optó por un modelo basado en la clasificación supervisada del bosque nativo, en el que la automatización requiere de un tratamiento previo, llevado a cabo por un operador calificado y con experiencia en muestreo espacial y Teledetección.

1.2.1 Bandas espectrales usadas en la obtención de los indicadores del bosque nativo

Se seleccionaron aquellos rangos del espectro electromagnético que permitiesen obtener la mayor cantidad de información del comportamiento superficial terrestre en cada escena (Tabla 13). También se tomó en cuenta la adaptabilidad espectral de cada indicador propuesto, a las nuevas generaciones de sensores satelitales, las que en su mayoría se centran en la región visible y del infrarrojo cercano. La precisión de cada rango espectral se puede apreciar a continuación.

Tabla 13. Rangos y bandas espectrales para cada sensor considerado

| Nombre rango espectral | Bandas espectrales Landsat 5 y 7 | Bandas espectrales Landsat 8 | Bandas espectrales MODIS |
|------------------------|----------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| Blue | B1 | B2 | B3 |
| Green | B2 | B3 | B4 |
| Red | B3 | B4 | B1 |
| NIR | B4 | B5 | B2 |
| SWIR 1 | B5 | B6 | B6 |
| SWIR 2 | B7 | B7 | B7 |

Fuente: CIT-UAI, 2015.

1.2.2 Índice vegetal utilizado: NDVI

El NDVI se calculó utilizando la expresión (5), adaptada para la reflectividad corregida topográficamente de las bandas espectrales de Landsat 8:

$$NDVI = \frac{(\varphi_5 - \varphi_4)}{(\varphi_5 + \varphi_4)} \quad (5)$$

Siendo φ_4 y φ_5 son las reflectividades corregidas de las bandas 4 y 5 del sensor OLI. El NDVI recorre el intervalo [-1, 1], encontrándose a la vegetación con valores desde 0,2, aunque en zonas áridas tiende a ser más bajo (Van der Gried & Owe, 1995).

1.2.3 Firma espectral y método de clasificación

Las firmas espectrales, en Teledetección satelital, corresponden a los espectros de absorción, transmisión y/o reflexión de la luz incidente en la superficie terrestre. Su amplia y difundida implementación se sustenta en las hipótesis de que cada sustancia tiene una firma única y que cada firma caracteriza a solo una sustancia. No obstante, surgen problemas en la separación o distinción entre las firmas espectrales, debido a la mezcla y diversidad de materiales que cubren los diversos tipos de superficie. Además, la

heterogeneidad u homogeneidad de la superficie terrestre observada, también depende de la escala de análisis y la resolución espacial de los sensores satelitales.

El avance de la Espectroscopia, principalmente mediante trabajos en terreno, laboratorio y Teledetección, ha permitido establecer comportamientos espectrales definidos, entre ellos, las firmas de las diversas coberturas vegetacionales, así como también el comportamiento espectral de los distintos tipos de suelo y sustancias (minerales, agua, hielo, etc.). Se ha podido establecer un conjunto de bandas espectrales determinadas para la caracterización de los distintos tipos de superficies. De esta forma, se ha podido establecer que la vegetación presenta una *alta absorción en el rango visible* del espectro (clorofila) y una *alta reflectividad de la energía en el rango espectral del NIR*.

El proceso de obtención de las firmas espectrales de las diversas clases de uso de suelo, al interior de las AP-SNASPE, se desarrolló en dos etapas paralelas. En la primera de ellas se crearon puntos al azar sobre la clase de bosque nativo, los que fueron atribuidos con los valores de NDVI correspondientes a su localización geográfica. Los valores extraídos del NDVI para cada punto, fueron utilizados para realizar un filtrado estadístico y geoestadístico de la muestra creada (señaladas en el párrafo siguiente), obteniendo una submuestra representativa para la construcción de la firma espectral del bosque nativo. A su vez, en la segunda etapa se generaron puntos al azar sobre los polígonos correspondientes a las demás clases de uso del suelo contenidas en las AP-SNASPE. En ambas etapas se consideró un distanciamiento mínimo de 50 metros, contemplando al menos 1.000 observaciones por cada Área Protegida.

El filtro estadístico de la submuestra correspondiente al bosque nativo se basó en la estandarización del NDVI extraído para cada punto generado al azar. No obstante, antes se seleccionaron aquellos registros con valores del NDVI mayores que 0,2, debido a que en las pruebas realizadas se constató que la vegetación arbórea natural siempre se encontraba sobre ese valor. La estandarización de la submuestra se realizó mediante la aplicación del z-score (z), parámetro estadístico útil para seleccionar las observaciones con comportamiento normal y centrado en la media, como resulta ser el caso de las superficies naturales. La expresión utilizada fue la siguiente:

$$z = \frac{(\overline{NDVI} - NDVI_i)}{\sigma_{NDVI}} \quad (6)$$

Donde:

$NDVI_i$ = Valor del NDVI correspondiente al pixel i

\overline{NDVI} = Valor promedio del NDVI

σ_{NDVI} = Valor desviación estándar del NDVI

Se escogió para el filtrado de la muestra relativa al bosque nativo un rango para el z-score de $-2 < z < 2$, en correspondencia a las condiciones de certeza estadística y espacial utilizados en geoestadística.

Una vez realizado el filtro basado en el comportamiento estadístico del NDVI, se procedió a seleccionar aquellos puntos que formaban agrupamientos espaciales, definidos por reglas topológicas de vecindad. Para el análisis geoestadístico se consideró como métrica, o distancia entre los elementos en el espacio, a

la norma euclidiana con un radio de vecindad de 500 metros. Esta labor fue realizada utilizando la herramienta de ArcGis llamada *Cluster and Outlier Analyst (Spatial Statistics Tools)*, basada en la adaptación local propuesta por Anselin (1995) del índice I de Moran. La herramienta entrega como resultado el índice geoestadístico para cada registro y una clasificación de agrupamiento espacial propuesta para la muestra, junto a otros parámetros del test estadístico realizado. Se trabajó con la categoría de agrupamiento compuesta por aquellos *clúster* de registros con valores altos de NDVI, en relación a cada una de sus vecindades (categoría HH, según los resultados entregados por la herramienta de ArcGis).

El método de clasificación seleccionado correspondió a una clasificación supervisada de cada celda, usando como criterio la máxima probabilidad de semejanza con las celdas adyacentes. A través del uso de las clases determinadas por las firmas espectrales del bosque nativo, y de las otras clases de uso del suelo contenidas por las AP-SNASPE, se pudo comparar y clasificar el comportamiento espectral de cada pixel, tomando como referencia un conjunto de bandas escogidas (ver Tabla 13).

Para obtener las firmas espectrales se utilizó la herramienta llamada *Create Signatures (Spatial Analyst Tools)*, usando como insumos a la cobertura de usos del suelo (COT-MMA, 2014) y la cobertura de puntos generados al azar, previamente atributada con el NDVI, además de filtrada estadísticamente y geoestadísticamente. La clasificación se realizó utilizando al COT como sitios de entrenamiento, sobre los que se realizó un muestreo aleatorio del tipo de cobertura. El proceso fue llevado a cabo con la herramienta llamada *Maximum Likelihood Classification (Spatial Analyst Tools)*, de ArcGis, la que necesita como insumos a las bandas espectrales caracterizadas en la Tabla 3 y en la Tabla 13, así como también a la cobertura con los usos de suelo (o sitios de entrenamientos previamente cartografiados) y el archivo creado con las firmas espectrales.

1.3 Indicadores ambientales contruidos para el bosque nativo

Se construyeron tres indicadores para caracterizar el estado de los bosques nativos incluidos en el SNASPE, y que cumpliesen con las condiciones espaciales y estadísticas. El primero de ellos, y base de los siguientes, corresponde a la superficie cubierta por bosque nativo al interior de las AP-SNASPE. El segundo indicador se obtuvo mediante estadísticas zonales del NDVI, usando como referencia la variable construida para el primer indicador y las zonas definidas por las AP-SNASPE seleccionadas. El tercer indicador construido para el bosque nativo se construyó de manera similar al segundo indicador, utilizando como variables a la superficie cubierta por bosque nativo y al NBR. A continuación se detalla la estructura metodológica, junto a los procesos y parámetros utilizados en su construcción.

1.3.1 Superficie anual cubierta por bosque nativo

La automatización de la obtención de la superficie cubierta por el bosque nativo de las AP-SNASPE, se definió utilizando la herramienta de clasificación supervisada, *Maximum Likelihood Classification* de ArcGis. El método no cuenta con una expresión matemática formal, debido a que se encuentra basada en los principios de normalidad y el teorema de Bayes, asumiendo que las celdas en cada clase determinada

por las firmas espectrales, siguen una distribución normal en un espacio multidimensional sobre el que se pueden realizar inferencias bayesianas.

La automatización de los procesos involucrados fue posible al uso de las posibilidades que ofrece el módulo de programación gráfica de ArcGis, *Model Builder*, en el que es posible diseñar herramientas que involucren geoprocesos multidimensionales, basados en parámetros como el vector de medias y la matriz de covarianzas para la decisión probabilística de cada clase. De esta forma, la superficie cubierta por bosque nativo (SCBN) se obtuvo integrando los siguientes procesos en la consola de programación:

SCBN:

- **Muestreo espacial:** Creación de coberturas con puntos al azar, contenidos en el interior de las AP-SNASPE y segmentados por clase de uso de suelo definida (COT o sitios de entrenamiento).
- **Creación de firmas espectrales:** Determinación de las clases de uso de suelo, a partir de la descripción estadística de las clases a caracterizar (vector de medias y matriz de covarianza).
- **Clasificación supervisada:** Aplicación del algoritmo *Maximum Likelihood Classification*, obteniendo una cobertura raster con la clasificación de los usos de suelo al interior de las AP-SNASPE.
- **Selección y exportación:** Se selecciona la clase con el uso de suelo relativo al bosque nativo y se exporta la información al formato definido previamente para los indicadores.

El método se aplicó a cada escena seleccionada para la obtención del bosque nativo. Se plantea que el indicador obtenido debe estar formado por al menos dos coberturas generadas en distintas estaciones del año. La expresión matemática del indicador corresponde a la unión espacial de todas las coberturas generadas por año.

$$SACBN = \bigcup_{i=1}^{i=n} SCBN_i \quad (7)$$

Considerando que:

$SACBN$ = Cobertura con la superficie anual cubierta por bosque nativo

$SCBN_i$ = Cobertura i del año con la superficie cubierta por bosque nativo

A partir de la cobertura con la SACBN es posible obtener directamente el indicador para cada una de las AP-SNASPE, utilizando las herramientas de estadísticas zonales de ArcGis u otro SIG.

1.3.2 Vigor vegetacional anual del bosque nativo

El segundo indicador medio ambiental desarrollado para la caracterización del bosque nativo, corresponde a la medida del vigor vegetacional promedio (concepto definido en el glosario), a lo largo de un año, del bosque nativo contenido por las AP-SNASPE. Para ello se utilizan las coberturas con la superficie anual cubierta por bosque nativo y el NDVI (expresión (5)). Éste índice vegetacional corresponde a una medida relativa del verdor o vigor de la vegetación contenida en las celdas de cada imagen satelital.

Se utilizó la misma cobertura con el NDVI, usado como referencia en el filtro estadístico y geoestadístico del muestreo aleatorio espacial realizado en la obtención de la SACBN. A las coberturas con el NDVI se les extrajo los pixeles correspondientes al bosque nativo (herramienta *Extract by Mask*, de ArcGis), obteniendo la medida del vigor vegetacional para cada celda contenida en las imágenes satelitales consideradas en un año. La formulación matemática del indicador del vigor vegetacional anual del bosque nativo es:

$$VVABN = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} NDVI_{BN_i} \quad (8)$$

Donde:

$VVABN$ = Cobertura con el vigor vegetacional anual promedio del bosque nativo

$NDVI_{BN_i}$ = Cobertura i del año con el NDVI para celda cubierta con bosque nativo

Al igual que en el indicador SACBN, se recomienda que la construcción del VVABN considere al menos dos imágenes satelitales por año, obtenidas en diferentes estaciones del año a caracterizar. A partir de la cobertura con el VVABN es posible obtener directamente el indicador para cada una de las AP-SNASPE, utilizando las herramientas de estadísticas zonales de ArcGis u otro SIG.

1.3.3 Superficie anual del bosque nativo incendiada

El tercer indicador escogido para la caracterización del bosque nativo fue la superficie de bosque nativo incendiado al interior de las AP-SNASPE. Para ello se utilizan dos variables, la superficie cubierta por bosque nativo y el NBR. El índice espectral seleccionado permite distinguir aquellos pixeles que presentan un alto contraste de reflectividad en la región del infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR). Debido al rápido incremento de la reflectividad en el SWIR, en relación a la región del espectro más cercano al rango visible, característico en el comportamiento de la vegetación tras un incendio, el índice resulta útil para detectar aquellos pixeles que presenten un aumento en el SWIR y una disminución en el NIR.

Aunque las técnicas para detectar los pixeles con bosque nativo quemado son variadas, se pueden dividir en dos grandes grupos, las unitemporales y las multitemporales. Las técnicas unitemporales se basan en el análisis de una sola imagen, posterior al incendio, mientras que las técnicas multitemporales se basan en la comparación de imágenes antes y después de cada incendio. Debido a los errores de omisión y la complejidad al extraer los pixeles incendiados con distintas intensidades, como también cuando se analizan diferentes tipos de vegetación, se ha optado por una técnica multitemporal para la obtención de la superficie de bosque nativo incendiada. Para ello se utilizó la diferencia del NBR entre dos años consecutivos, determinada por la expresión:

$$Dif_{NBR} = NBR_t - NBR_{t-1} \quad (9)$$

En donde Dif_{NBR} es la diferencia del NBR entre dos años consecutivos a un incendio y NBR_t es el valor del índice para el año del incendio, o posterior. Debido a que el NBR recorre el intervalo $[-1, 1]$, la diferencia definida en la expresión (9) se encontrará determinada en el intervalo $[-2, 2]$. Mediante la clasificación

según los rangos determinados por la Dif_{NBR} , es posible determinar la superficie cubierta por las celdas incendiadas del bosque nativo. Comúnmente, el rango en el que se encuentran los píxeles con alta probabilidad de representar vegetación incendiada se centra en torno a diferencias nulas. La superficie de bosque nativo incendiado para cada imagen satelital se obtuvo mediante la expresión:

$$SBNI = Dif_{NBR}, \text{ con } -0.1 < Dif_{NBR} < 0.1 \quad (10)$$

El rango de la diferencia del NBR se debe adaptar a cada situación geográfica y tipo de vegetación caracterizada. De esta forma, la fórmula matemática para obtener el indicador con la superficie anual del bosque nativo incendiada se definió como:

$$SABNI = \bigcup_{i=1}^n SBNI_i \quad (11)$$

Debido a los años seleccionados para caracterizar a los indicadores medio ambientales construidos, quinquenios entre el año 1990 y el año 2015, solo se han obtenido las variables necesarias para calcular las expresiones (10) y (11), dejando la estimación del indicador sólo para dos áreas en donde se tenía claridad espacial de incendios efectivos (zonas y fechas). De esta forma se realizó el cálculo para la zona de China muerta y Conguillío, tomando en consideración imágenes Landsat 8 de 2014 y 2015 (antes y después del incendio respectivamente)

1.3.4 Obtención de Tendencias en Áreas Protegidas

Además de los indicadores señalados para el ambiente de bosques, obtenidos a través de la utilización de Landsat, se realizó un cálculo de las tendencias anuales del NDVI de las áreas protegidas a nivel nacional, a través del uso del sensor Modis.

Los procesos considerados para llevar a cabo la definición de las tendencias en áreas protegidas son: extracción de componente NDVI de los archivos HDF; corte a través de máscara nacional; creación de mosaicos anuales a nivel nacional y cálculo de promedios de NDVI a través de máscaras de áreas protegidas.

2. Ambiente marino costero

2.1 Marco contextual, definiciones y criterios determinados para la construcción del indicador

Desde el punto de vista de la Teledetección, las características espectrales del agua hacen que ciertas propiedades de la misma sean fácilmente identificables. Los principales parámetros indicativos de la calidad del agua y sencillos de caracterizar mediante Teledetección son: turbidez, sólidos en suspensión y clorofila a, que han demostrado ser los que principalmente influyen en la respuesta espectral del agua en este tipo de medios.

En cuanto a la normativa nacional, el Decreto 90 del año 2001⁷, que establece las normas de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales, define los límites máximos permitidos para la descarga de residuos dentro de la zona de protección litoral y fuera de esta, entre los cuales se indican los sólidos en suspensión. También se señala la correlación entre el contaminante de control y clorofila a, la que es específica de las algas.

El indicador construido se caracterizó espacialmente para los sitios de interés definidos por el MMA en conjunto con el equipo consultor, definidos en base a la localización de los puntos de descarga de residuos de un grupo de centrales termoeléctricas y algunas localidades del litoral central –Quintero, Concón, Algarrobo, El Quisco, El Tabo, Las Cruces–. Si bien el indicador se calculó para las zonas mencionadas, en sí el indicador está disponible para calcularlo en todo el litoral nacional. A través de mediciones y pruebas realizadas en distintos tipos de efluentes y zonas de descarga de las centrales termoeléctricas, se ha determinado como cobertura geográfica un área de influencia definida por la proyección de una circunferencia de radio igual a 2,5 km, medido desde el punto de descarga hacia el mar.

A continuación se entregan detalles de las variables consideradas en la construcción del indicador medio ambiental.

2.2 Variables componentes del indicador: Clorofila a, Sólidos en suspensión y Turbidez.

Las variables utilizadas para la construcción del indicador medio ambiental relativo a la calidad superficial del agua del mar, fueron escogidas debido a que sus concentraciones espaciales son ampliamente usadas como insumos de entrada en modelaciones de distintas disciplinas, realizadas diversas situaciones geográficas. La clorofila a es uno de los principales pigmentos fotosintéticos que participan en la transformación de la energía solar en energía química, formado parte de la sustancias orgánicas a la deriva en la superficie del mar. A su vez, los sólidos en suspensión indican la concentración de la materia en suspensión o disolución en los diversos cuerpos de agua. En íntima relación se encuentra la turbidez superficial del agua del mar, debido a que se encuentra generada por el movimiento de la materia insoluble, en suspensión o en proceso de disolución coloidal. Dentro de los modelos que se presentan a continuación, se indica que los indicadores y los resultados obtenidos y expuestos en este informe fueron construidos en base al modelo 1 de cada variable, sin embargo, los tres modelos expuestos muestran resultados igualmente satisfactorios para la construcción del indicador marino costero.

La gran diversidad de las situaciones geográficas en las que existe el interés por conocer las condiciones de la calidad superficial del agua, ha incrementado el conocimiento desarrollado en la temática. El aporte de la Teledetección ha permitido incluir en el presente estudio tres modelos de cada variable incluida, con el fin de poder adaptar el indicador construido a la mayor cantidad de contextos ambientales. Es más, se han incluido entre ellos modelos desarrollados con expresiones de diferente naturaleza matemática (modelos de regresión lineales y no lineales), aumentando la flexibilidad y capacidad de adaptación del

⁷ Decreto 90, establece Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales, promulgada el 30 de mayo del año 2000 por el Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Disponible en: <http://www.leychile.cl/N?i=274894&f=2008-07-30&p=>.

indicador. A continuación se exponen los modelos y métodos desarrollados para obtener las variables en el ambiente marino costero

2.2.1 Modelos y métodos seleccionados para obtener la clorofila a

La estimación de la clorofila a fue llevada a cabo siguiendo los resultados de las investigaciones de Polvorinos et al. (2001), Fernández-Palacios et al. (1997) y Doña et al. (2009), basadas en datos de campaña y realizadas en diferentes contextos geográficos. Se utilizan diferentes regiones espectrales recorridas por los sensores de la familia Landsat y MODIS, relacionándolas a través de formas lineales y no lineales, simples y múltiples. Cabe destacar que los parámetros utilizados en las expresiones matemáticas de los modelos seleccionados son solo referenciales, ya que necesitan ser corregidos con información local levantada en terreno.⁸

La situación geográfica de la primera de las investigaciones se centra en aguas poco profundas, localizadas en el embalse de Aracena, Sevilla, España, marcada con un régimen estacional que condiciona los ciclos de estratificación en el embalse. La segunda investigación corresponde a una metodología desarrollada para la zona litoral de la provincia de Huelva, Andalucía, España, compuesta por zonas arenosas y de marismas. La tercera investigación se encuentra centrada en la comparación del estado trófico de lagos de Madrid y Valencia.

- Modelo 1

El método seguido por Polvorinos *et al.* (2001) para estimar la concentración de clorofila a incluye las bandas 3 y 4 de los sensores de las plataformas satelitales Landsat 5 y 7. En este trabajo solo se incluye su adaptación al sensor OLI de Landsat 8. La expresión y los parámetros utilizados fueron:

$$Ca = -3,533 + 0,455L_4 + 0,321L_5 \quad (12)$$

Donde:

C_a = Clorofila a (mg/m^3)

L_4 = Radiancia banda OLI4

L_5 = Radiancia banda OLI5

- Modelo 2

La metodología propuesta por Fernández-Palacios et al. (1997) es la que considera la mayor cantidad de bandas espectrales, en orden con su intento de abarcar una región más extensa del espectro con un algoritmo generalizado:

$$Ca = -206,318 + 3,747L_2 + 3,014L_3 - 2,253L_4 + 4,657L_6 + 3,732L_7 \quad (13)$$

Con L_i = Radiancia bandas OLI ($i = 2,3,4,6,7$)

⁸ La cobertura espacial del indicador desarrollado en el presente estudio se detalla en la Tabla 12.

- Modelo 3

El tercer método, propuesto por Doña *et al.* (2009), encuentra buenos resultados con una expresión no lineal usando la reflectividad corregida atmosféricamente de la banda TM2 de Landsat 5, adaptándose para Landsat 8 con la expresión:

$$Ca = \sqrt[3]{0,73\rho_3 + 0,88} \quad (14)$$

Considerando que ρ_3 es la reflectividad de la banda 3 del sensor OLI.

2.2.2 Modelos y métodos seleccionados para obtener los sólidos en suspensión

La estimación de los sólidos o material particulado en suspensión fue llevada a cabo siguiendo los resultados de las investigaciones de Fernández-Palacios *et al.* (1997), Polvorinos *et al.* (2001) y Onderka & Pekárová (2008). La última investigación se realizó en las aguas profundas del río Danubio, que pasan por las ciudades de Bratislava, Medvedov y Komárno, Eslovaquia. Las expresiones utilizadas fueron las siguientes:

- Modelo 1

La metodología propuesta por Fernández-Palacios *et al.* (1997) incluye la expresión lineal que combina las bandas 3 y 4 del sensor OLI:

$$SS = -8,093 + 0,278 L_3 + 0,429 L_4 \quad (15)$$

En Donde:

SS = Sólidos en suspensión (mg/L)

L_3 = Radiancia banda OLI3

L_4 = Radiancia banda OLI4

- Modelo 2

El método seguido por Polvorinos *et al.* (2001) es el que considera la mayor cantidad de bandas espectrales:

$$SS = 33,703 - 1,179 L_2 + 3,243 L_4 + 1,577 L_5 \quad (16)$$

Con:

L_i = Radiancia bandas OLI ($i = 2,4,5$)

- Modelo 3

El último método para estimar a los SS, desarrollado por Onderka & Pekárová (2008), solo considera la radiancia de la banda OLI4:

$$SS = 4,197L_4 - 42,86 \quad (17)$$

2.2.3 Modelos y métodos seleccionados para obtener la turbidez

La estimación de la turbidez se realizó mediante las investigaciones de Fernández-Palacios et al. (1997), Polvorinos et al. (2001) y Bustamante et al. (2005), esta última realizada en las marismas de Doñana, Andalucía, España, en las cercanías de la pluma de descarga del río Guadalquivir. Las expresiones fueron las siguientes:

- Modelo 1

La metodología propuesta por Fernández-Palacios et al. (1997) incluye los siguientes parámetros:

$$Tu = -8,20 + 0,266 L_3 + 0,716L_4 + 0,094L_5 \quad (18)$$

En Donde:

Tu = Turbidez (Unidad Nefelométrica de Turbidez, UNT)

L_i = Radiancia bandas OLI ($i = 3,4,5$)

- Modelo 2

El método seguido por Polvorinos et al. (2001) sigue la expresión:

$$Tu = -159,176 + 4,538L_2 + 3,351L_4 - 2,042L_6 + 3,153L_7 \quad (19)$$

Con L_i = Radiancia bandas OLI ($i = 2,4,6,7$)

- Modelo 3

El último modelo para predecir la turbidez del agua en un pixel inundado incluye las bandas OLI3, OLI4 y OLI7, propuesto por Bustamante et al. (2005) para el sensor TM, consistente en la expresión no lineal:

$$\text{Log}(Tu + 0,01) = 2,30 - 2,55 \times 10^{-4} \rho_3 + 6 \times 10^{-4} \rho_4 - 2,31 \times 10^{-4} \rho_7 \quad (20)$$

2.2.4 Normalización de las variables físicas

Para realizar la normalización de las variables físicas obtenidas, paso previo para la construcción del indicador medio ambiental relativo a la calidad del agua del mar, se optó por el método basado en los valores máximos y mínimos de cada variable, relativos a las áreas de influencia determinadas para cada sector a caracterizar. La expresión utilizada traslada a las variables al intervalo [0, 1], ejemplificada a continuación con la clorofila a:

$$\widehat{Ca} = \frac{Ca - Ca_{min}}{Ca_{max} - Ca_{min}} \quad (21)$$

Siendo \widehat{Ca} la clorofila a normalizada, se aplicó la expresión (21) a los sólidos en suspensión y a la turbidez, normalizando a ambas variables. A partir de ellas fue posible realizar la construcción del indicador, relativo a la calidad superficial del agua de mar.

2.3 Calidad anual del agua del mar superficial

Utilizando las variables normalizadas se procedió a obtener un índice para cada imagen satelital considerada, que entregase la calidad superficial del agua marina para diferentes fechas. Se diseñó el Índice de calidad superficial del agua (ICSA), consistente en el promedio, celda a celda, de la clorofila a, los sólidos en suspensión y la turbidez normalizadas. La expresión para la obtención del ICSA fue:

$$ICSA = \frac{1}{3} [\widehat{Ca} + \widehat{SS} + \widehat{Tu}] \quad (22)$$

Promediando los valores obtenidos del ICSA en diferentes fechas del año, se obtuvo el indicador medio ambiental referente a la calidad anual del agua de mar superficial (CAAMS). Su formación matemática se definió como:

$$CAAMS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} ICSA_i \quad (23)$$

El CAAMS fue normalizado siguiendo la expresión (22), segmentándose espacialmente en clases con el método de quiebres naturales, debido a que a través de su uso se maximiza la varianza intergrupala y se minimiza la varianza intragrupal, según el número de clases definidas. De esta forma, se obtuvieron cinco clases del indicador, compuestas por una CAAMS: Muy baja, Baja, Regular, Alta y Muy alta.

3. Ambiente lacustre

3.1 Marco contextual, definiciones y criterios determinados para la construcción del indicador

El estado trófico de las aguas superficiales continentales es definido en el Decreto 122 del año 2010⁹ y en el Decreto 19 del año 2013¹⁰ como “la calidad del cuerpo de agua representado por el nivel de productividad biológica determinada por la concentración de nutrientes y los factores físicos y químicos que éste presente”. Para la protección de las aguas y para la mantención del estado trófico de los lagos Llanquihue y Villarrica específicamente, se establecen los niveles de calidad de clorofila la que, como se señaló anteriormente, corresponde a uno de los principales pigmentos fotosintéticos que participan en la transformación de la energía solar en energía química. Como parámetro normativo a considerar a futuro, dado que los resultados de los indicadores de este estudio deben calibrarse con datos en terreno, para la zona pelagial del lago Villarrica se establecen como parámetros un promedio anual de $\leq 3 \mu\text{g/l}$ y como máximo $\leq 6 \mu\text{g/l}$, mientras que para las distintas áreas de vigilancia del lago Llanquihue se define un nivel de $1,4 \mu\text{g/l}$.

3.2 Variables componentes del indicador: superficie lámina de agua y grado de eutrofización.

Se utilizaron dos variables base para la obtención del indicador medio ambiental, la superficie de la lámina de agua de los lagos y lagunas estudiados, junto a la clorofila a, variable asociada a la cuantificación de la

⁹ Decreto 122, establece Normas Secundarias de Calidad Ambiental para la Protección de las Aguas del Lago Llanquihue, promulgado el 17 de noviembre del año 2009 por el Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Disponible en: <http://www.leychile.cl/N?i=1014239&f=2010-06-04&p=>.

¹⁰ Decreto 19, establece Normas Secundarias de Calidad Ambiental para la Protección de las Aguas Continentales Superficiales del Lago Villarrica, promulgado el 27 de mayo del año 2013 por el Ministerio del Medio Ambiente. Disponible en: <http://www.leychile.cl/N?i=1055224&f=2013-10-16&p=>.

eutrofización en el ambiente lacustre. La lámina de agua se obtuvo a través de la clasificación del índice espectral para el agua seleccionado (NDWI), usando como valor mínimo de referencia para extraer los píxeles con agua a $NDWI > 0.2$. Por otra parte, la clorofila *a* resulta ser una variable indicadora del grado de crecimiento de las algas y microorganismos, ya sea por causas naturales o antrópicas. Los detalles de ambas variables consideradas para la construcción del indicador se resumen a continuación.

3.2.1 Superficie lámina de agua

La superficie cubierta con agua en los cuerpos lacustres estudiados se obtuvo mediante la extracción de los píxeles inundados. Para ello se usó como referencia al índice espectral normalizado para el agua (NDWI), usando como valor mínimo del NDWI igual a 0,2. No obstante, se comprobó este valor para cada imagen satelital, con el fin de omitir errores por cambios asociados a las dinámicas naturales. Se obtuvo la superficie de lámina de agua en los cuerpos lacustres usando la siguiente expresión:

$$SCL = NDWI, \text{ con } NDWI > 0,2 \text{ (pixel inundado)} \quad (24)$$

Considerando que *SCL* es la cobertura con la superficie del cuerpo lacustre seleccionado. La obtención del índice construido para distintas fechas del año conformó la base de superficies lacustres usadas para la construcción del indicador medio ambiental. De esta forma, la cobertura utilizada como base para la caracterización del grado de eutrofización de cada cuerpo lacustre se obtuvo utilizando la expresión:

$$SACL = \bigcup_{i=1}^{i=n} SCL_i \quad (25)$$

En donde *SACL* corresponde a la superficie anual cubierta por el cuerpo lacustre. Esta formulación considera que cada píxel del cuerpo lacustre caracterizado se encuentra inundado al menos una vez en el año, incorporando las variabilidades estacionales de las superficies de lagos y lagunas, además de las zonas intermareales en los grandes cuerpos y los efectos del cambio climático.

3.2.2 Grado de eutrofización

El nivel de eutrofización de los píxeles extraídos correspondientes a la lámina de agua lacustre, se estimó utilizando la cobertura normalizada con la clorofila *a* detectada en los cuerpos de agua. La expresión utilizada fue:

$$IESL = \widehat{Ca} \cap SACL \quad (26)$$

Donde *IESL* es el índice de eutrofización superficial lacustre. Debido a que la variable *Ca* no se encuentra calibrada a la realidad nacional y/ local, además de ingresar a la expresión normalizada, el índice es adimensional, dando cuenta del grado de concentración espacial de la clorofila relativa en los cuerpos de agua lacustres en una escala que recorre el intervalo [0, 1].

3.3 Eutrofización anual de la superficie lacustre

A partir de las superficies de las láminas de agua lacustre obtenidas para un año y la consecuente extracción de los valores de la clorofila por píxel, fue posible construir el indicador que mide el grado de

eutrofización anual de la superficie lacustre. La formulación matemática del indicador medio ambiental lacustre se definió como:

$$EASL = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} IEL_i \quad (27)$$

La falta de calibración de la clorofila a impide utilizar sus valores directamente. Es por ello que para clasificar espacialmente al indicador, y definir cada clase de eutrofización, se utilizó el método de reclasificación basado en los quiebres naturales (maximización varianza intergrupala y minimización varianza intragrupal). De esta forma, se obtuvieron cinco clases del grado de eutrofización superficial de las aguas lacustres, compuestas por: Muy bajo, Bajo, Regular, Alto y Muy alto.

4. Ambiente glaciares

4.1 Marco contextual, definiciones y criterios determinados para la construcción del indicador

En base a la Estrategia Nacional de Glaciares de la DGA,¹¹ los glaciares se definen como “toda superficie de hielo y nieve permanente generada sobre suelo, que sea visible por períodos de al menos 2 años y de un área igual o superior a 0,01 km² (una hectárea). O cualquier superficie rocosa con evidencia superficial de flujo viscoso, producto de un alto contenido de hielo actual o pasado en el subsuelo”. No obstante, en el presente estudio se han considerado para su caracterización a los glaciares de montaña, los glaciaretos y los campos de hielo, restringidos a los criterios de uso descritos en la Tabla 11.

Se aprovechó el comportamiento espectral diferenciado del hielo en las longitudes de onda del infrarrojo de onda corta (SWIR) y parte del rango visible (Green), utilizando un índice de nieve y hielo normalizado (NDSI) como cobertura base en la construcción de la variable componente del indicador medio ambiental.

4.2 Variables componentes del indicador: superficie cubierta por cuerpos glaciares

Se utilizó el índice de nieve y hielo (NDSI) para obtener la superficie cubierta por glaciar, extrayendo aquellos píxeles con valores sobre 0,4. Mediante este proceso se obtuvo la superficie cubierta por los glaciares seleccionados, extrayendo aquellos píxeles con un valor del NDWI mayor o igual a 0,2, puesto que se consideran píxeles correspondientes a agua. Por lo mismo, se han considerado solo aquellas imágenes satelitales correspondientes a los meses del verano u otoño en los años caracterizados, con el fin de minimizar los errores espaciales del índice al diferenciar la nieve fresca del hielo. El refinamiento cartográfico se realizó utilizando como referencia a la cobertura del Inventario Nacional de Glaciares (DGA), entregado por la contraparte para la construcción del indicador.

4.2.1 Superficie cubierta por cuerpos glaciares

La delimitación de la superficie glaciar se obtuvo a través de la integración de dos índices espectrales: el NDSI y el NDWI. Determinando un umbral mínimo del NDSI y un umbral mínimo para el NDWI, se estimó la superficie cubierta por cuerpos glaciares (SCCG). La expresión utilizada fue:

¹¹ Dirección General de Aguas (DGA), Ministerio de Obras Públicas. Estrategia Nacional de Glaciares. Fundamentos. Realizado por Centro de Estudios Científicos – CECS. S.I.T. N°205. Santiago, diciembre del año 2009. Documento disponible en: <http://documentos.dga.cl/GLA5194v1.pdf>.

$$SSCCG = NDSI - (NDSI \cap NDWI), \text{ con } NDSI \geq 0,4 \text{ y } NDWI \geq 0,2 \quad (28)$$

El refinamiento cartográfico se llevó a cabo con la cobertura de glaciares entregada por la contraparte como referencia. Se consideraron al menos dos imágenes satelitales para realizar la caracterización del indicador medio ambiental, adquiridas en las estaciones del año en que los cuerpos glaciares se encuentran sin aporte de las primeras nevazones (finales del verano y principios del otoño).

4.3 Superficie Anual Cubierta por Cuerpos Glaciares

Se utilizó a las coberturas con la superficie cubierta por cuerpos glaciares como base para la construcción del indicador relativo al comportamiento anual de sus superficies. Las imágenes satelitales fueron obtenidas en los meses de verano y otoño de los años considerados en el presente estudio, antes del posible aporte de nieve fresca. La expresión matemática utilizada para obtener a la superficie anual cubierta por cuerpos glaciares (SACCG) fue:

$$SACCG = \bigcup_{i=1}^n SCCG_i \quad (29)$$

Se consideraron al menos dos imágenes satelitales para su estimación, utilizándose la cobertura del Inventario Nacional de Glaciares (DGA) como referencia espacial en la delimitación de las superficies glaciares¹².

5. Ambiente urbano

5.1 Marco contextual, definiciones y criterios determinados para la construcción del indicador

La Ordenanza General de la Ley General de Urbanismo y Construcción¹³, define área verde como “superficie de terreno destinada preferentemente al esparcimiento o circulación peatonal, conformada generalmente por especies vegetales y otros”. Respecto al estándar mínimo óptimo de vegetación urbana, este es definido por la Organización Mundial de la Salud y corresponde a 9 m²/habitante. Sin embargo, la vegetación urbana no solo se define como la superficie con vegetación dentro de las áreas verdes, sino que también corresponde a toda aquella vegetación factible de ser levantada a partir del índice espectral NDVI dentro de los límites urbanos. En tal sentido es importante destacar que no existe necesariamente un valor fijo para establecer un umbral de vegetación para todas las ciudades, sino que este se debe definir en función del área de estudio analizada. Para mayores referencias al respecto, se considera pertinente revisar la definición establecida por Treimun (2015).

En la construcción del indicador medio ambiental se consideraron las manzanas urbanas y los bandejones centrales de las principales avenidas y calles. Se incluyeron en la caracterización de la vegetación urbana a las principales ciudades del país, con más de 100.000 habitantes y que cuenten con las coberturas de manzanas urbanas utilizadas como base cartográfica en los Censos de Población y Vivienda de los años

¹² La cobertura espacial del indicador desarrollado en el presente estudio se detalla en la Tabla 12.

¹³ Decreto 47, fija nuevo texto de la Ordenanza General de la Ley General de Urbanismo y Construcciones, promulgada el 16 de abril del año 1992, por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Disponible en: <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=8201&idVersion=2015-06-27>.

1992, 2002 y 2012 (INE, 2012). La selección de las ciudades caracterizada con el indicador medio ambiental, también contempló la disponibilidad de insumos satelitales para los años escogidos¹⁴.

Se determinó que la cobertura de manzanas del año 1992 se utilizaría para los años 1990 y 1995, mientras que la cobertura del año 2002 se utilizó para los años 2000 y 2005, dejando a la cobertura del censo 2012 para los años 2010 y 2015. Se consideraron imágenes satelitales de las temporadas húmedas y secas de cada año caracterizado, en las que las fases iniciales y medias de los ciclos fenológicos de la vegetación urbana, coincidentes con el comportamiento temporal de algunos índices vegetacionales, principalmente centrados en la región del espectro visible (Red) e infrarroja cercana (NIR).

5.2 Variables componentes del indicador: vegetación por manzana urbana

La estimación de la superficie cubierta con vegetación por manzana urbana utilizó como base espacial al NDVI para todo el territorio nacional. Se realizó un muestreo espacial del índice espectral, centrado en aquellos sectores con reconocida presencia de vegetación, a través del tiempo y al interior de las ciudades. De este muestreo se obtuvo el valor mínimo de los índices, utilizados para la extracción de los píxeles representantes de la vegetación urbana en cada ciudad. Como unidades espaciales de análisis, representativas del suelo urbanizado de cada ciudad seleccionada, se utilizaron las coberturas del INE con las manzanas urbanas de los Censos de los años 1992, 2002 y 2012.

5.2.1 Superficie cubierta con vegetación por manzana urbana

La superficie cubierta con vegetación, en cada manzana urbana de las ciudades escogidas, se obtuvo a través de la extracción de los píxeles con valores del NDVI mayores o iguales que el umbral mínimo determinado en el muestreo espacial realizado para cada ciudad. El muestreo se realizó en base a la generación de una cobertura de puntos a partir del reconocimiento de lugares con vegetación estacionalmente constante; a partir de dichos puntos de muestreo se estableció un rango de valoración mínimo para considerar un corte de NDVI sobre el cual establecer la presencia efectiva de vegetación. No obstante, se utilizaron como control los valores del NDVI indicados para diferentes coberturas (Van Der Gried & Owe, 1995). El umbral mínimo dado por estos autores para la vegetación fue usado como referencia para encontrar la superficie cubierta con vegetación por manzana urbana (SCVMU):

$$SCVMU = (NDVI \cap \text{Manzanas urbanas}), \text{ con } NDVI \geq 0,2 \quad (30)$$

Utilizando la expresión anterior en imágenes satelitales originadas en diferentes estaciones, es posible obtener la cobertura con la superficie anual cubierta de vegetación en un año por cada manzana urbana:

$$SACVMU = \bigcup_{i=1}^{i=n} SCVMU_i \quad (31)$$

5.3 Superficie anual promedio de vegetación por manzana urbana

Una vez obtenidas las coberturas con las SCVMU estimadas para cada imagen satelital procesada, se procedió a la construcción del indicador considerando como referencia a la superficie de cada manzana

¹⁴ La cobertura espacial del indicador desarrollado en el presente estudio se detalla en la Tabla 12.

de las ciudades seleccionadas. De esta forma, considerando un índice mudo para designar a cada manzana, definido por $k = 1, \dots, m$, donde m es el número de manzanas en cada ciudad, se determinó la formulación matemática del porcentaje de vegetación por manzana urbana (PVMU), dada por la expresión:

$$PVMU_k = 100 \left(\frac{\left(\bigcup_{i=1}^{i=n} SCVMU_i \right)_k}{Sup_{MU_k}} \right) \quad (32)$$

Donde:

$PVMU_k$ = Porcentaje de vegetación en la manzana urbana k

Sup_{MU_k} = Superficie de la manzana urbana k

$\left(\bigcup_{i=1}^{i=n} SCVMU_i \right)_k$ = Superficie correspondiente a la unión de las coberturas con la SCVMU estimada por año en la manzana urbana k .

6. Ambiente humedales alto andino

6.1 Marco contextual, definiciones y criterios determinados para la construcción del indicador

El Decreto 82 del año 2011¹⁵, define a los humedales como “ecosistemas asociados a sustratos saturados de agua en forma temporal o permanente, en los que existen y se desarrolla biota acuática y, para efectos de su delimitación, se considera la presencia y extensión de la vegetación hidrófila o la presencia de otras expresiones de biota acuática”. También se distinguen entre aquellos que han sido declarados sitios prioritarios de conservación por la CONAMA o sitios RAMSAR. Además, se señala que existe una zona de protección de exclusión de intervención, correspondiente a los “5 metros aledaños a ambos lados de cursos naturales de agua, cuya sección de cauce, delimitada por la marca evidente de la crecida regular, es superior a 0,2 m² e inferior a 0,5 m². Tratándose de manantiales y cuerpos naturales de agua, esta zona tendrá un ancho de 10 metros. En cursos naturales de agua de sección de cauce mayor a 0,5 m², el ancho de esta zona será de 10 metros a ambos lados de éste”.

En el presente estudio se contempló la caracterización de los humedales del sector Alto Andino del país¹⁶. Se utilizó como referencia espacial la cobertura espacial de humedales entregada por el MMA. A partir de ella se seleccionaron los cuerpos con las condiciones morfométricas y geográficas definidas por ambas partes. Se consideraron los humedales sobre los 3.000 msnm, con un pre procesamiento de la cobertura de humedales y el MDE ASTER. A continuación se detallan las formalizaciones de las variables y el indicador medio ambiental construido.

6.2 Variables componentes de los indicadores: superficie cubierta con vegetación y superficie inundada

¹⁵ Decreto 82, que aprueba el Reglamento de Suelos, Aguas y Humedales, promulgado el 20 de julio del año 2010, por el Ministerio de Agricultura. Disponible en: <http://www.leychile.cl/N?i=1022943&f=2011-02-11&p=>

¹⁶ La cobertura espacial del indicador desarrollado en el presente estudio se detalla en la Tabla 12.

Las variables escogidas para la caracterización de los humedales del Alto Andino chileno se basan en dos índices espectrales, el NDVI y el NDWI. Mediante el uso del NDVI se obtuvo la superficie cubierta con vegetación en los humedales seleccionados, mientras que usando el NDWI se detectaron los píxeles inundados, obteniendo la superficie inundada componente de los mismos cuerpos. Se han considerado imágenes satelitales de los meses de otoño o primavera para la caracterización de los humedales, debido a las crecidas y desbordes en la zona durante las otras estaciones del año.

6.2.1 *Obtención de la superficie cubierta con vegetación en el humedal*

La superficie vegetal de los humedales se determinó usando como referencia los valores mínimos del NDVI. Estos valores dinámicos del índice, correspondientes al umbral mínimo de la vegetación en cada imagen procesada, se determinaron mediante el muestreo aleatorio de la vegetación al interior de cada humedal del Alto Andino seleccionado

Para ello se usó la cobertura de humedales como sitios de extracción de muestras puntuales, las que se atribuyeron con los valores del NDVI iguales o mayores a 0,12. Luego se filtraron los registros resultantes mediante la estandarización de los valores del NDVI correspondientes. Esto se logró aplicando el índice z-score centrado en un intervalo de confianza igual a (-2, 2). A la submuestra seleccionada se le aplicó un análisis geoestadístico, atribuyendo a los registros con el índice local de agrupamiento, la I de Moran adaptada por Anselin, excluyendo los valores *outlier* o aquellos puntos aislados con valores irregulares. De esta forma, la cobertura puntual entregó un conjunto representativo de los valores que alcanza el índice en la superficie cubierta con vegetación para cada humedal. La expresión utilizada para obtener la superficie cubierta con vegetación en el humedal (SCVH) fue:

$$SCVH = (NDVI > \text{Umbral mínimo NDVI muestreado} > 0,12) \quad (33)$$

6.2.2 *Obtención de la superficie inundada en el humedal*

La superficie inundada en cada humedal se determinó usando al NDWI. Este índice espectral se encuentra desarrollado para detectar en forma eficiente aquellos píxeles con alta probabilidad de encontrarse inundado. De esta manera, se ha utilizado un umbral mínimo muestreado del NDWI para la detección automatizada de la superficie inundada en el humedal (SIH). La expresión utilizada fue:

$$SIH = (NDWI > \text{Umbral mínimo NDWI muestreado} > 0,16) \quad (34)$$

6.3 *Indicadores propuestos para los humedales del Alto Andino*

Utilizando las variables y sus parámetros previamente definidos, se procedió a la construcción de ambos indicadores medio ambientales propuestos para el ambiente de humedales. La estimación de ambos indicadores consideró imágenes satelitales del mismo periodo del año (otoño y primavera). Su formalización se presenta a continuación.

6.3.1 *Superficie anual cubierta con vegetación en el humedal*

La construcción del indicador consideró la unión espacial de las superficies cubiertas con vegetación en obtenidas en todas las imágenes satelitales procesadas. El indicador localiza aquellos pixeles que alguna vez en el año se encuentran cubiertos por vegetación. La unidad física definida para el indicador fueron los metros cuadrados. La fórmula matemática utilizada para estimar la superficie anual cubierta con vegetación en el humedal fue:

$$SACVH = \cup_{i=1}^{i=n} SCVH_i \quad (35)$$

6.3.2 Superficie anual inundada en el humedal

La obtención del indicador relativo a la cuantificación de la superficie anual inundada en el humedal (SAIH), se compuso de la unión espacial de las superficies inundadas estimadas en distintas estaciones del año (otoño y primavera). Esto significa que el indicador desarrollado localiza aquellos pixeles que alguna vez en el año se encuentran inundados. La unidad física determinada para el SAIH fueron los metros cuadrados, siendo formalizado con la expresión:

$$SAIH = \cup_{i=1}^{i=n} SIH_i \quad (36)$$

En la Tabla 12 resumen algunas de las principales características de los indicadores medio ambientales propuestos y desarrollados. Entre ellas se encuentran las variables e índices construidos para la obtención de cada indicador.

6.3.3 Obtención de Tendencias en Humedales Altos Andinos

Además de los indicadores antes señalados, obtenidos a través de la utilización de Landsat, se realizó un cálculo de las tendencias anuales del NDVI de los humedales altos andinos, a través del uso del sensor Modis.

Los procesos considerados para llevar a cabo la definición de las tendencias son: extracción de componente NDVI de los archivos HDF; corte a través de mascara nacional; creación de mosaicos anuales a nivel nacional y cálculo de promedios de NDVI a través de máscaras de humedales.

7. Extensiones de ArcGis utilizadas por indicador

A continuación se señalan los paquetes de herramientas utilizadas para la construcción de los indicadores en base al software ArcGis 10.3, y si estas son de pago adicional a la licencia correspondiente.

Tabla 14. Especificación de paquetes de herramientas utilizadas para la construcción de indicadores

| Paquetes de herramientas de ArcGis 10.3 | Pago/No pago |
|-----------------------------------------|--------------|
| Data Management Tools | No pago |
| Analyst Tools | No pago |
| Spatial Analyst | Pago |
| Spatial Statistics Tools | Pago |

Fuente: CIT-UAI, 2015

V. RESULTADOS

1. Herramientas y modelos ambientales

A continuación se presentan diversas aplicaciones de los indicadores medio ambientales construidos. Para ello se han seleccionado aquellas regiones del país que presentan cobertura completa por la familia de sensores Landsat en el periodo 1990 – 2015. Los ambientes o ecosistemas caracterizados, los indicadores y sus tendencias temporales, se encuentran distribuidas según la estructura presentada en la metodología. Cada una de las expresiones descritas en aquella sección fue automatizada utilizando la herramienta de programación grafica *Model Builder*, de ArcGis. El detalle técnico de la construcción de las herramientas y modelos, junto a la explicación de su sistematización, se plasma en el Manual de tipo operativo en el que se explica el paso a paso del uso de las herramientas desarrolladas. Es importante destacar que los resultados presentados a continuación son ejemplos representativos de cada uno de los indicadores propuestos, debido a que por la duración de la consultoría resulta imposible realizar un cálculo a nivel nacional. No obstante, a través de la disponibilidad de imágenes Landsat, es posible realizar los cálculos para el territorio nacional, utilizando los modelos construidos en esta consultoría.

Los resultados se presentan con la misma estructura para todos los indicadores, entregando información sobre los ambientes y ecosistemas seleccionados para la aplicación de las herramientas SIG. A ella se agrega información de las imágenes satelitales utilizadas para la construcción de cada indicador, junto a parámetros de la metadata necesarios para el procesamiento de los insumos espaciales. Posteriormente, se entrega información general de los procesos y resultados para cada variable ambiental, caracterizándolas gráficamente para el año 2015. Los indicadores medio ambientales se caracterizan a través de su comportamiento espacial (en mapas) y sus tendencias temporales (en forma tabulada y en gráficos).

Adicionalmente se presentan los resultados correspondientes a tendencias anuales obtenidas a través de la utilización de imágenes satelitales del sensor MODIS para los años entre el 2003 y 2013, tomando en consideración la variación del NDVI para los humedales altos andinos y las áreas protegidas de todo Chile.

2. Indicadores desarrollados para el ambiente de bosque nativo

Se han seleccionado dos AP-SNASPE para caracterizar las variables e indicadores desarrollados para el bosque nativo, El Parque Nacional La Campana (Región de Valparaíso) y La Reserva Nacional Río Clarillo (Región Metropolitana). En la Tabla 15 se resumen los detalles referentes a las imágenes satelitales utilizadas.

Tabla 15. Áreas Protegidas por el SNASPE caracterizadas por los indicadores del bosque nativo.

| Área Protegida (AP) | Regiones | Imágenes | Ángulo de elevación solar (°) | Ángulo de azimut solar (°) | Distancia al Sol (UA) |
|----------------------------------|------------------------------------------------|-------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| PN La Campana RN Río Clarillo | Región de Valparaíso y Región Metropolitana | L5338390119 | 27,95 | 46,72 | 1,01 |
| | | L5338390231 | 28,29 | 49,37 | 0,98 |
| | | L5338395005 | 48,89 | 87,11 | 1,00 |
| | | L5338395165 | 18,71 | 43,97 | 1,00 |

| Área Protegida (AP) | Regiones | Imágenes | Ángulo de elevación solar (°) | Ángulo de azimut solar (°) | Distancia al Sol (UA) |
|---------------------|----------|-------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| | | L7338300059 | 47,40 | 62,42 | 1,02 |
| | | L7338300283 | 50,45 | 54,66 | 0,99 |
| | | L5338305064 | 45,04 | 61,20 | 1,02 |
| | | L5338305304 | 55,93 | 63,82 | 1,00 |
| | | L5338310030 | 52,63 | 74,85 | 1,02 |
| | | L5338310334 | 59,50 | 76,10 | 1,01 |
| | | L8338315060 | 48,51 | 60,16 | 0,99 |
| | | L8338315124 | 32,27 | 36,68 | 1,01 |

Fuente: CIT-UAI, 2015.

2.1 Superficie anual cubierta con bosque nativo (SACBN)

La obtención del SACBN, indicador medio ambiental relativo a la extensión superficial anual cubierta por el bosque natural, se realizó mediante la unión espacial de las coberturas con la superficie cubierta por el bosque nativo (SCBN), estimada en distintas estaciones del año mediante el procedimiento descrito en la metodología. Se utilizaron al menos dos imágenes satelitales, correspondiente a las estaciones húmedas y secas de las AP-SNASPE seleccionadas.

Este indicador medio ambiental es base para los otros indicadores propuestos en el ambiente conformado por el bosque natural. Para cada imagen satelital descrita en la Tabla 15 se obtuvo la superficie cubierta por el bosque nativo al interior de las AP seleccionadas, las que posteriormente fueron compuestas anualmente, obteniendo el SACBN para cada quinquenio del periodo 1990-2015.

2.1.1 SACBN: resultados y tendencias. Periodo 1990 - 2015

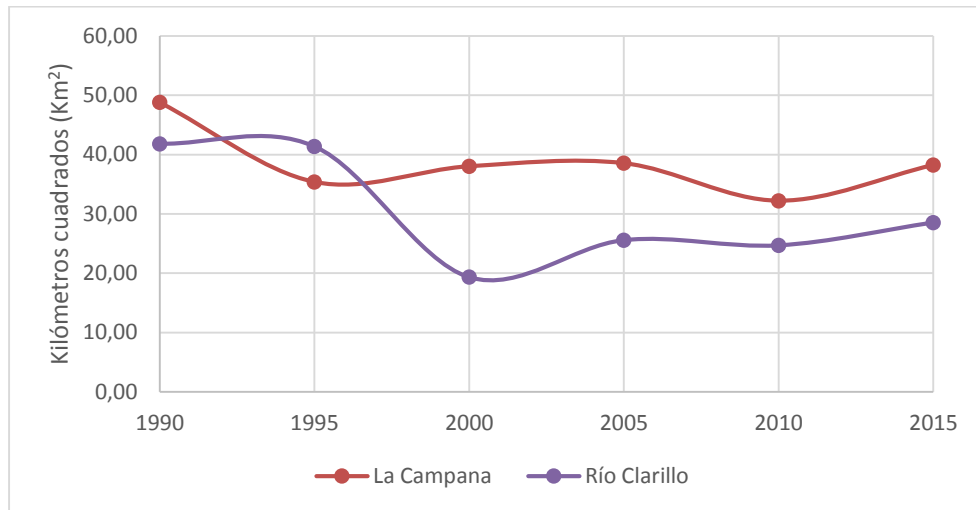
Al integrar cada cobertura con la SCBN en el periodo estudiado se puede analizar la tendencia del comportamiento temporal del indicador en las AP-SNASPE seleccionadas. En la Tabla 16 se resumen los valores obtenidos para el SACBN durante el periodo 1990-2015, mientras que en el Gráfico 1 se pueden apreciar las tendencias del índice en ambas áreas protegidas seleccionadas, las cuales se espacializan en las cartografías posteriores. Respecto al gráfico, es importante indicar que a partir del año 1995 se observa un comportamiento diferenciado entre ambas AP-SNASPE, visualizándose para Río Clarillo una disminución superficial importante, la que en el presente año (2015) comienza a aumentar.

Tabla 16. Resultados obtenidos para el SACBN. Periodo 1990 – 2015.

| AP-SNASPE | SACBN | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 | 2015 |
| PN La Campana | 48,81 | 35,40 | 38,03 | 38,56 | 32,22 | 38,25 |
| RN Río Clarillo | 41,82 | 41,37 | 19,34 | 25,58 | 24,71 | 28,56 |

Fuente: CIT-UAI, 2015.

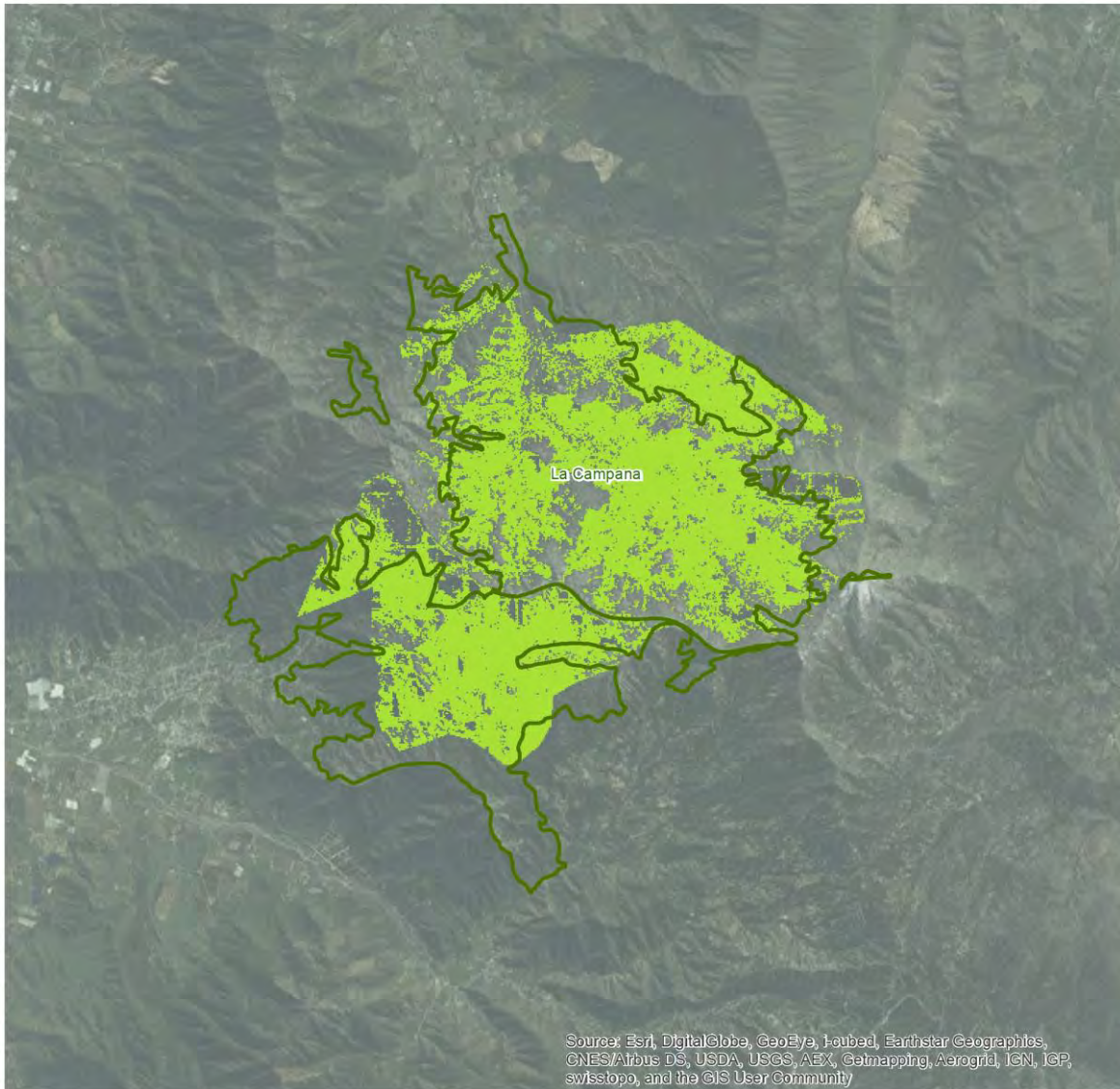
Gráfico 1. Comportamiento temporal y tendencias lineales del SACBN. Periodo 1990 – 2015.



Fuente: CIT-UAI, 2015.

INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE BOSQUE

Área de Estudio: La Campana | 1990

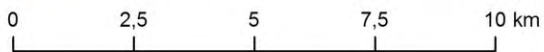


Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

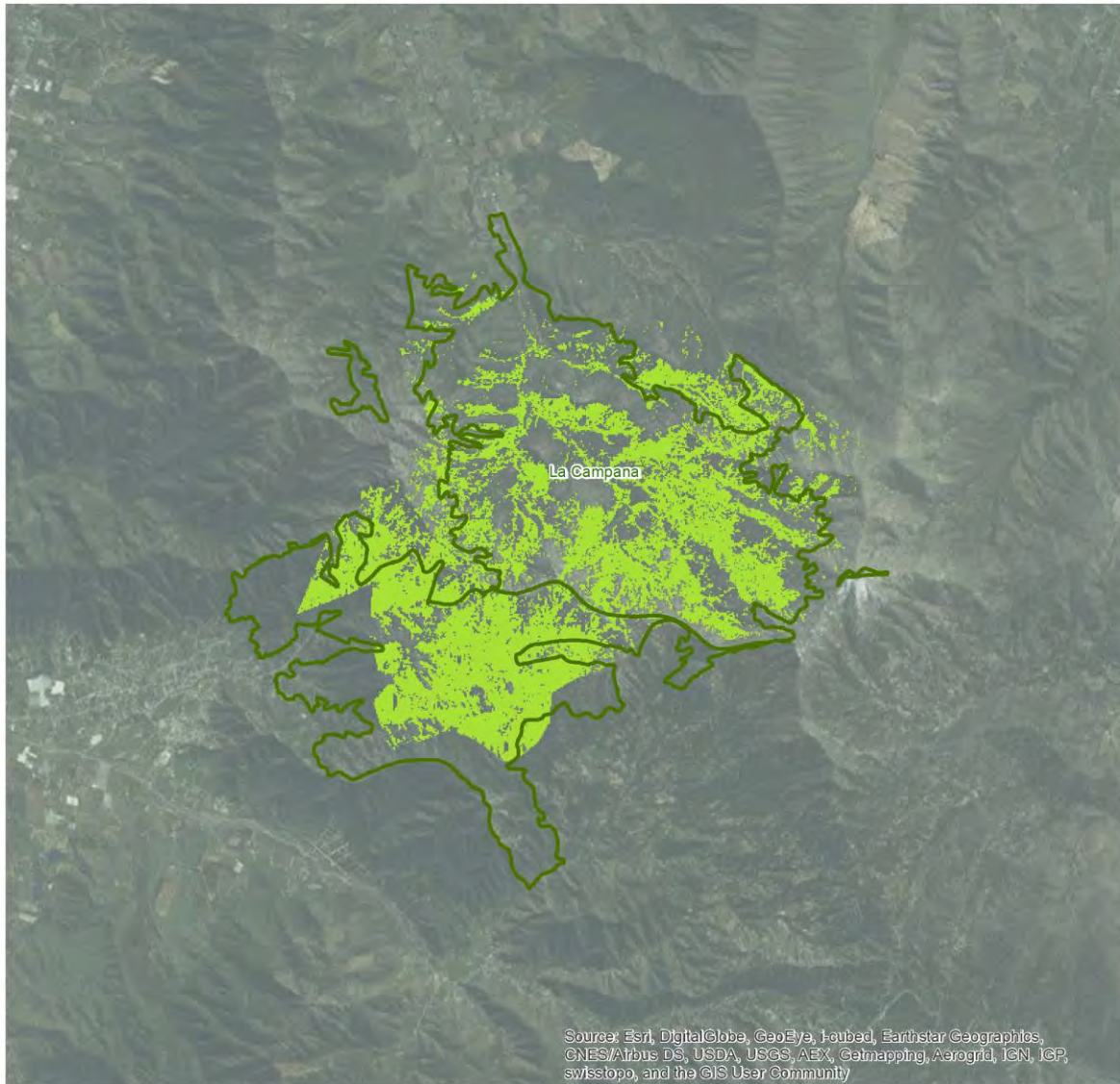
Simbología

-  SNASPE
-  SACBN - Indicador Superficie Bosque Nativo



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE BOSQUE

Área de Estudio: La Campana | 1995

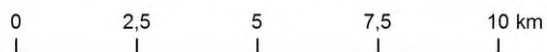


Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

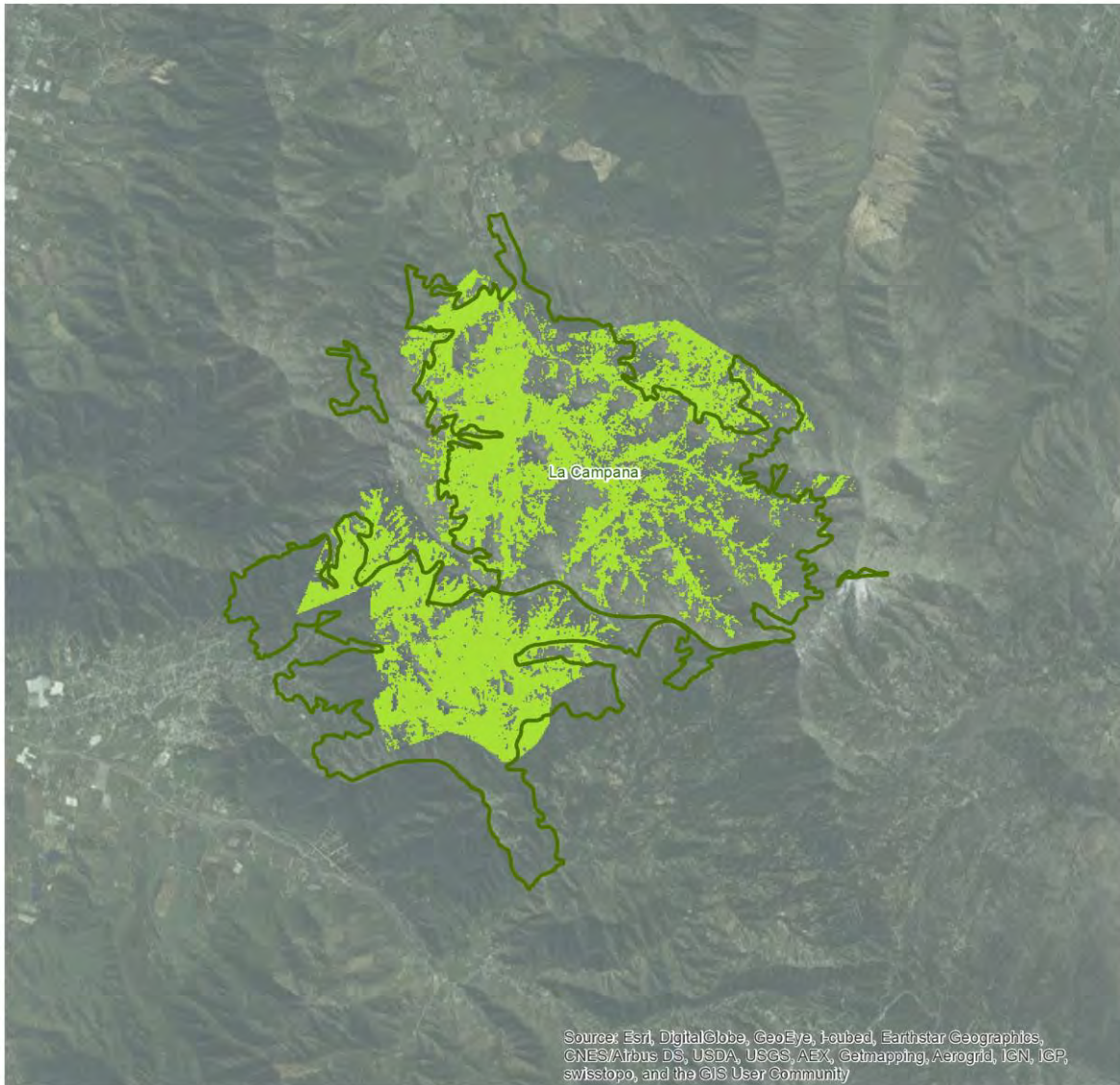
Simbología

-  SNASPE
-  SACBN - Indicador Superficie Bosque Nativo



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE BOSQUE

Área de Estudio: La Campana | 2000

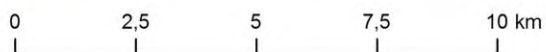


Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

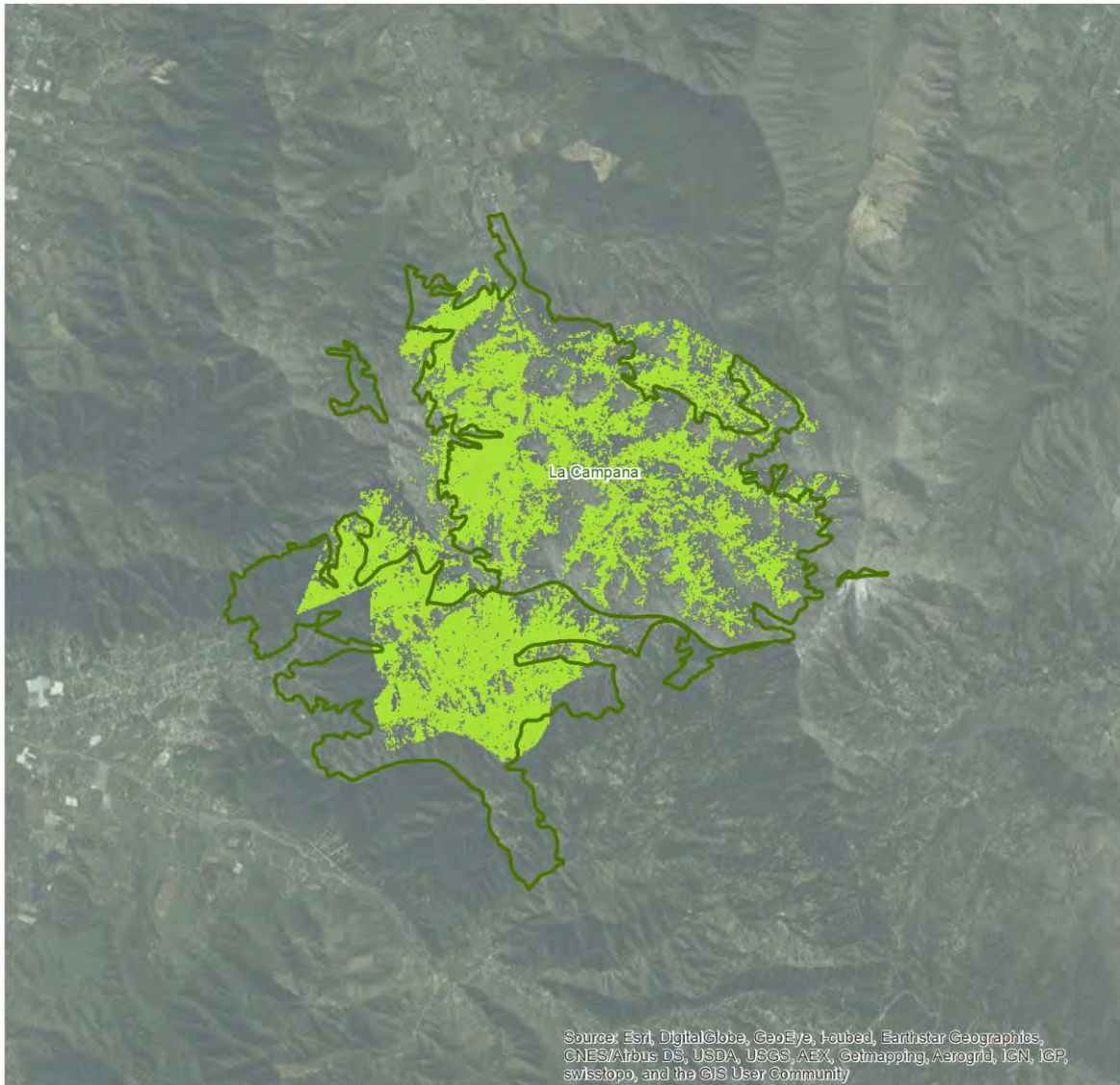
Simbología

-  SNASPE
-  SACBN - Indicador Superficie Bosque Nativo



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE BOSQUE

Área de Estudio: La Campana | 2005

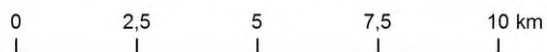


Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

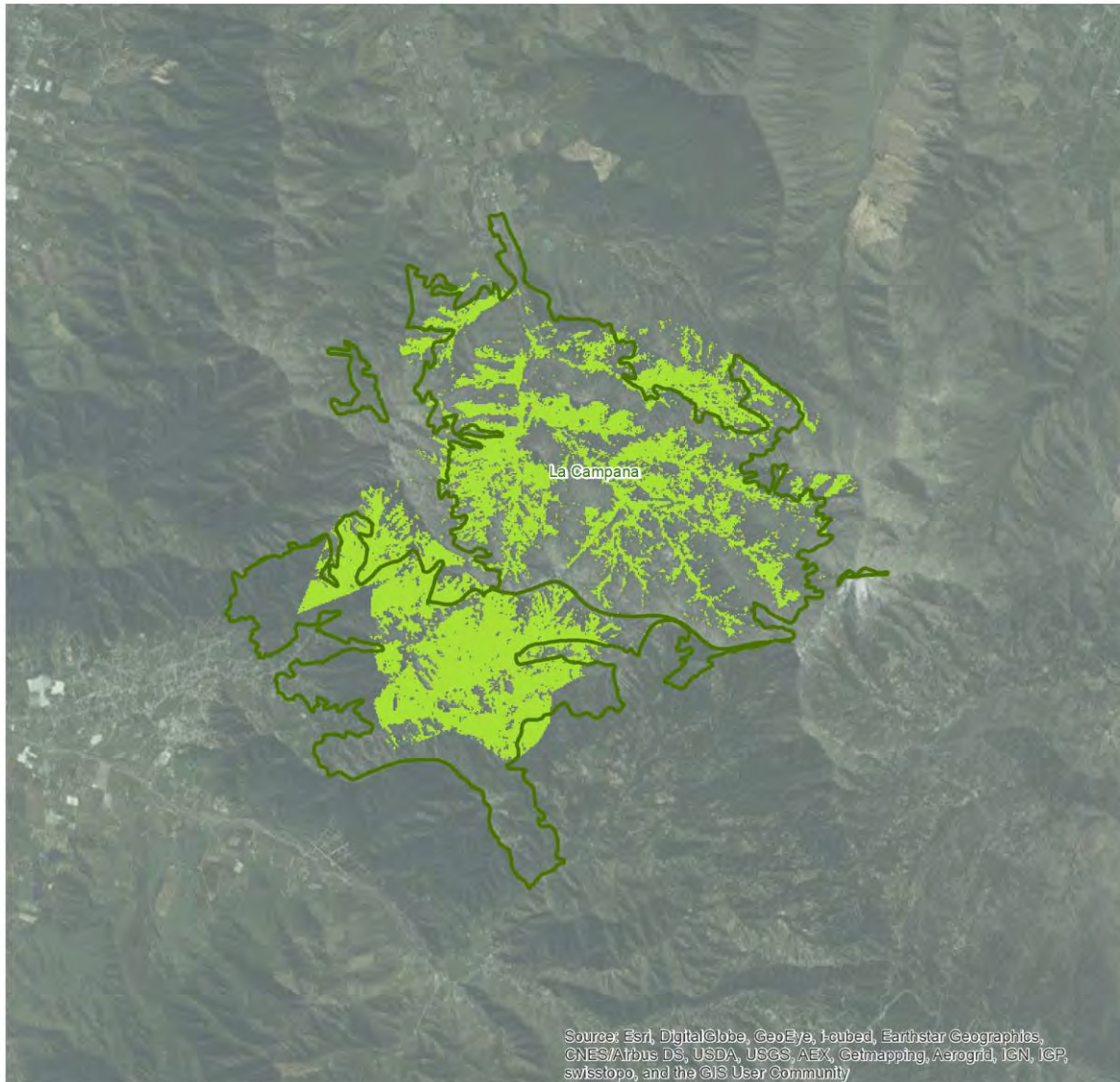
Simbología

-  SNASPE
-  SACBN - Indicador Superficie Bosque Nativo



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE BOSQUE

Área de Estudio: La Campana | 2010

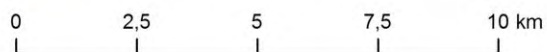


Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

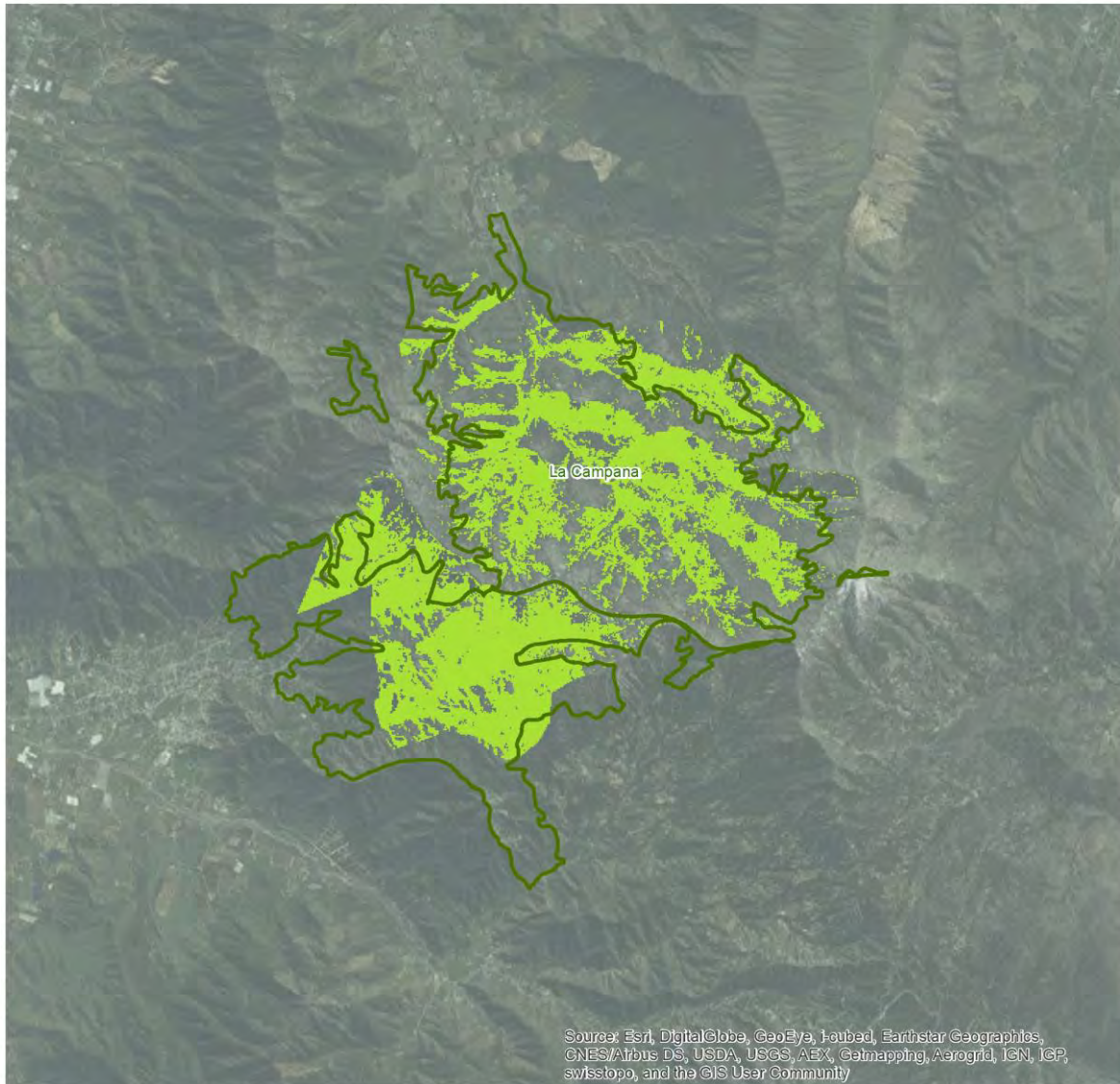
Simbología

-  SNASPE
-  SACBN - Indicador Superficie Bosque Nativo



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE BOSQUE

Área de Estudio: La Campana | 2015

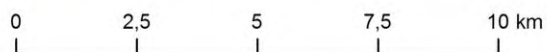


Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

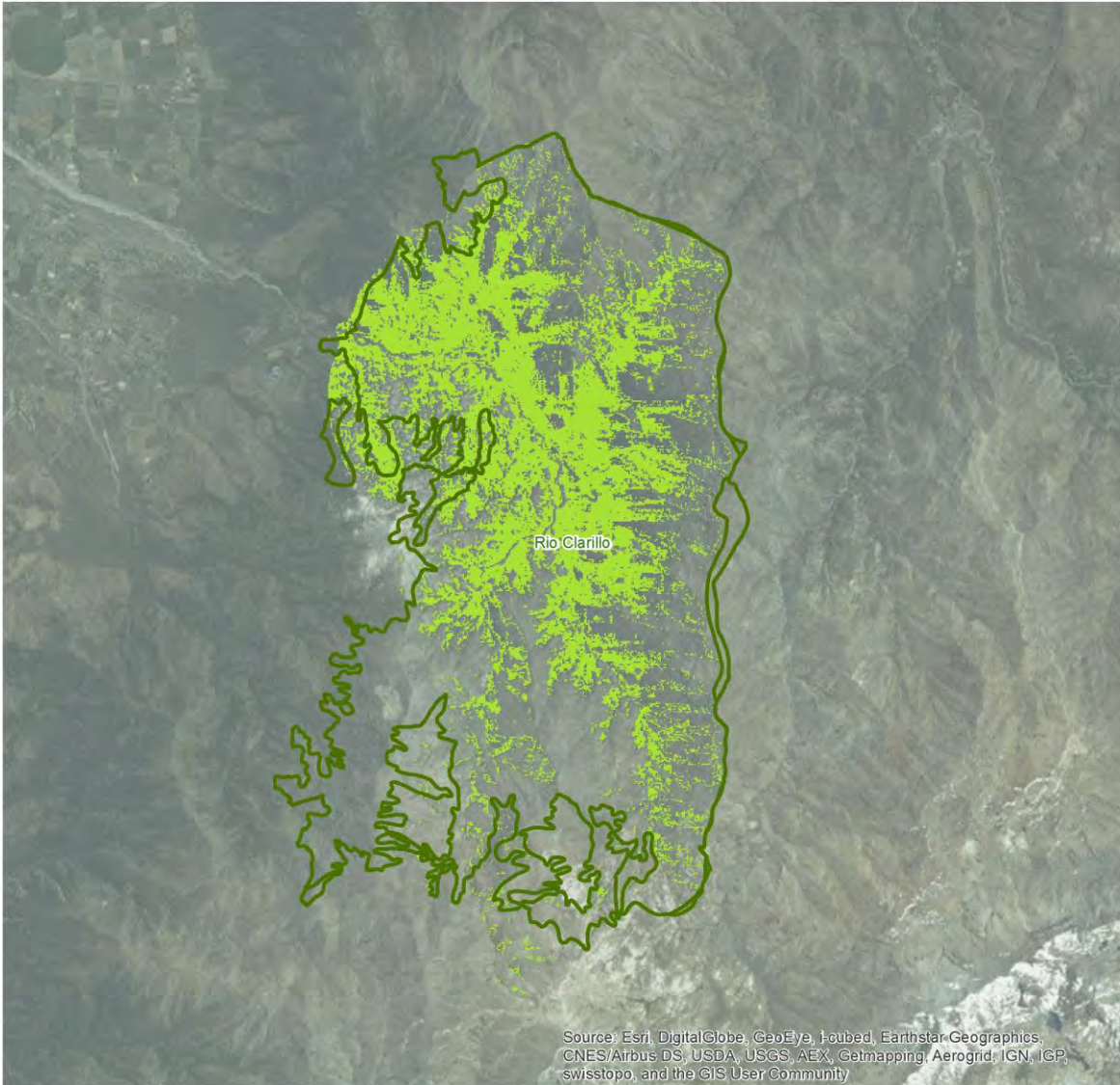
Simbología

-  SNASPE
-  SACBN - Indicador Superficie Bosque Nativo



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE BOSQUE

Área de Estudio: Río Clarillo | 1990

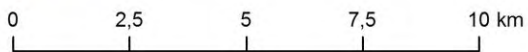


Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

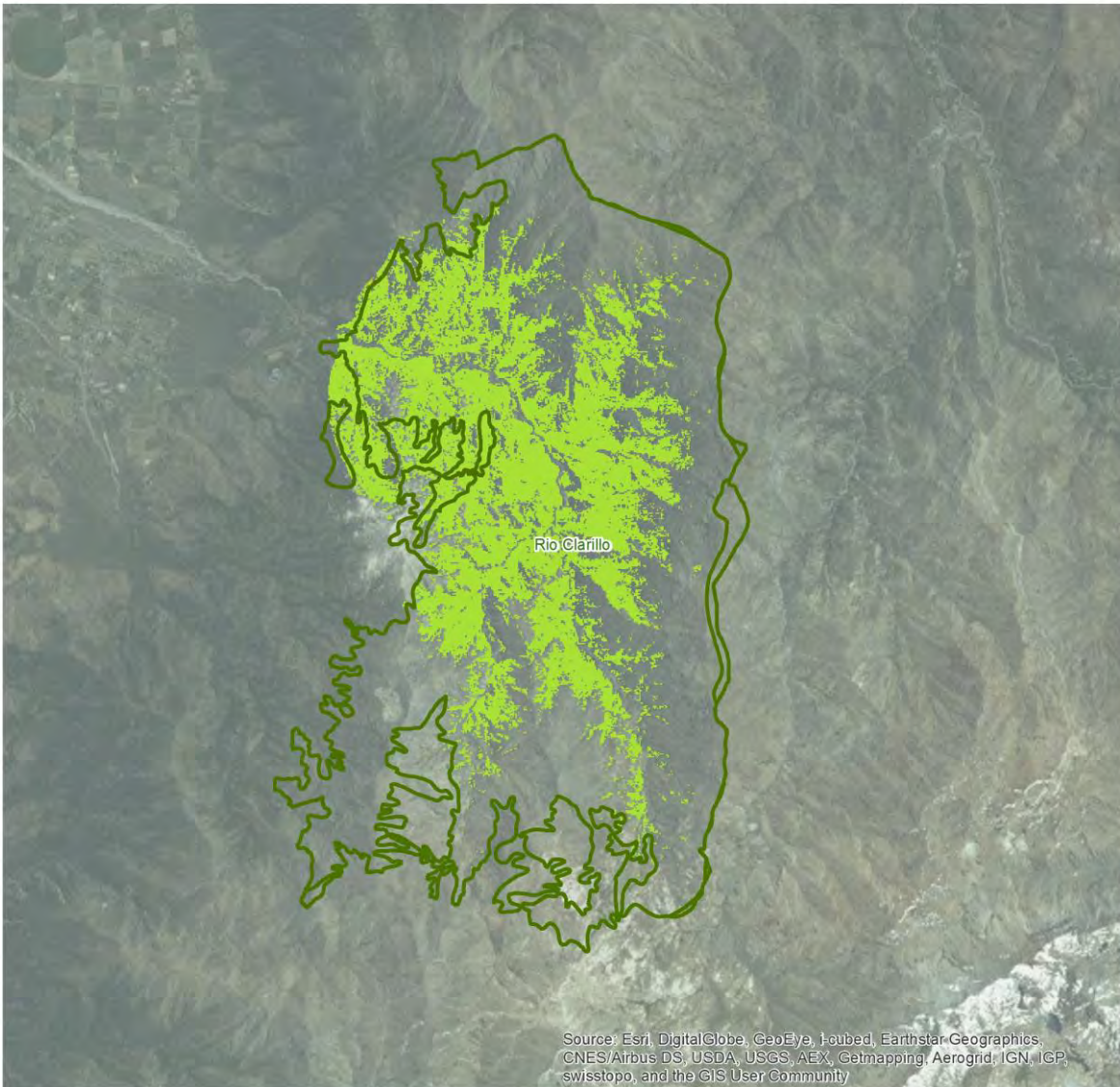
Simbología

-  SNASPE
-  SACBN - Indicador Superficie Bosque Nativo



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE BOSQUE

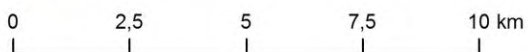
Área de Estudio: Río Clarillo | 1995



Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

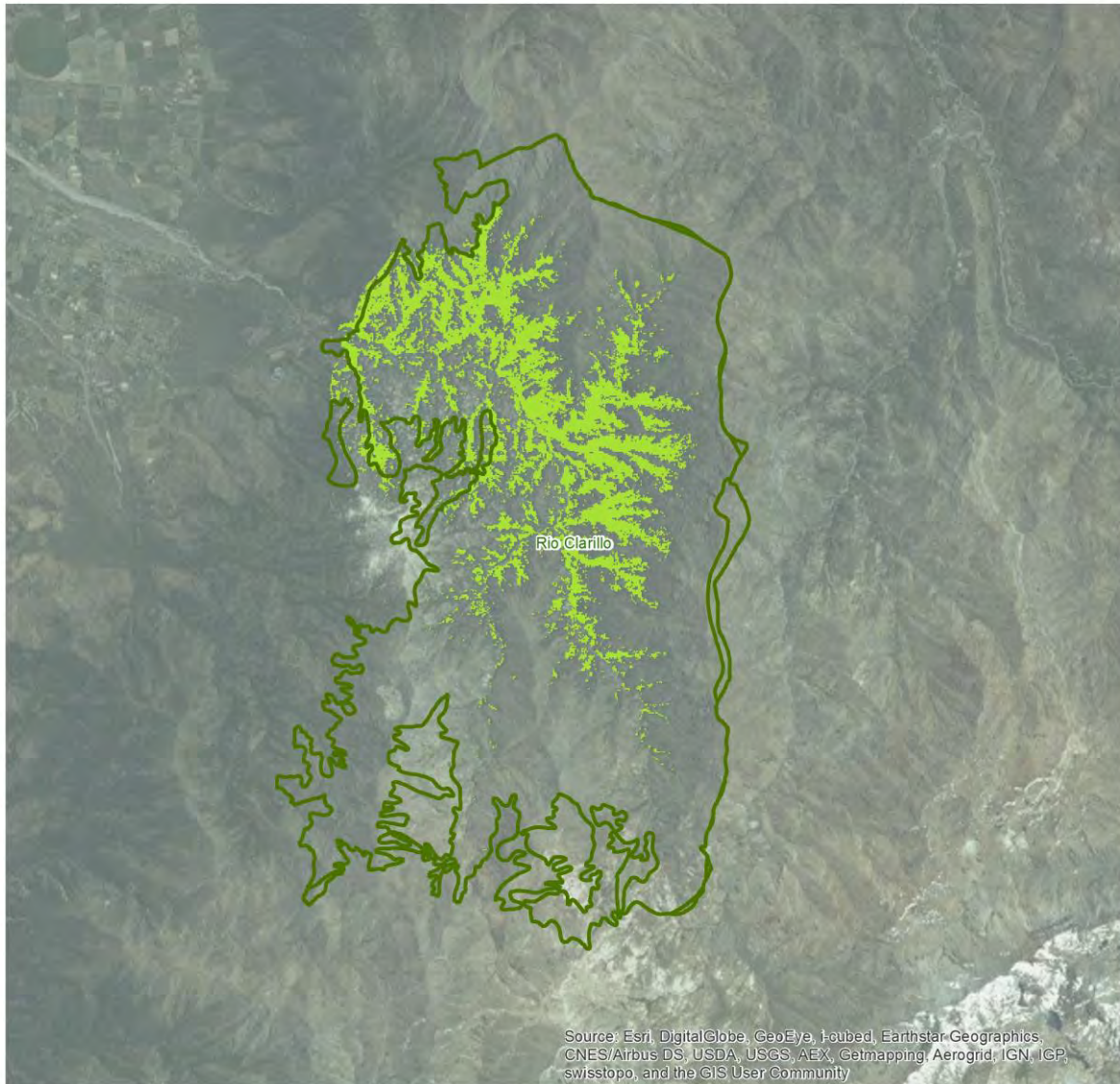
Simbología

-  SNASPE
-  SACBN - Indicador Superficie Bosque Nativo



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE BOSQUE

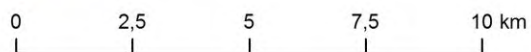
Área de Estudio: Río Clarillo | 2000



Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

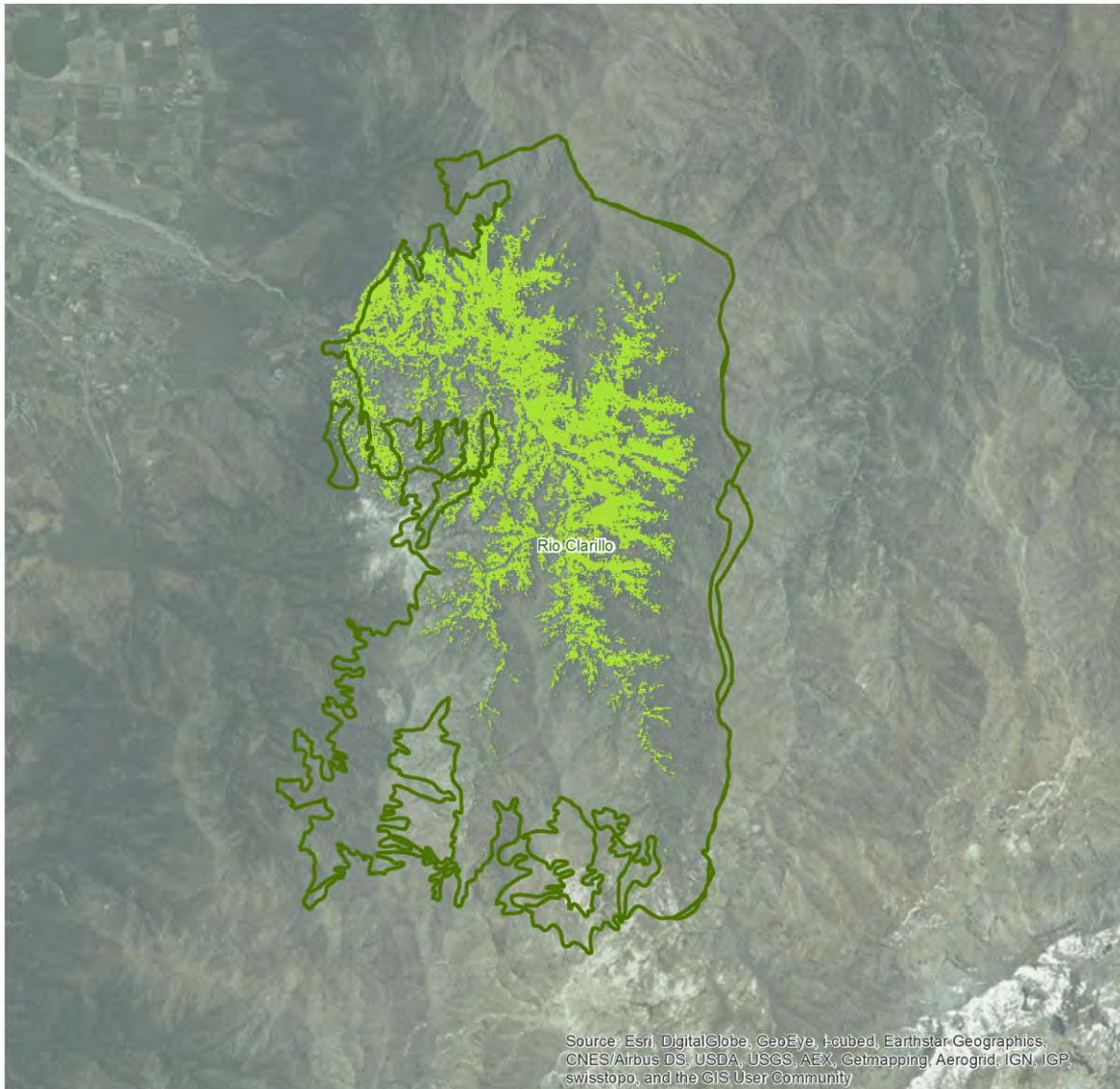
Simbología

-  SNASPE
-  SACBN - Indicador Superficie Bosque Nativo



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE BOSQUE

Área de Estudio: Río Clarillo | 2005

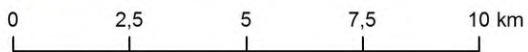


Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

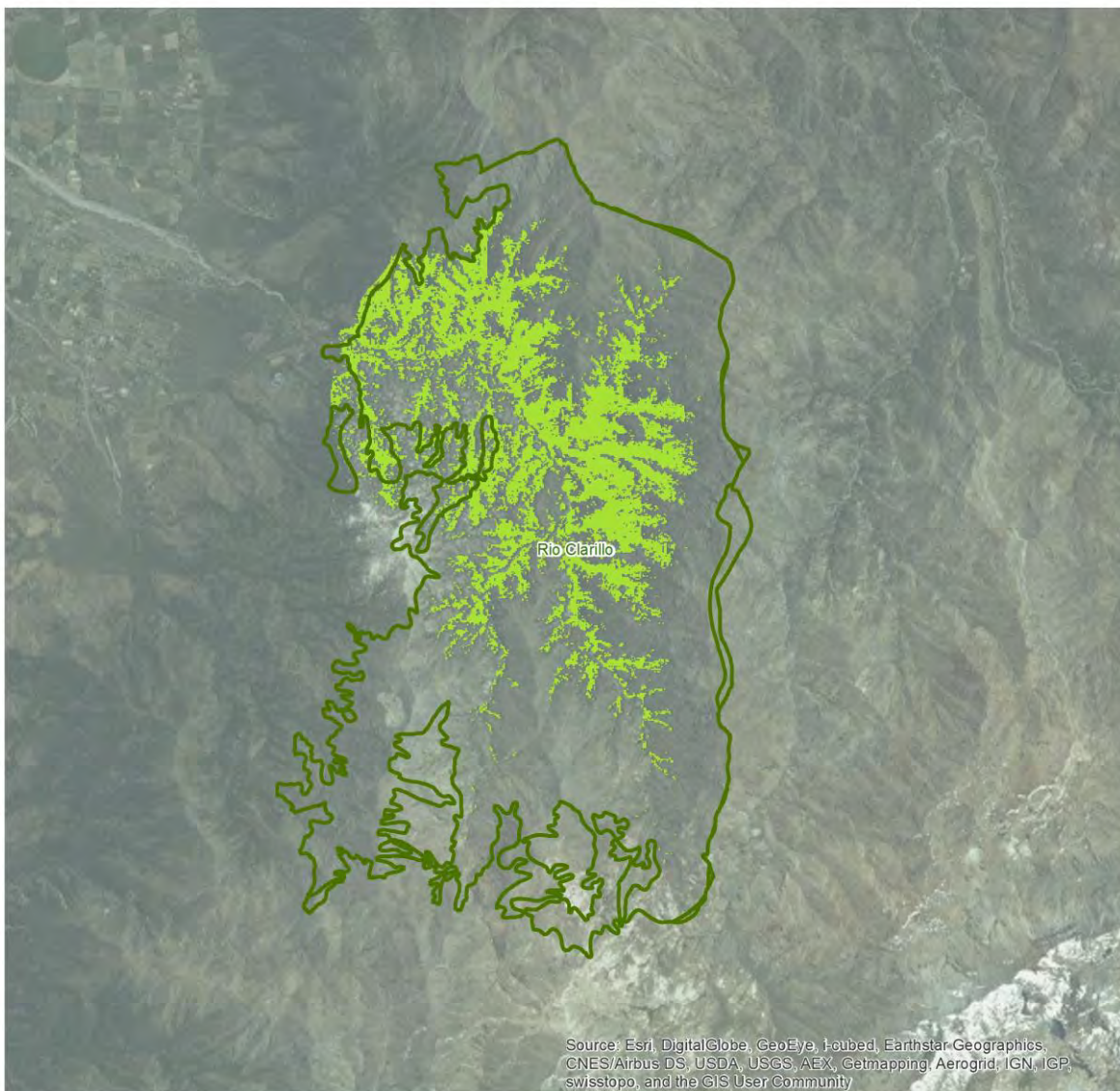
Simbología

- SNASPE
- SACBN - Indicador Superficie Bosque Nativo



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE BOSQUE

Área de Estudio: Río Clarillo | 2010

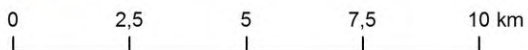


Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

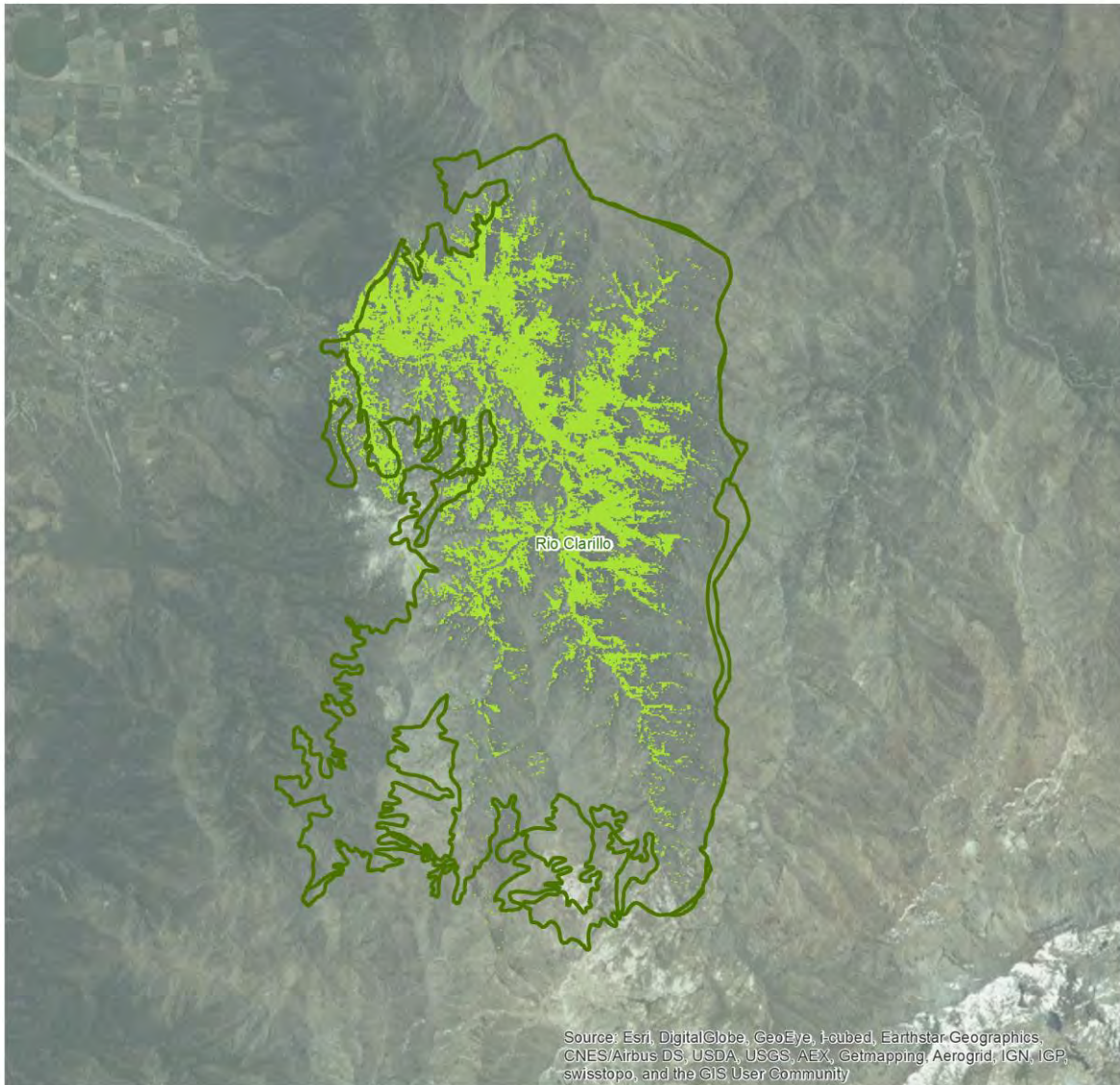
Simbología

-  SNASPE
-  SACBN - Indicador Superficie Bosque Nativo



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE BOSQUE

Área de Estudio: Río Clarillo | 2015

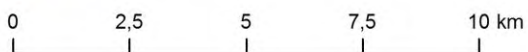


Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

Simbología

-  SNASPE
-  SACBN - Indicador Superficie Bosque Nativo



2.2 Vigor vegetacional anual del bosque nativo (VVABN)

Este indicador utiliza como base el indicador de superficie anual cubierta de bosque nativo y el NDVI como parámetro para medir el estado de salud del bosque nativo. De esta manera, se obtuvo la superficie cubierta por el bosque nativo, además del NDVI, para ambos sectores por cada imagen descrita en la Tabla 15. **Áreas Protegidas por el SNASPE caracterizadas por los indicadores del bosque nativo.**, las que concluyeron en su composición anual obteniéndose el VVABN.

2.2.1 VVABN: resultados y tendencias. Periodo 1990 - 2015

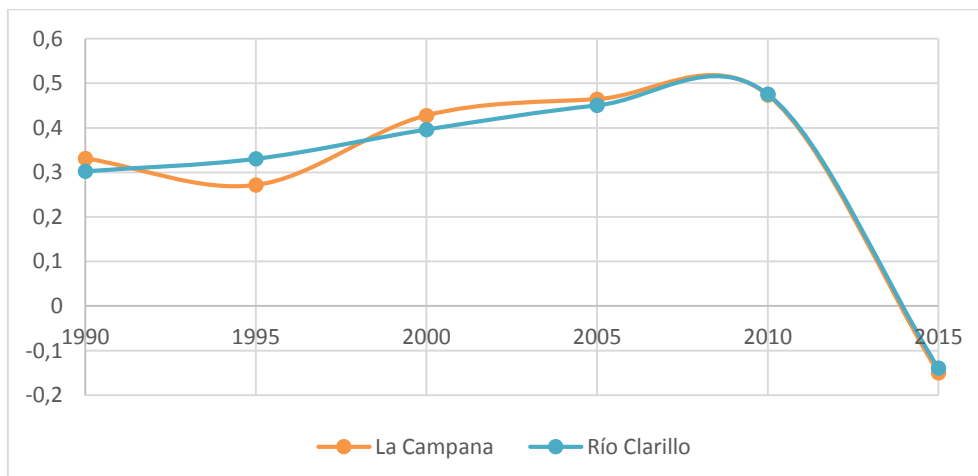
La tendencia del comportamiento temporal del indicador, entre el periodo 1990 – 2015, se muestra de manera resumida para cada AP-SNASPE en la Tabla 17. Así también, es posible visualizar la tendencia en el Gráfico 2 y en la cartografía asociada. Al respecto, en el gráfico es posible observar que ambas AP-SNASPE siguen tendencias similares, dentro de lo que es crucial remarcar la importante disminución del vigor vegetacional entre los años 2010 y 2015.

Tabla 17. Resultados obtenidos para el VVABN. Periodo 1990 – 2015.

| AP-SNASPE | VVABN | | | | | |
|-----------------|----------|---------|----------|----------|----------|-----------|
| | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 | 2015 |
| PN La Campana | 0,331441 | 0,27145 | 0,427708 | 0,464149 | 0,473548 | -0,149698 |
| RN Río Clarillo | 0,302489 | 0,33053 | 0,396269 | 0,450479 | 0,475896 | -0,13937 |

Fuente: CIT-UAI, 2015.

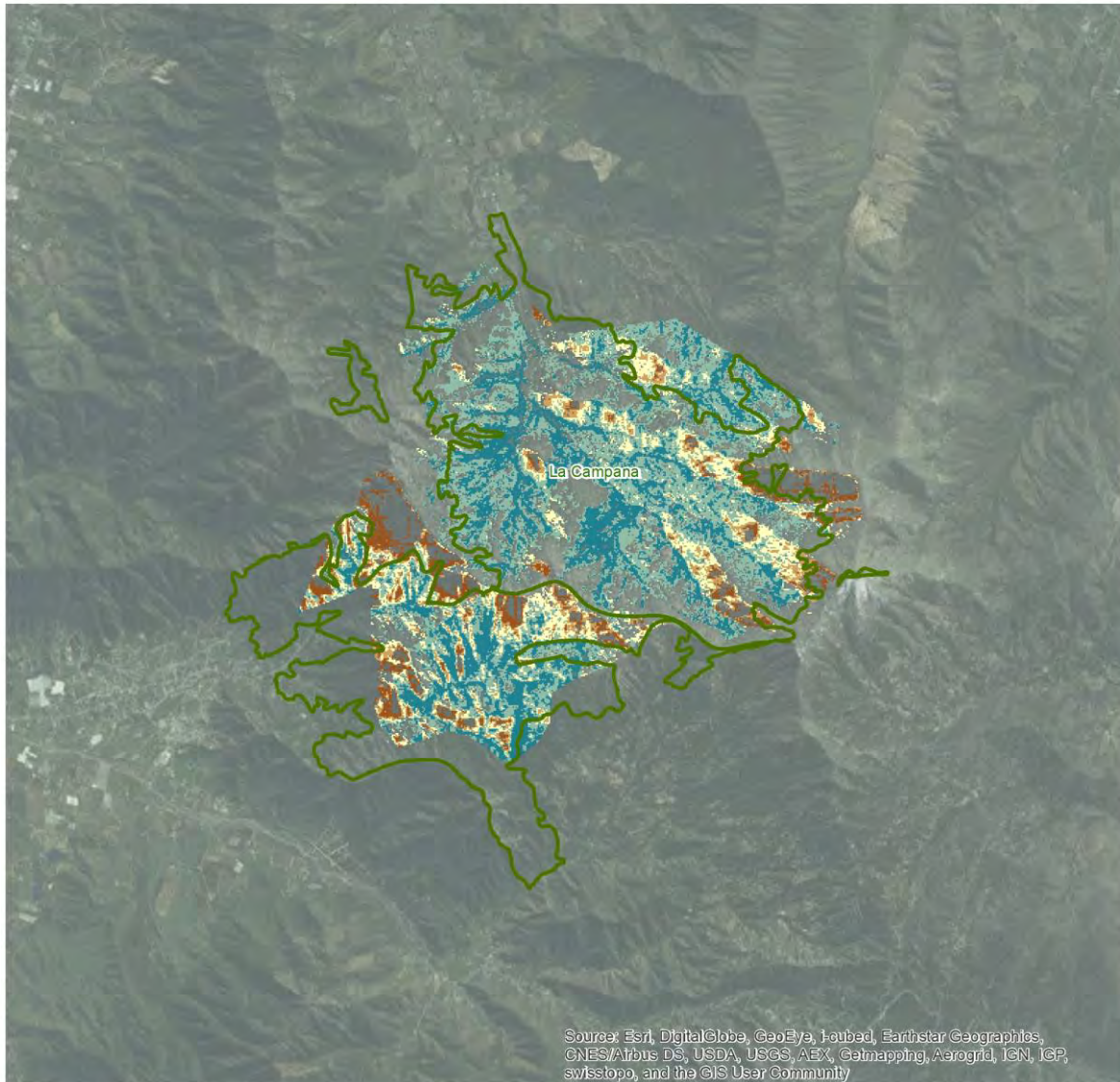
Gráfico 2. Comportamiento temporal y tendencias lineales del VVABN. Periodo 1990 – 2015.



Fuente: CIT-UAI, 2015.

INDICADORES AMBIENTALES - VIGOR BOSQUE NATIVO

Área de Estudio: La Campana | 1990



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Simbología

Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

SNASPE

VVABN - Indicador Vigor Bosque Nativo

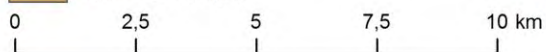
-0,79 - -0,05 (Muy Bajo)

-0,04 - 0,15 (Bajo)

0,16 - 0,32 (Medio)

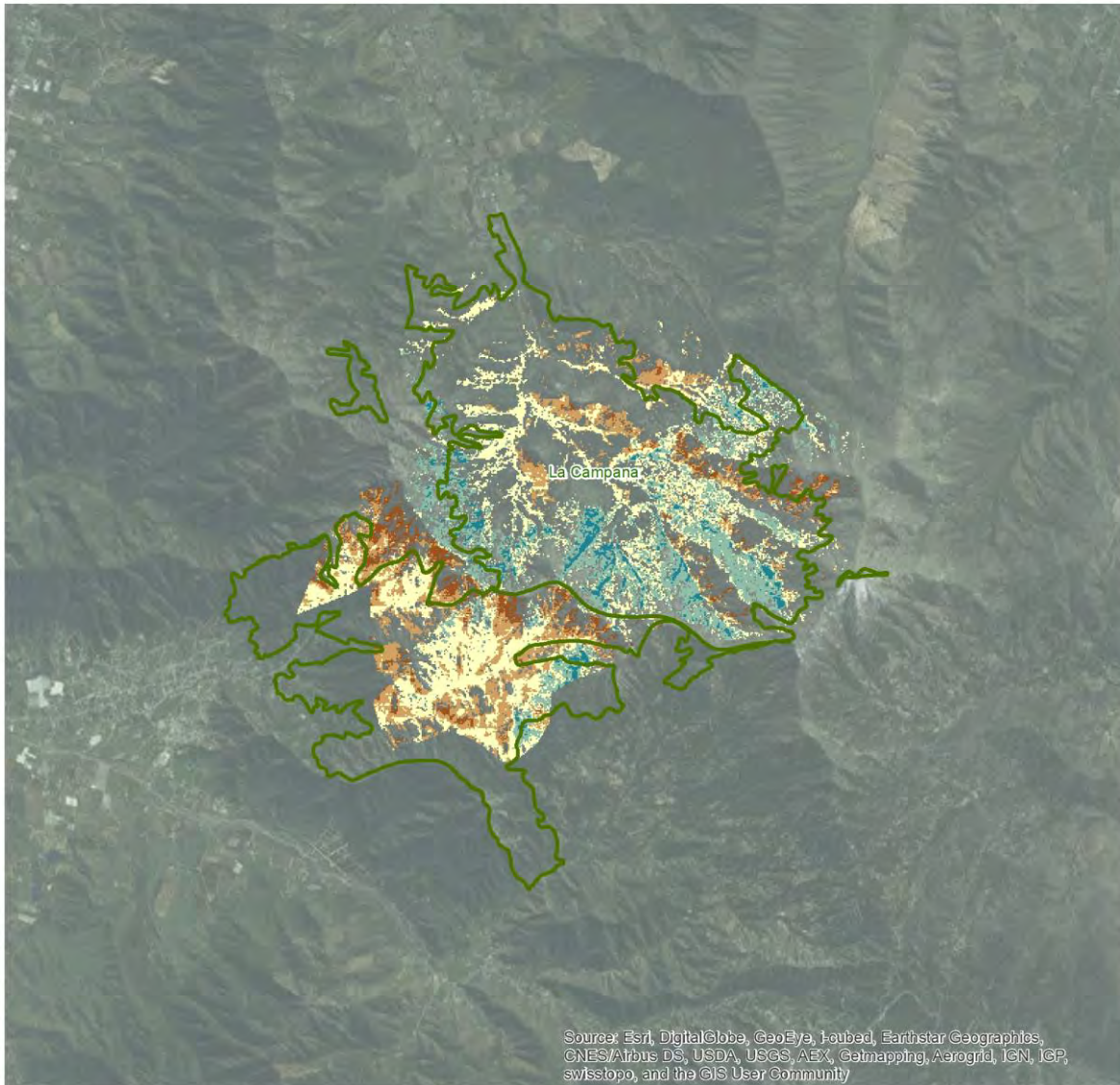
0,33 - 0,44 (Alto)

0,45 - 0,68 (Muy Alto)



INDICADORES AMBIENTALES - VIGOR BOSQUE NATIVO

Área de Estudio: La Campana | 1995



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Simbología

Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

SNASPE

0,24 - 0,32 (Medio)

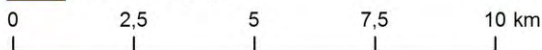
VVABN - Indicador Vigor Bosque Nativo

0,33 - 0,42 (Alto)

-0,33 - 0,14 (Muy Bajo)

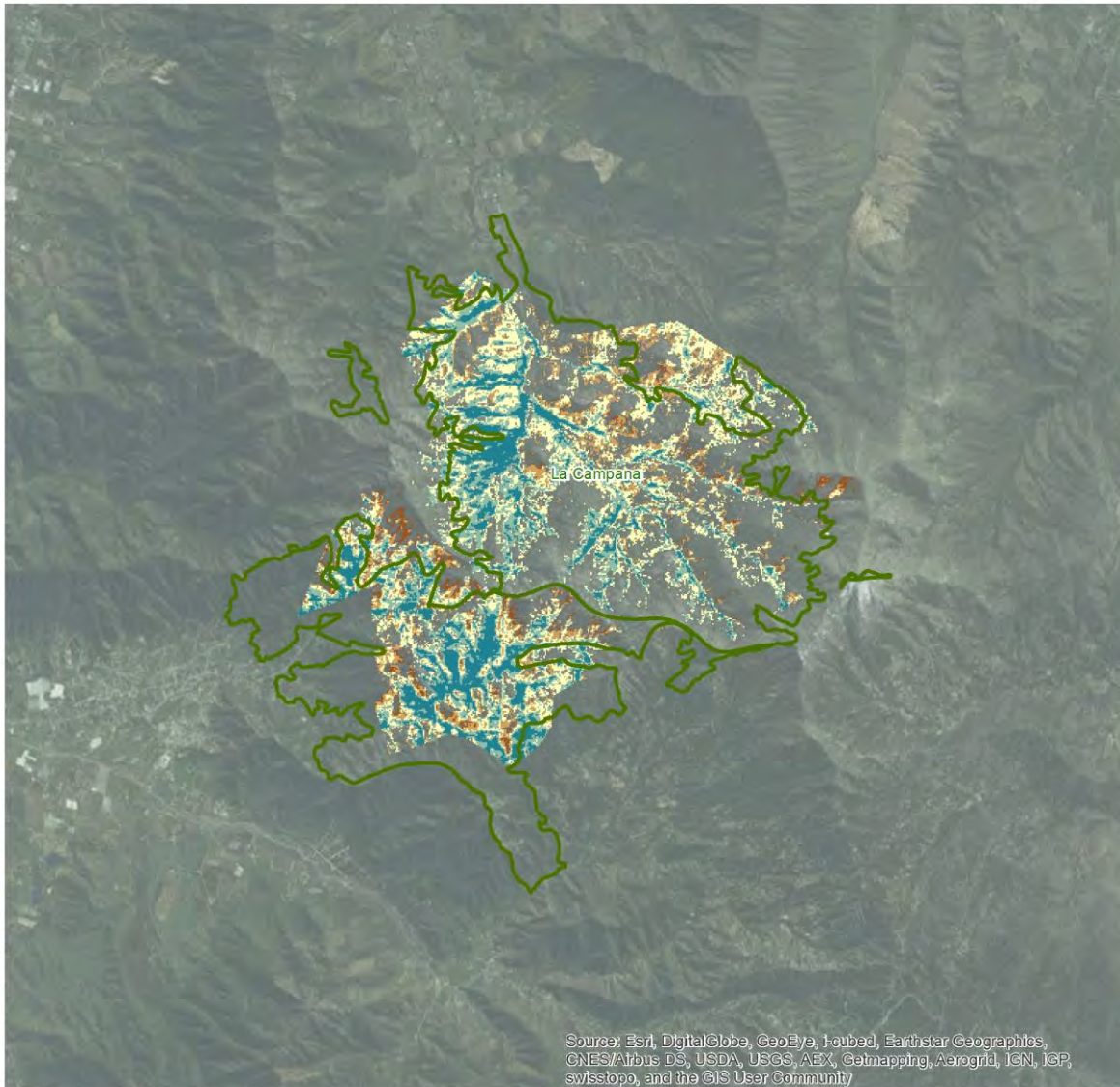
0,43 - 0,74 (Muy Alto)

0,15 - 0,23 (Bajo)



INDICADORES AMBIENTALES - VIGOR BOSQUE NATIVO

Área de Estudio: La Campana | 2000



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Simbología

SNASPE

VVABN - Indicador Vigor Bosque Nativo

-0,04 - 0,26 (Muy Bajo)

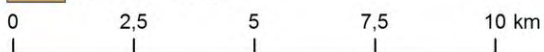
0,27 - 0,35 (Bajo)

0,36 - 0,43 (Medio)

0,44 - 0,51 (Alto)

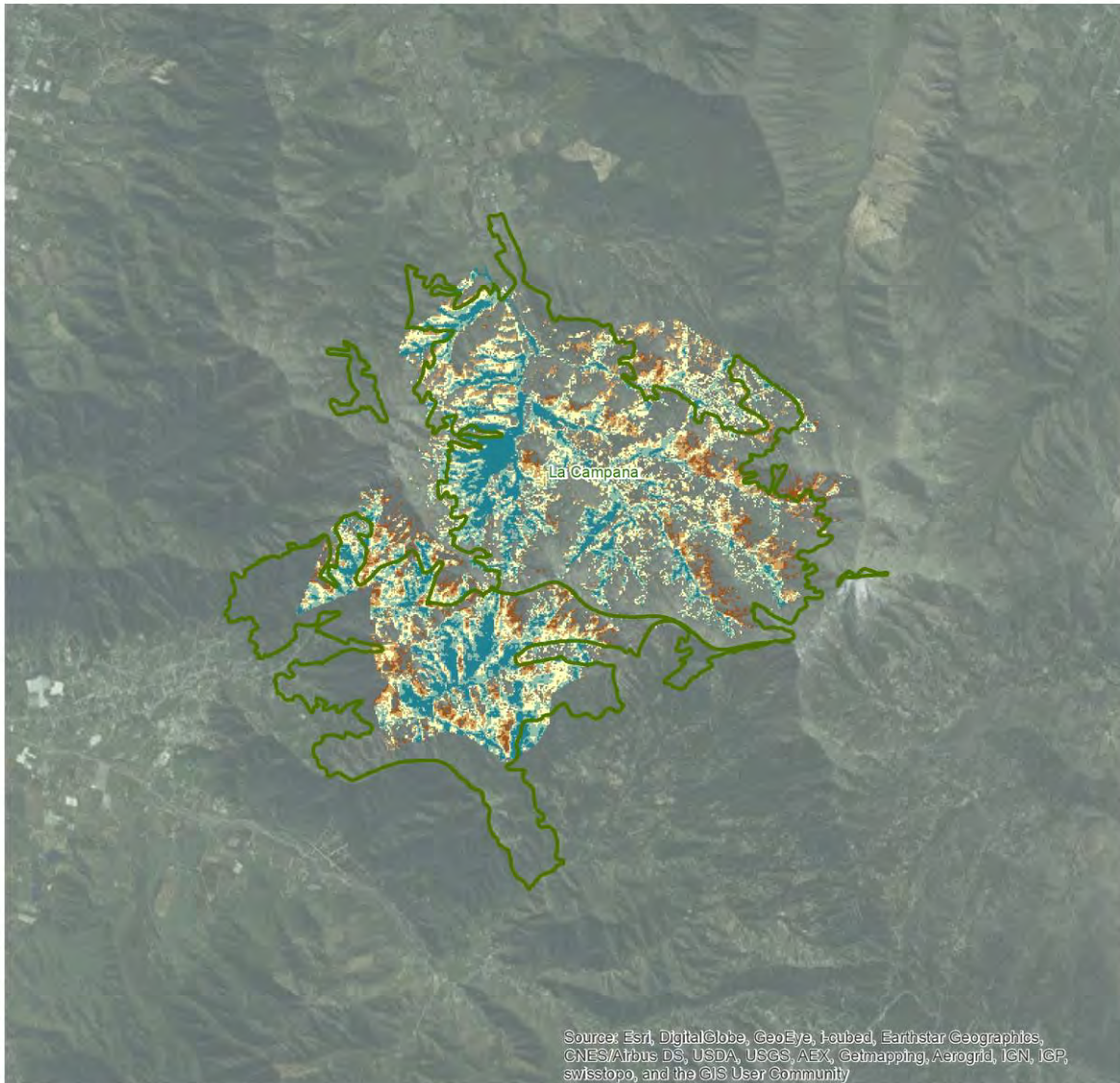
0,52 - 0,73 (Muy Alto)

Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat



INDICADORES AMBIENTALES - VIGOR BOSQUE NATIVO

Área de Estudio: La Campana | 2005



Simbología

SNASPE

VVABN - Indicador Vigor Bosque Nativo

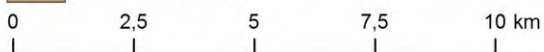
0,09 - 0,33 (Muy Bajo)

0,34 - 0,41 (Bajo)

0,42 - 0,47 (Medio)

0,48 - 0,54 (Alto)

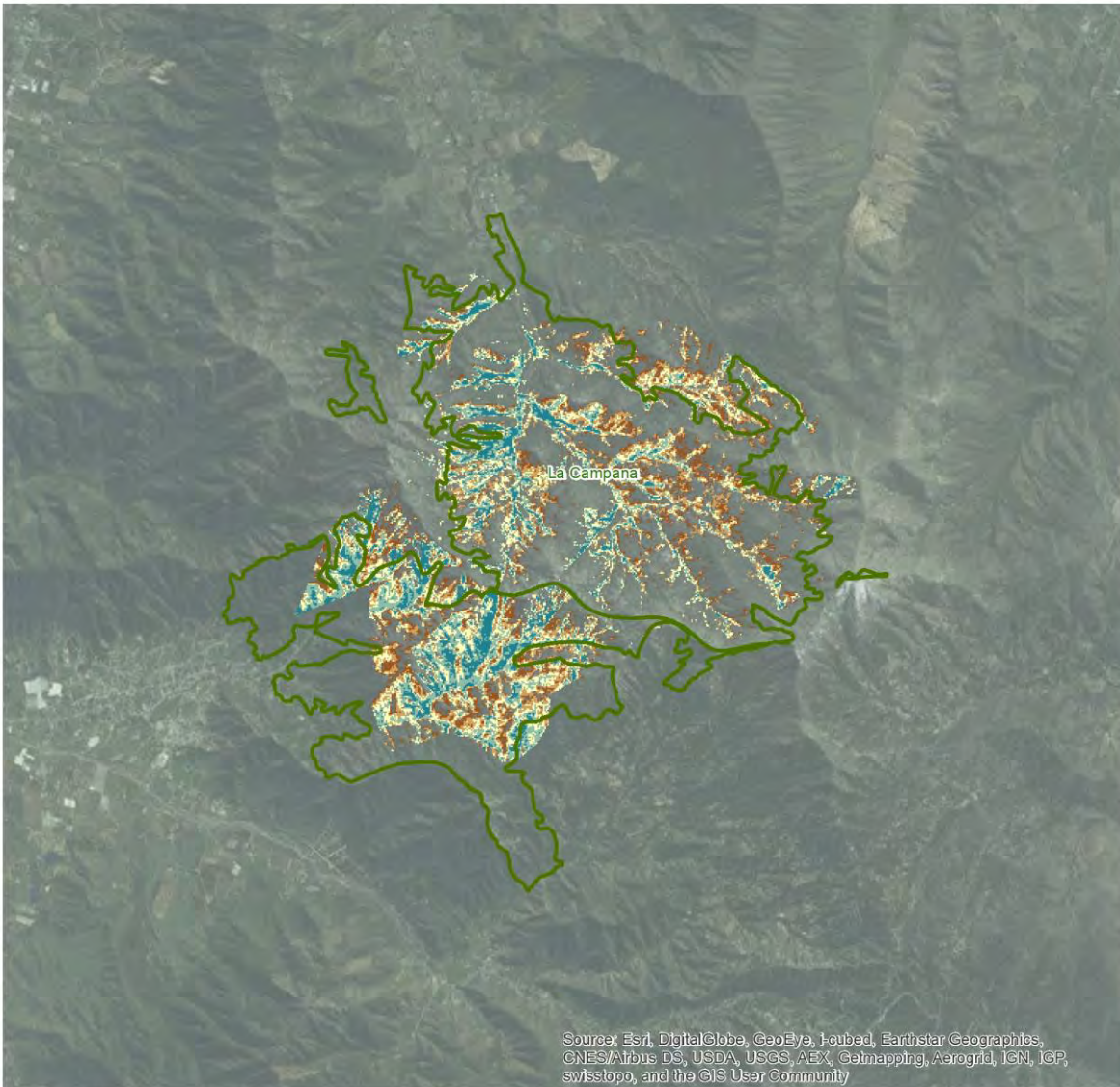
0,55 - 0,74 (Muy Alto)



Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

INDICADORES AMBIENTALES - VIGOR BOSQUE NATIVO

Área de Estudio: La Campana | 2010



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Simbología

SNASPE

VVABN - Indicador Vigor Bosque Nativo

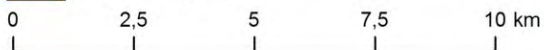
0,28 - 0,4 (Muy Bajo)

0,41 - 0,45 (Bajo)

0,46 - 0,5 (Medio)

0,51 - 0,55 (Alto)

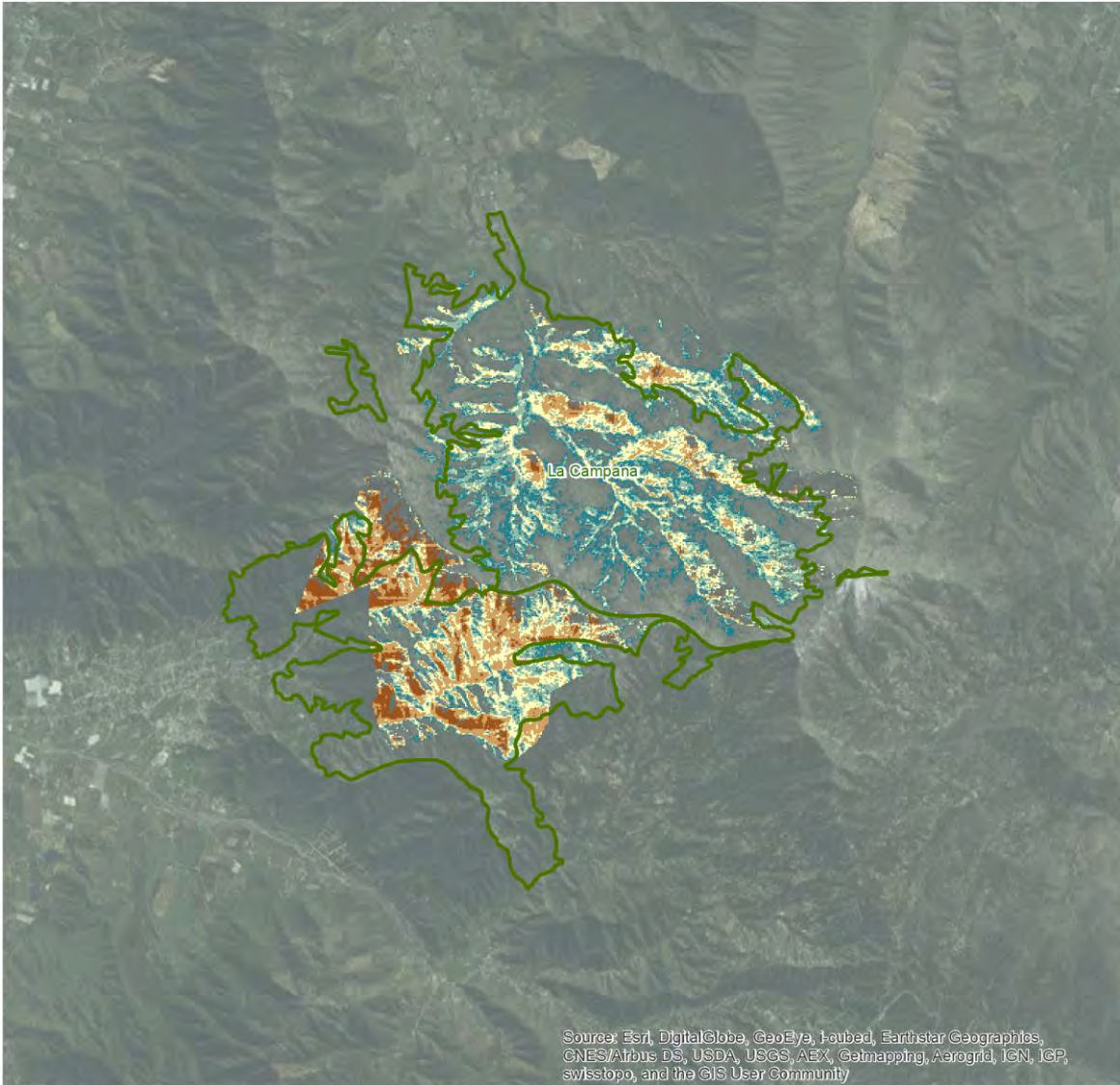
0,56 - 0,68 (Muy Alto)



Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

INDICADORES AMBIENTALES - VIGOR BOSQUE NATIVO

Área de Estudio: La Campana | 2015



Simbología

SNASPE

VVABN - Indicador Vigor Bosque Nativo

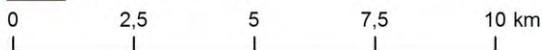
-0,61 - -0,26 (Muy Bajo)

-0,25 - -0,19 (Bajo)

-0,18 - -0,14 (Medio)

-0,13 - -0,08 (Alto)

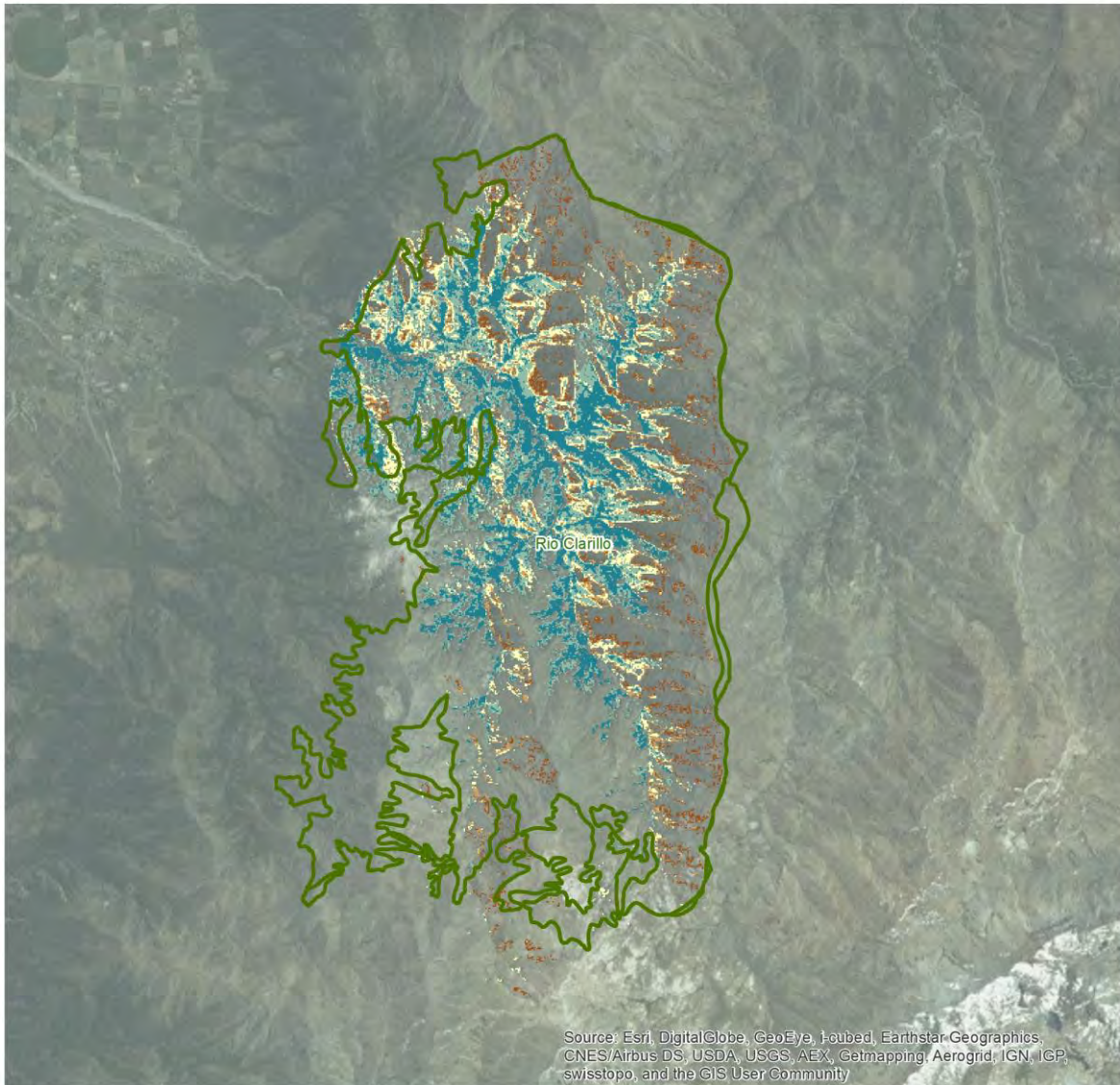
-0,07 - 0,02 (Muy Alto)



Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

INDICADORES AMBIENTALES - VIGOR BOSQUE NATIVO

Área de Estudio: Río Clarillo | 1990



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, I-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Simbología

Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

SNASPE

VVABN - Indicador Vigor Bosque Nativo

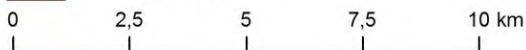
-0,79 - -0,05 (Muy Bajo)

-0,04 - 0,15 (Bajo)

0,16 - 0,32 (Medio)

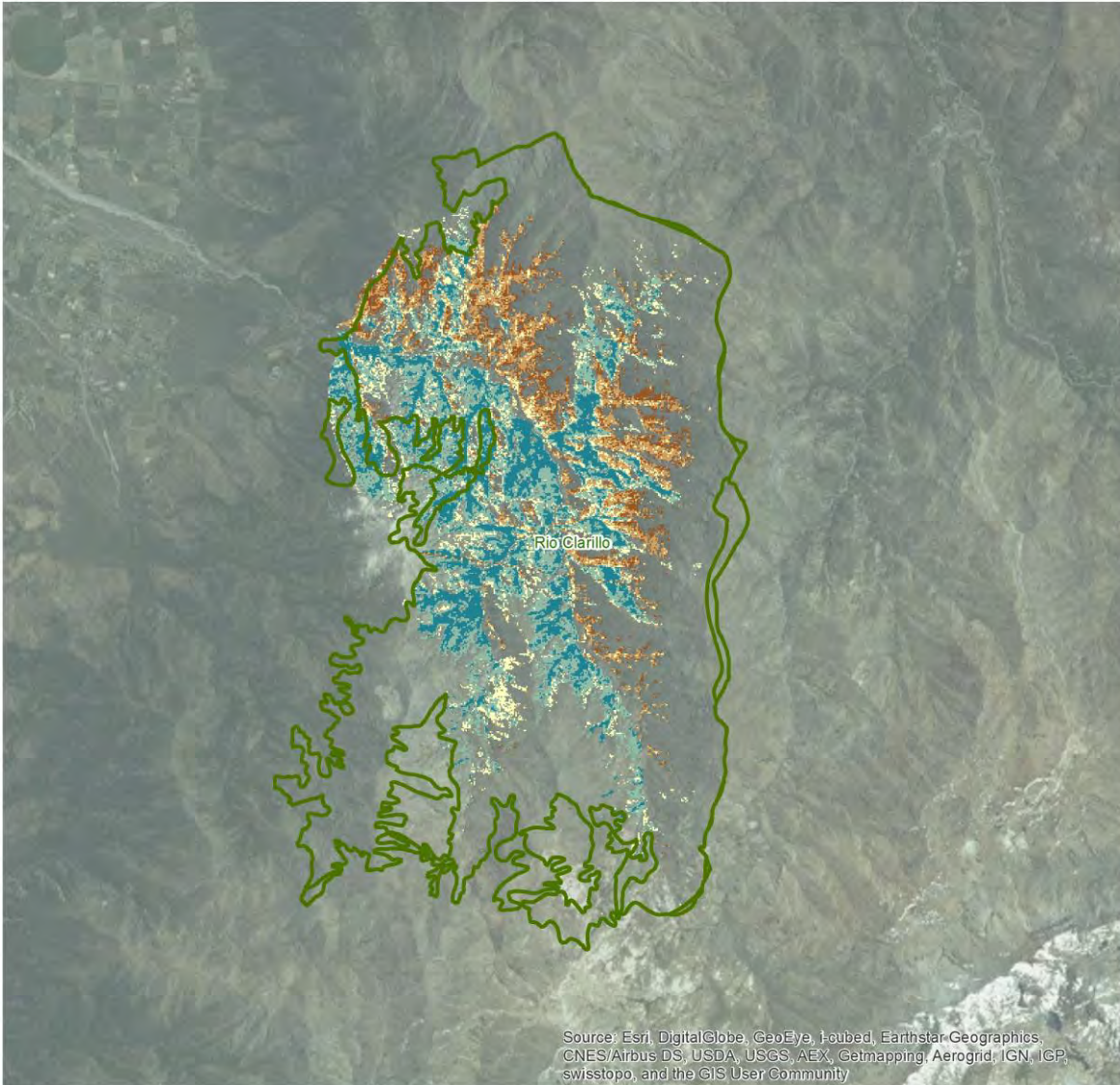
0,33 - 0,44 (Alto)

0,45 - 0,68 (Muy Alto)



INDICADORES AMBIENTALES - VIGOR BOSQUE NATIVO

Área de Estudio: Río Clarillo | 1995



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Simbología

SNASPE

VVABN - Indicador Vigor Bosque Nativo

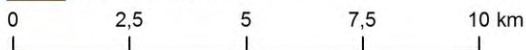
-0,33 - 0,14 (Muy Bajo)

0,15 - 0,23 (Bajo)

0,24 - 0,32 (Medio)

0,33 - 0,42 (Alto)

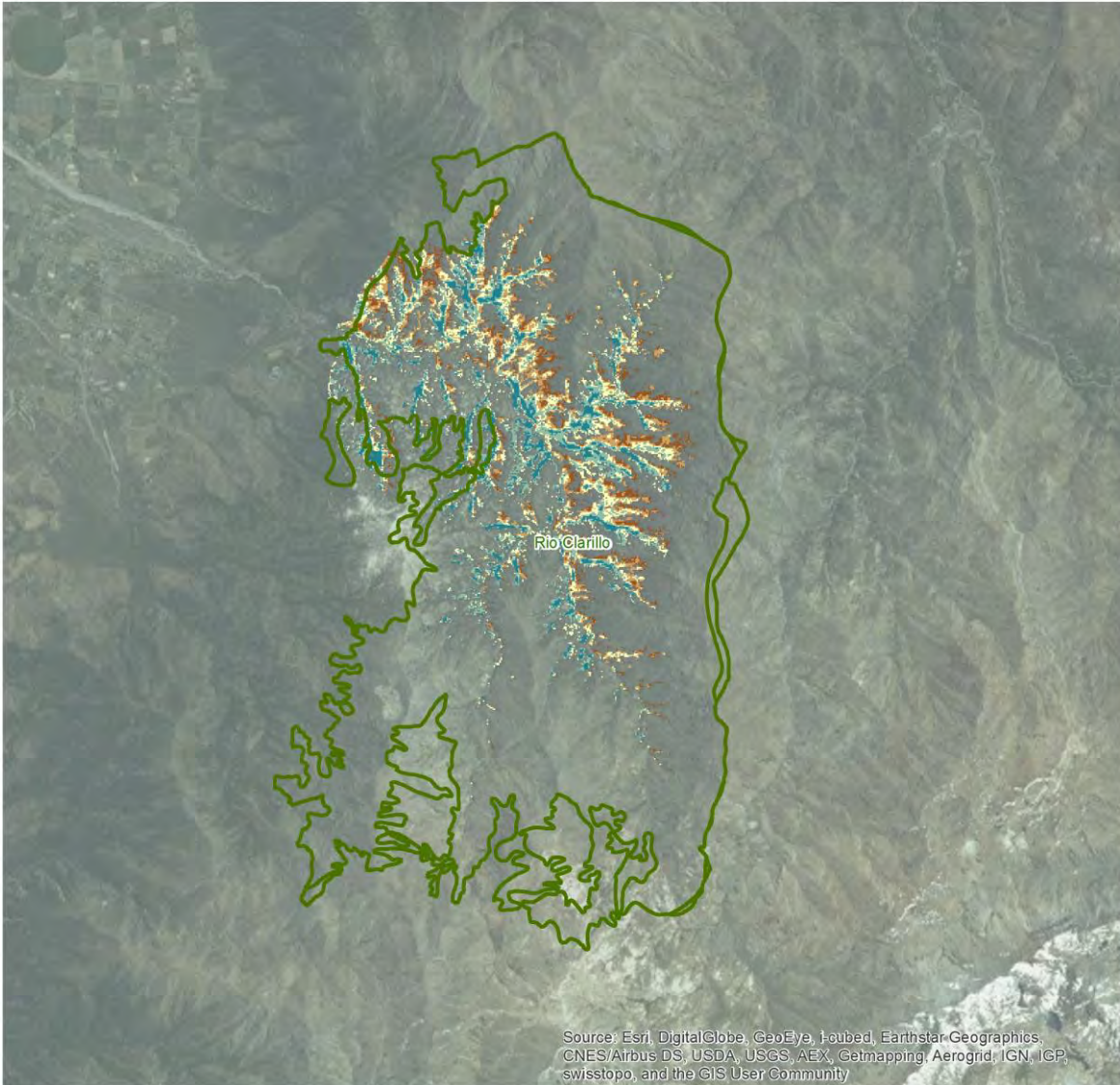
0,43 - 0,74 (Muy Alto)



Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

INDICADORES AMBIENTALES - VIGOR BOSQUE NATIVO

Área de Estudio: Río Clarillo | 2000



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Simbología

SNASPE

VVABN - Indicador Vigor Bosque Nativo

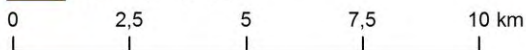
-0,04 - 0,26 (Muy Bajo)

0,27 - 0,35 (Bajo)

0,36 - 0,43 (Medio)

0,44 - 0,51 (Alto)

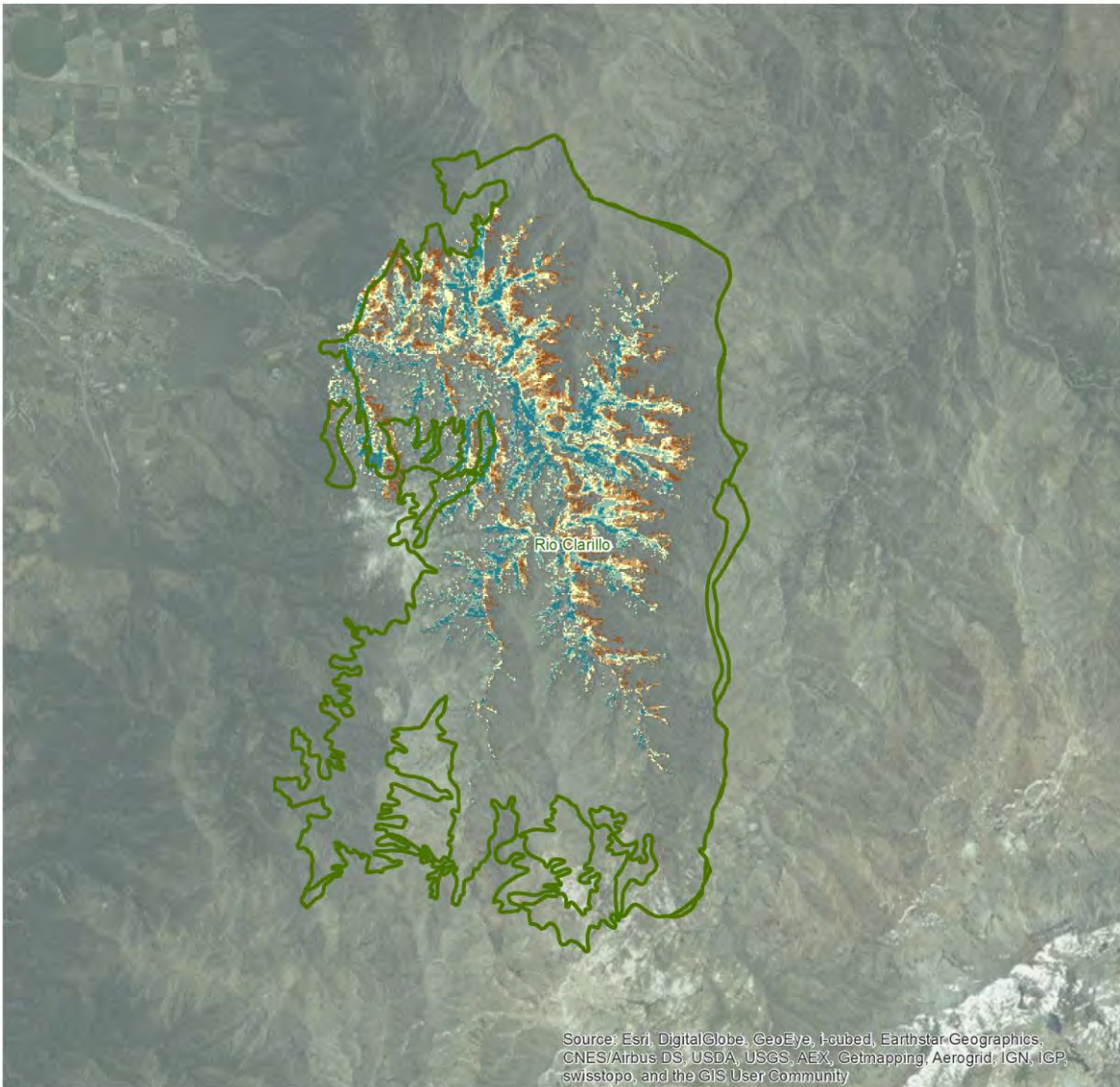
0,52 - 0,73 (Muy Alto)



Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

INDICADORES AMBIENTALES - VIGOR BOSQUE NATIVO

Área de Estudio: Río Clarillo | 2005



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Simbología

SNASPE

VVABN - Indicador Vigor Bosque Nativo

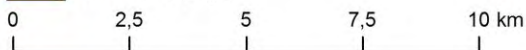
0,09 - 0,33 (Muy Bajo)

0,34 - 0,41 (Bajo)

0,42 - 0,47 (Medio)

0,48 - 0,54 (Alto)

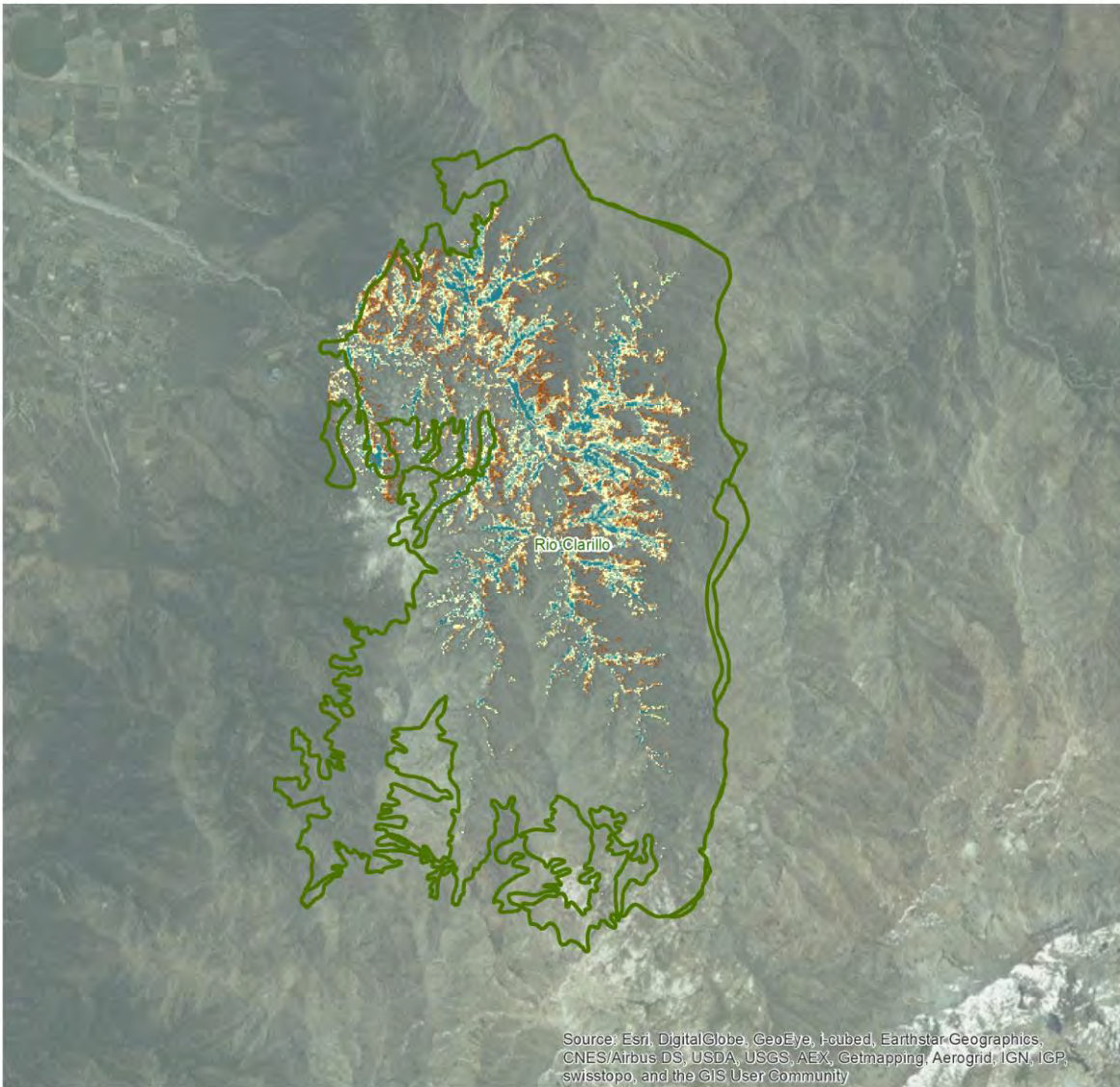
0,55 - 0,74 (Muy Alto)



Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

INDICADORES AMBIENTALES - VIGOR BOSQUE NATIVO

Área de Estudio: Río Clarillo | 2010



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Simbología

SNASPE

VVABN - Indicador Vigor Bosque Nativo

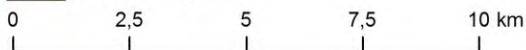
0,28 - 0,4 (Muy Bajo)

0,41 - 0,45 (Bajo)

0,46 - 0,5 (Medio)

0,51 - 0,55 (Alto)

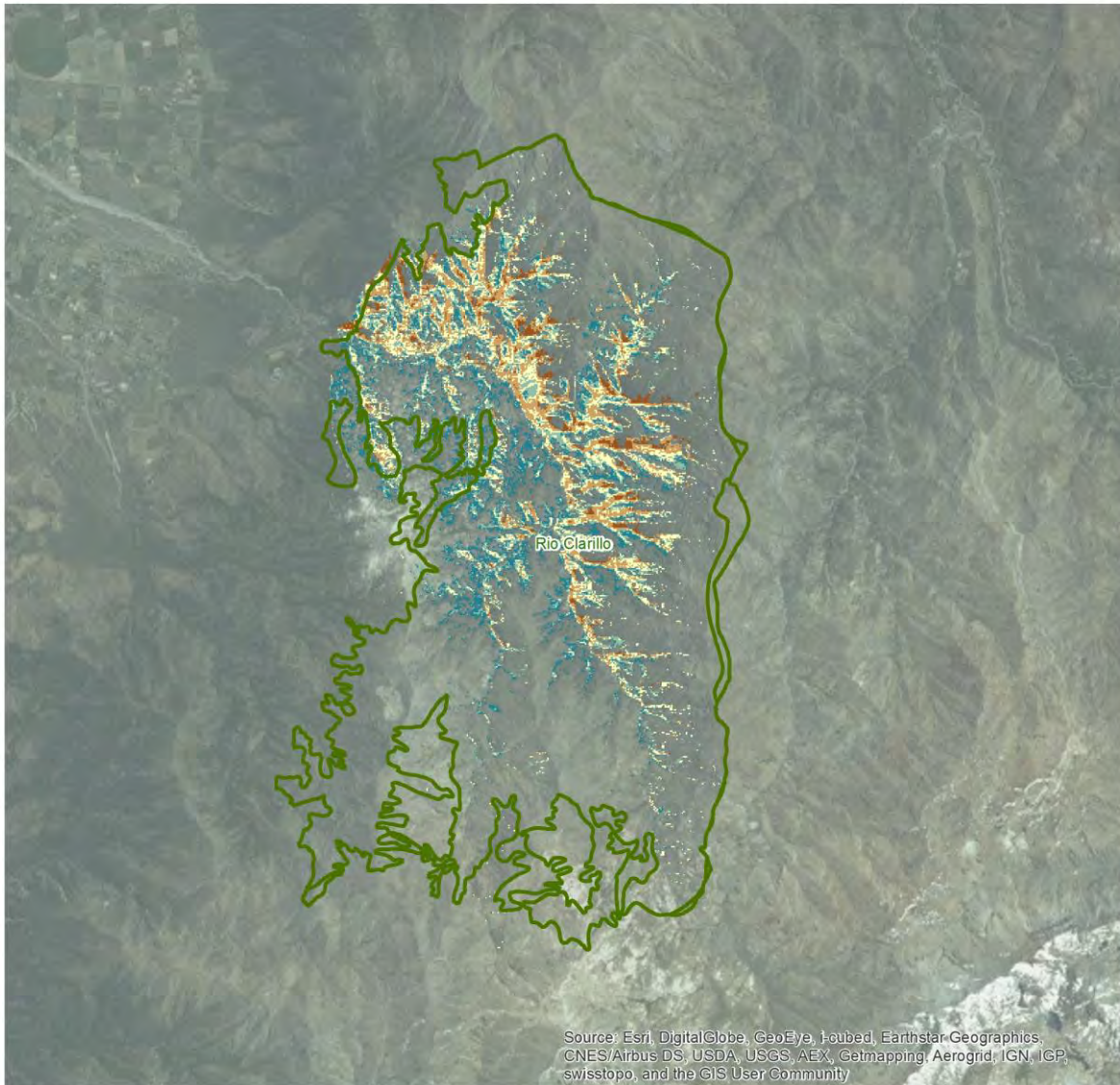
0,56 - 0,68 (Muy Alto)



Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

INDICADORES AMBIENTALES - VIGOR BOSQUE NATIVO

Área de Estudio: Río Clarillo | 2015



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Simbología

SNASPE

VVABN - Indicador Vigor Bosque Nativo

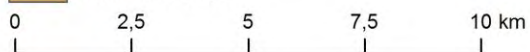
-0,61 - -0,26 (Muy Bajo)

-0,25 - -0,19 (Bajo)

-0,18 - -0,14 (Medio)

-0,13 - -0,08 (Alto)

-0,07 - 0,02 (Muy Alto)



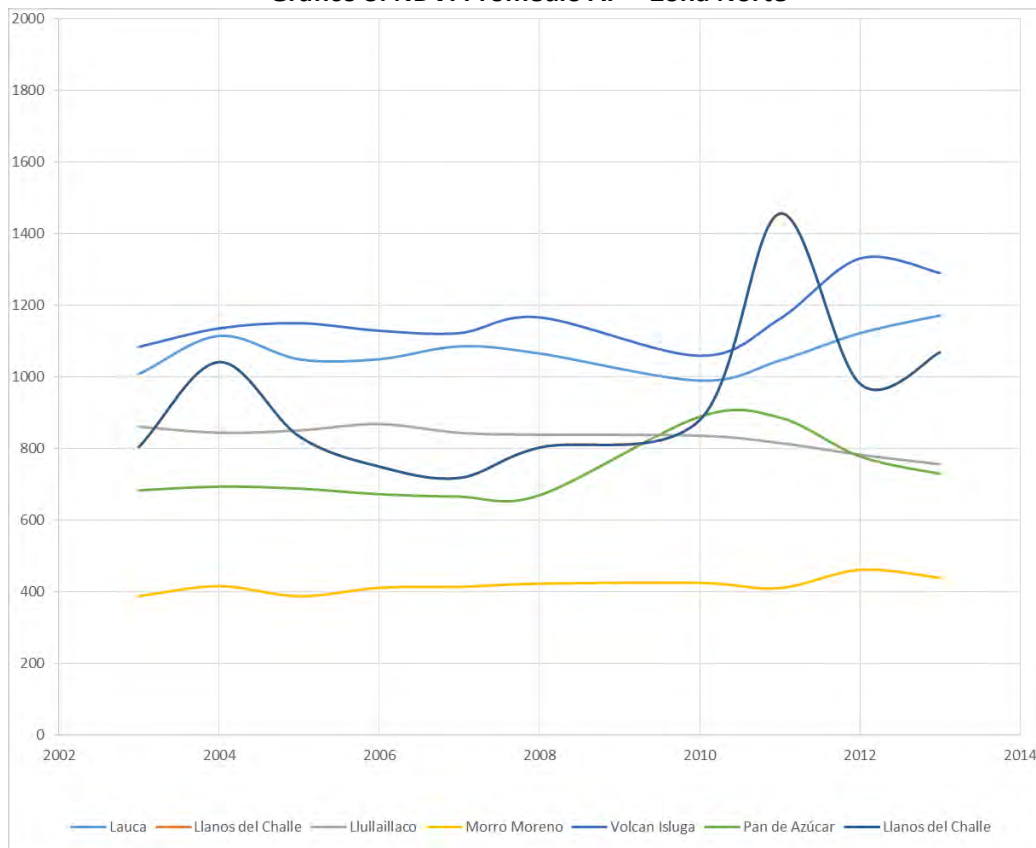
Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

2.3 Tendencias Anuales de NDVI para Áreas Protegidas (MODIS)

Tal y como se indicó en el apartado metodológico, se realizó un cálculo de las tendencias del NDVI para las áreas protegidas, tomando en consideración la totalidad de áreas protegidas en formato Shapefile por parte del Ministerio de Medio Ambiente. Esto corresponde a: 16 monumentos nacionales, 40 parques nacionales, 22 reservas forestales y 26 reservas nacionales, considerando un rango temporal entre el año 2003 y 2012 (2013 para zonas con imágenes disponibles).

El resultado será entregado en formato de base de datos, en conjunto con el componente NDVI de Modis para todo el país. No obstante, dado que mostrar el resultado de los 106 polígonos no es posible en un gráfico resumen, es que se procederá a filtrar las áreas protegidas, partiendo desde el filtro inicial de las priorizadas por el MMA¹⁷, para realizar algunos gráficos específicos¹⁸.

Gráfico 3. NDVI Promedio AP – Zona Norte



Fuente: CIT-UAJ, 2015.

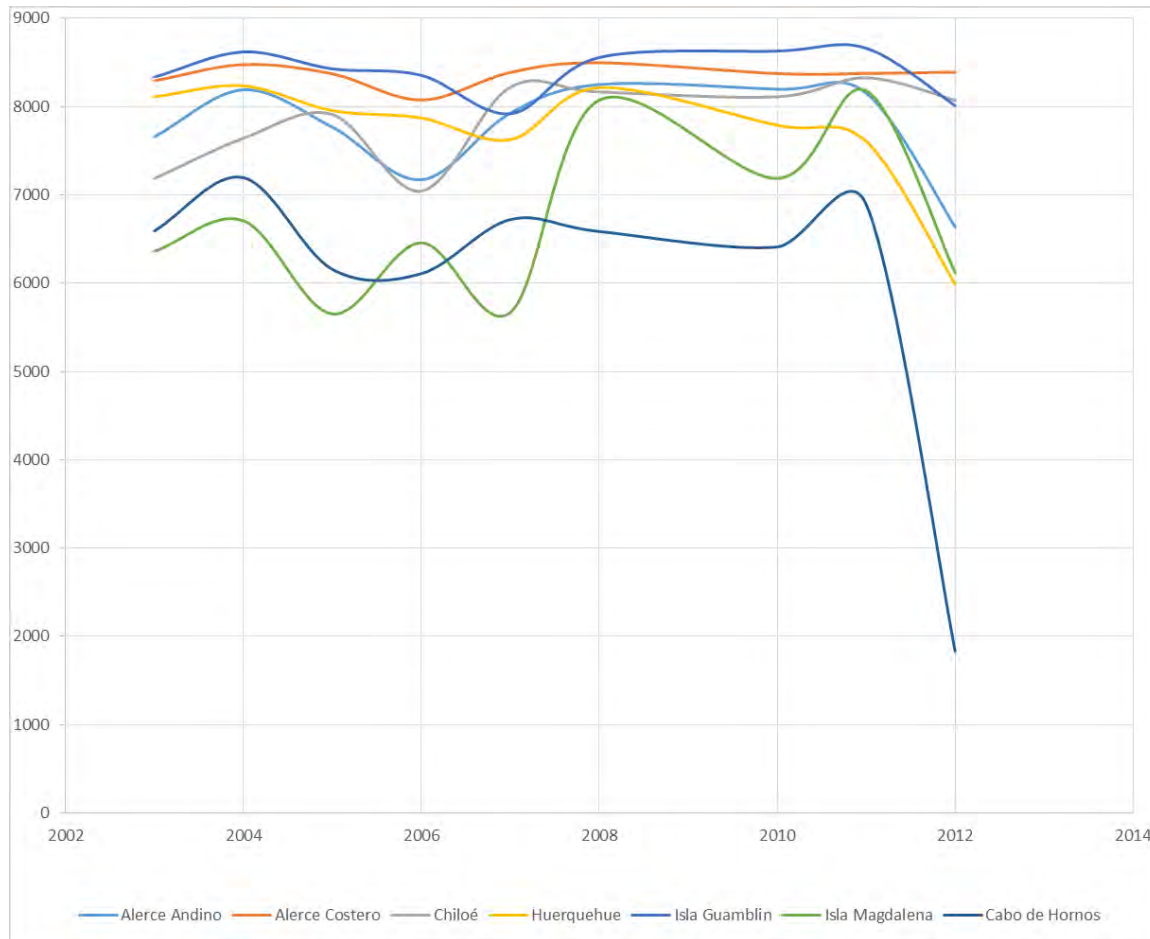
Una primera aproximación al análisis es parcelar los promedios totales menores a 1000, esto da por resultados emplazamientos geográficos en la zona norte del país, en dónde además los comportamientos

¹⁷ Con la excepción del Parque nacional Rapa Nui y Archipiélago Juan Fernández, debido a no contar con imágenes del sensor Modis para esta zona.

¹⁸ Para más detalles ver resultados en Excel.

anuales son bastante regulares; la excepción es el parque Llanos de Challe, asociable a su localización costera, sin embargo esta situación no se da con tanta claridad para Pan de Azúcar.

Gráfico 4. NDVI Promedio AP – Zona Sur



Fuente: CIT-UAI, 2015.

En los promedios superiores se destacan los parques de la zona sur del país, con valores anuales promedio de NDVI (no corregido) entre 6.000 y 9000. Llama la atención que a pesar de tener tendencias relativamente parecidas (con excepciones como Huerquehuë, localización más al norte) Cabo de Hornos presenta una caída exageradamente alta, situación que hace necesario revisar con más detalle (Landsat) el comportamiento de esta área protegida.

Finalmente se tomó promedios generales menos extremos, lo que da una distribución más amplia en torno a la zona central de Chile.

Gráfico 5. NDVI Promedio AP (Promedios Intermedios)



Fuente: CIT-UAI, 2015.

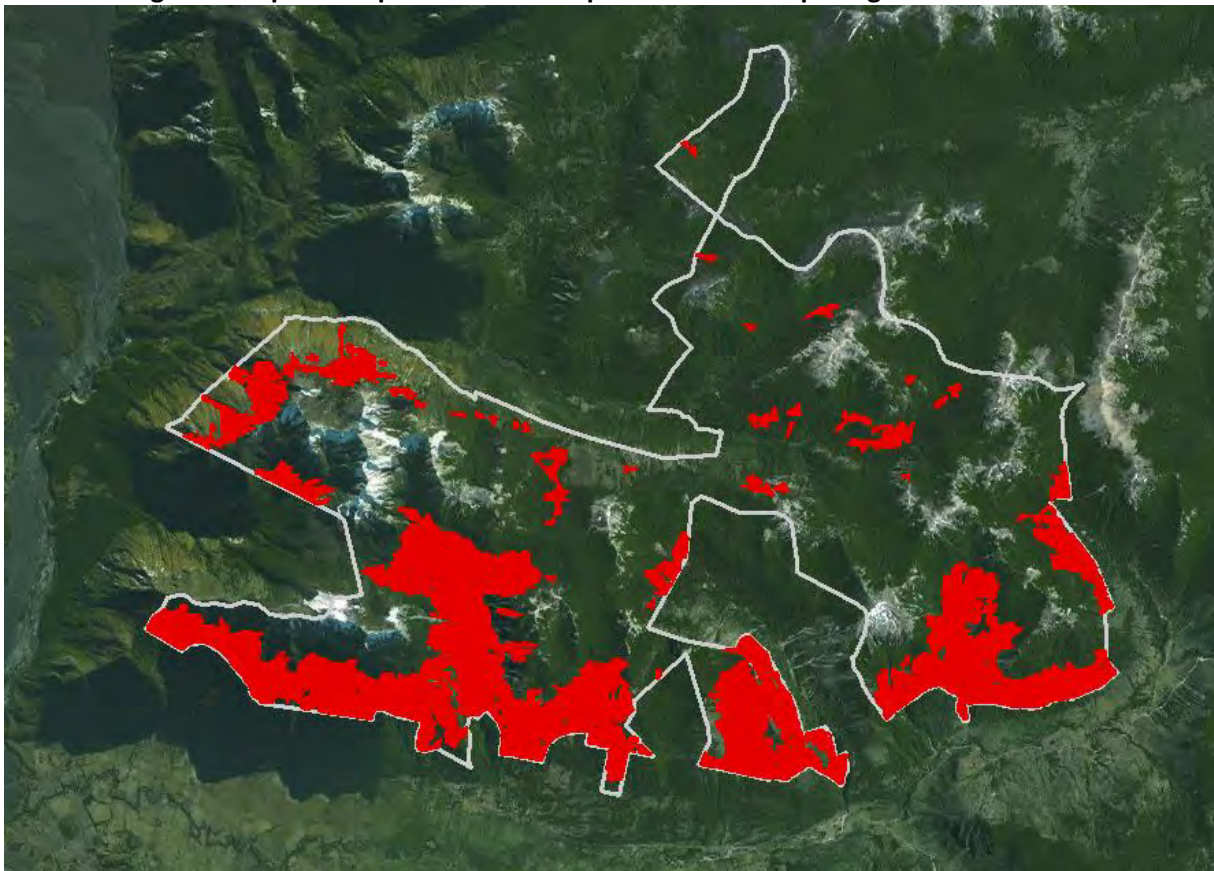
El comportamiento en general sigue un comportamiento general, con importantes caídas en el NDVI para el año 2012, con la excepción del Parque Nacional la Campana.

2.4 Superficie anual del bosque nativo incendiada: Caso de Estudio Conguillío y China Muerta.

Tal y como se indicó inicialmente la superficie anual de bosque quemado debe calcularse considerando imágenes consecutivas o con un lapso de tiempo relativamente cercano; por esta razón inicialmente se decidió omitir el indicador si se consideraba el levantamiento exclusivo para imágenes en periodos quinquenales. No obstante, con el fin de tener una representación del indicador de manera formal, es que se realizó el cálculo tomando imágenes Landsat 8 para los años 2014 y 2015, respectivamente y tomando como emplazamiento un lugar con un incidente claramente conocido (zona y fecha). De esta manera se caracteriza las áreas protegidas correspondientes a China Muerta y Conguillío.

Aun así, el indicador para estimar la superficie quemada por incendios, el Normalized Burn Ratio (NBR) para el incendio de China Muerta en marzo del presente año presenta principalmente una gran dificultad, la cual es no contar con una zona de entrenamiento o contraste. Por un lado al no conocer las dimensiones del incendio mismo (Conaf nunca publica los mapas de incendios forestales y calculan la superficie con "expertos en terreno") ni tampoco contando con imágenes de Google Earth que nos permita contrastar por lo menos visualmente el daño en el terreno, no es posible cotejar los resultados obtenidos por el indicador.

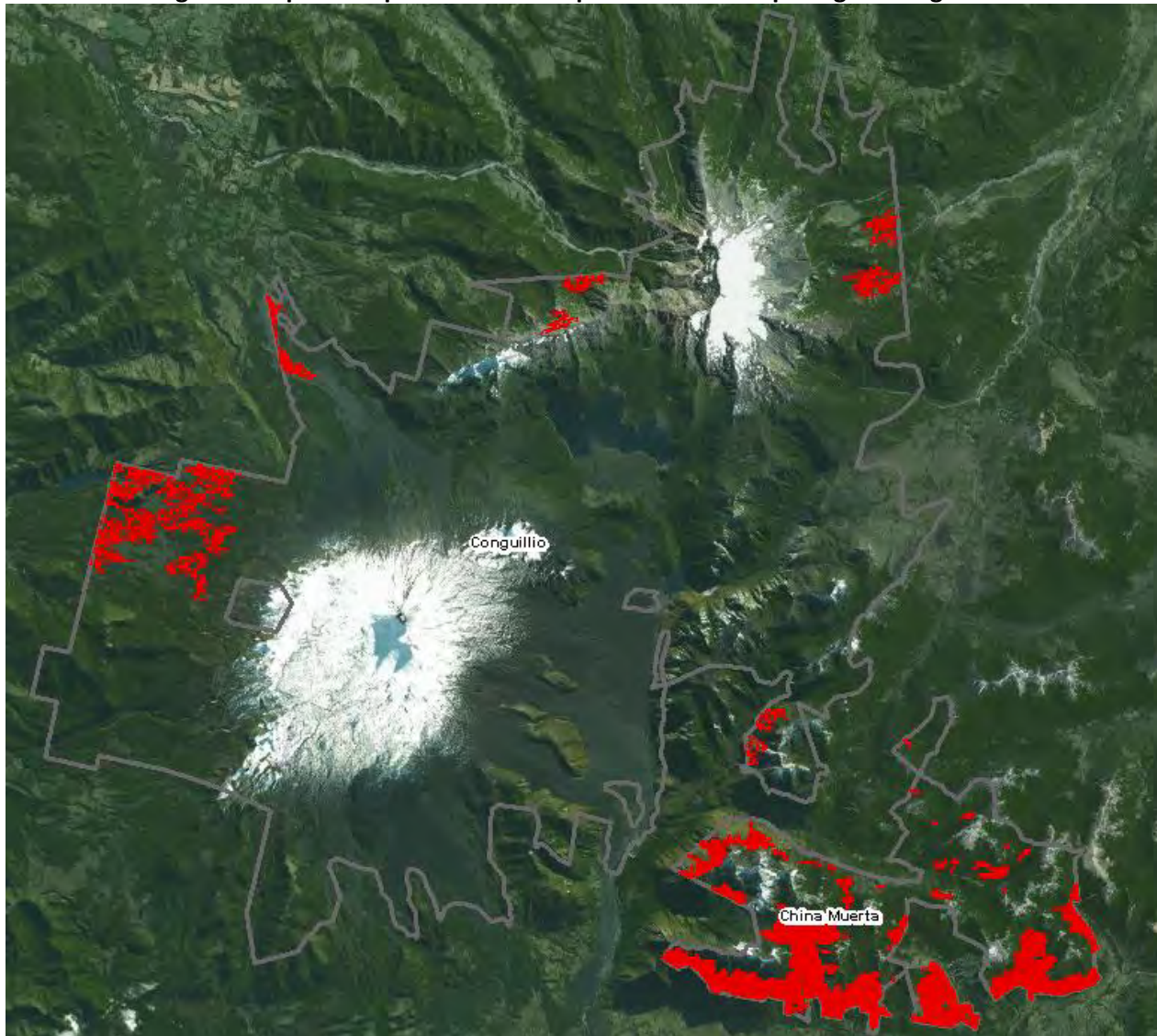
Figura 3. Superficie quemada del bosque nativo – Área protegida China Muerta



Fuente: CIT-UAI, 2015.

De igual manera se calculó y presenta resultados interesante en cuencas determinadas y sectores cuya distribución tienen coherencia con respecto a la distribución normal en un incendio y el respectivo comportamiento del evento. En el indicador resultante, se puede observar que un gran porcentaje de la Reserva China Muerta se ve afectada por el evento y el indicador se muestra agrupado y consolidado.

Figura 4. Superficie quemada del bosque nativo – Área protegida Conguillío.



Fuente: CIT-UAI, 2015.

En el Parque Nacional Conguillío se observa una dispersión mucho mayor, en diversos lugares del parque, lo que sin una máscara o un lugar confiable que muestre los focos del incendio, puede corresponder a esto como pueden ser suelos erosionados o quemados por otras circunstancias durante el año. Se observa un foco reducido al sureste del Parque, muy cercano a la Reserva China Muerta que por el tamaño y cercanía es muy probable que sea el terreno arrasado por el evento señalado.

Aun así los registros de prensa señalan un área relativamente menor para Conguillío, lo que es en parte, consistente con los resultados obtenidos.

Es importante destacar que respecto a los registros de prensa disponibles¹⁹, China Muerta fue el área protegida más afectada por parte del incendio y de acuerdo a la misma fuente, la superficie consumida por el siniestro coincide con la obtenida por el indicador.

Tabla 18. Resultados obtenidos para el NBR. Periodo 2014 – 2015 (Conguillío – China Muerta).

| AP-SNASPE | Superficie quemada (HA) |
|------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Parque Nacional Conguillío | 1.3361,6 |
| Reserva Nacional China Muerta | 2.071,3 |
| Parque Nacional Conguillío - Sector cercano a China Muerta | 81,5 |

Fuente: CIT-UAI, 2015.

¹⁹ “Conaf: Incendio en Melipeuco alcanzó al Parque Nacional Conguillío” Emol, 20 de marzo de 2005, disponible en: <http://www.emol.com/noticias/nacional/2015/03/20/708904/incendios-informe-de-onemi.html>

3. Indicador desarrollado para el ambiente marino costero

3.1 Calidad anual del agua de mar superficial (CAAMS)

Las tres variables físicas utilizadas, esto es la clorofila a, los sólidos en suspensión y la turbidez superficial del mar, fueron obtenidas por los correspondientes modelos 1 descritos para cada variable en la metodología. Esto solo para realizar la caracterización del CAAMS en los lugares seleccionados con la contraparte y obtener resultados comparativos. Los parámetros definidos y los modelos utilizados deben ser contrastados con la información sistematizada levantada en campañas de terreno, o la obtenida por fuentes oficiales (DIRINMAR, POAL, etc.), antes de ser seleccionados para generar al CAAMS.

La caracterización del indicador relativo a la calidad superficial de agua del mar se realizó en la región de Valparaíso, en diferentes zonas del litoral central, compuestos por puertos, sectores de descarga de centrales termoeléctricas, frente a zonas residenciales y los núcleos urbanos. En la Tabla 19 se pueden apreciar algunas referencias de los lugares escogidos:

Tabla 19. Bahías caracterizadas por el indicador marino costero.

| Tipo efluente | Sector | Coordenadas de referencia | |
|------------------------------------------|-----------------------|---------------------------|-------------|
| | | X | Y |
| Punto descarga centrales termoeléctricas | Quintero (Petropower) | 266.735,0 | 6.371.284,0 |
| | Concón (Petropower) | 265.330,6 | 6.355.098,9 |
| Localidades Litoral Central | Algarrobo | 251.475,8 | 6.305.529,7 |
| | El Quisco | 248.999,4 | 6.301.783,1 |
| | El Tabo | 251.941,5 | 6.294.798,1 |
| | Las Cruces | 256.191,6 | 6.290.172,2 |

Fuente: CIT-UAI, 2015.

3.2 CAAMS: resultados y tendencias. Periodo 1990 - 2015

Las tendencias observadas del indicador construido en los sectores seleccionados se sintetizan en la Tabla 20. En ella se pueden ver los diferentes valores que alcanza el indicador en el periodo analizado. En el Gráfico 6 son más evidentes los comportamientos diferenciados, según tipo de efluente. La unidad de medida del indicador es relativo, debido a que es necesario calibrar para obtener una unidad de medida real.

Tabla 20. Resultados obtenidos para el CAAMS. Periodo 1990 – 2015.

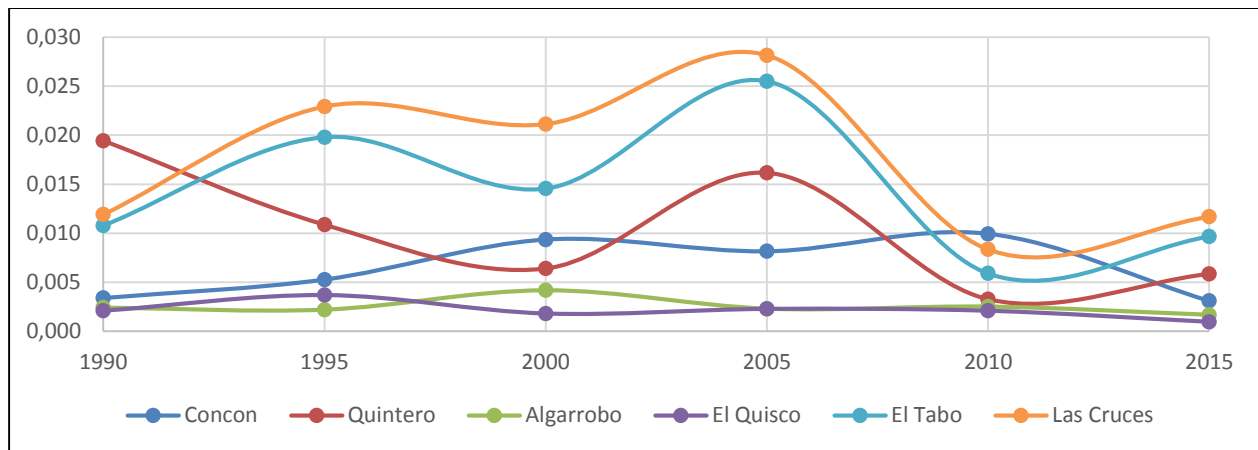
| Topónimo | CAAMS | | | | | |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 | 2015 |
| Concón | 0,0034 | 0,0053 | 0,0094 | 0,0082 | 0,0099 | 0,0031 |
| Quintero | 0,0194 | 0,0109 | 0,0064 | 0,0162 | 0,0033 | 0,0058 |

| Topónimo | CAAMS | | | | | |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 | 2015 |
| Algarrobo | 0,0024 | 0,0022 | 0,0042 | 0,0023 | 0,0025 | 0,0017 |
| El Quisco | 0,0021 | 0,0037 | 0,0018 | 0,0023 | 0,0021 | 0,0009 |
| El Tabo | 0,0108 | 0,0198 | 0,0146 | 0,0255 | 0,0059 | 0,0097 |
| Las Cruces | 0,0119 | 0,0229 | 0,0211 | 0,0282 | 0,0084 | 0,0117 |

Fuente: CIT-UAI, 2015.

En el Gráfico 6 se puede apreciar que La Cruces, El Tabo y Quintero son los sectores que alcanzan los valores más altos en el indicador, mientras que Algarrobo y El Quisco se mantienen en valores bajos. También se pueden observar que los ciclos en los evidenciados no son homogéneos en todos los sectores estudiados. Esto se aprecia en el caso del sector de Concón, contra cíclico a las zonas con altos valores durante la mayoría del periodo contemplado.

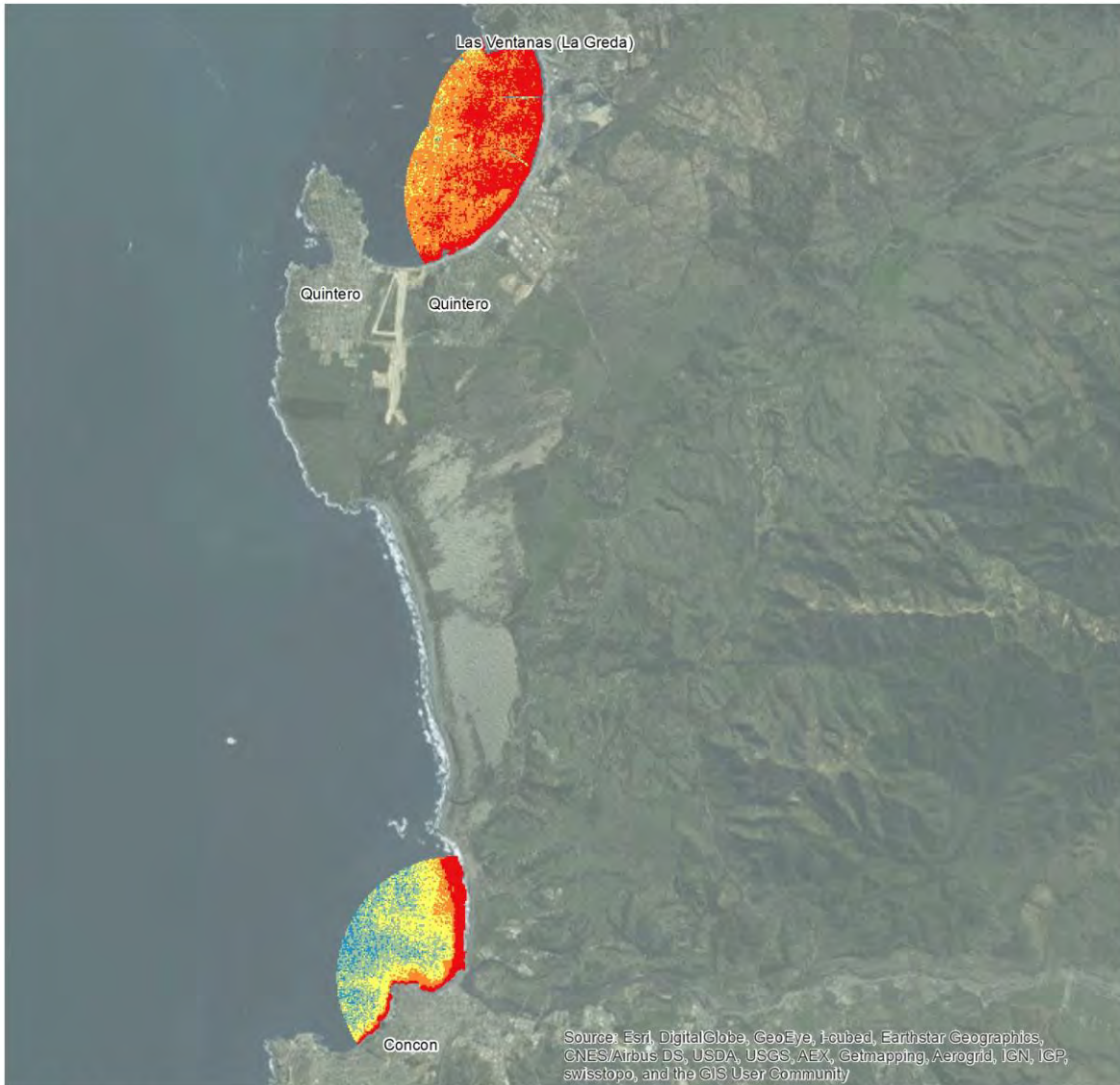
Gráfico 6. Comportamiento temporal y tendencias lineales del CAAMS. Periodo 1990 – 2015.



Fuente: CIT-UAI, 2015



INDICADORES AMBIENTALES - CALIDAD ANUAL AGUA MAR SUPERFICIAL

Área de Estudio: Concón Quinteros | 1990






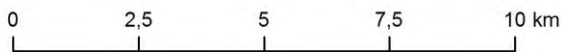
Simbología

CAAMS - Calidad Anual del Agua del Mar Supeficial

-  0,00641 - 0,02142 (Muy Alta)
-  0,02143 - 0,02893 (Alta)

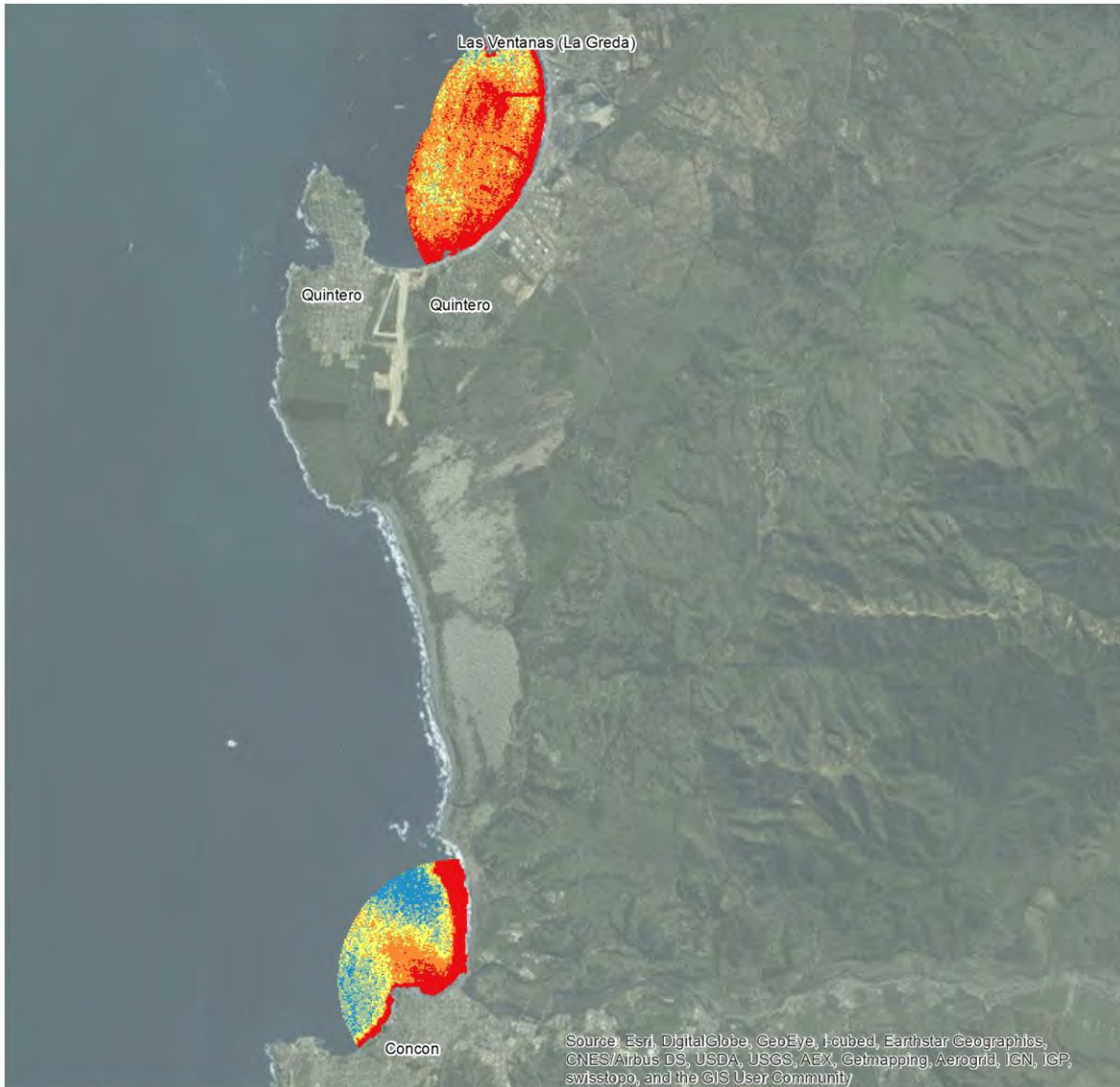
Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

-  0,02894 - 0,04019 (Media)
-  0,0402 - 0,06646 (Baja)
-  0,06647 - 0,96352 (Muy Baja)





INDICADORES AMBIENTALES - CALIDAD ANUAL AGUA MAR SUPERFICIAL

Área de Estudio: Concón Quinteros | 1995




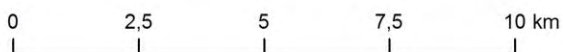
Simbología

CAAMS - Calidad Anual del Agua del Mar Supeficial

-  0,003 - 0,021 (Muy Alta)
-  0,022 - 0,028 (Alta)

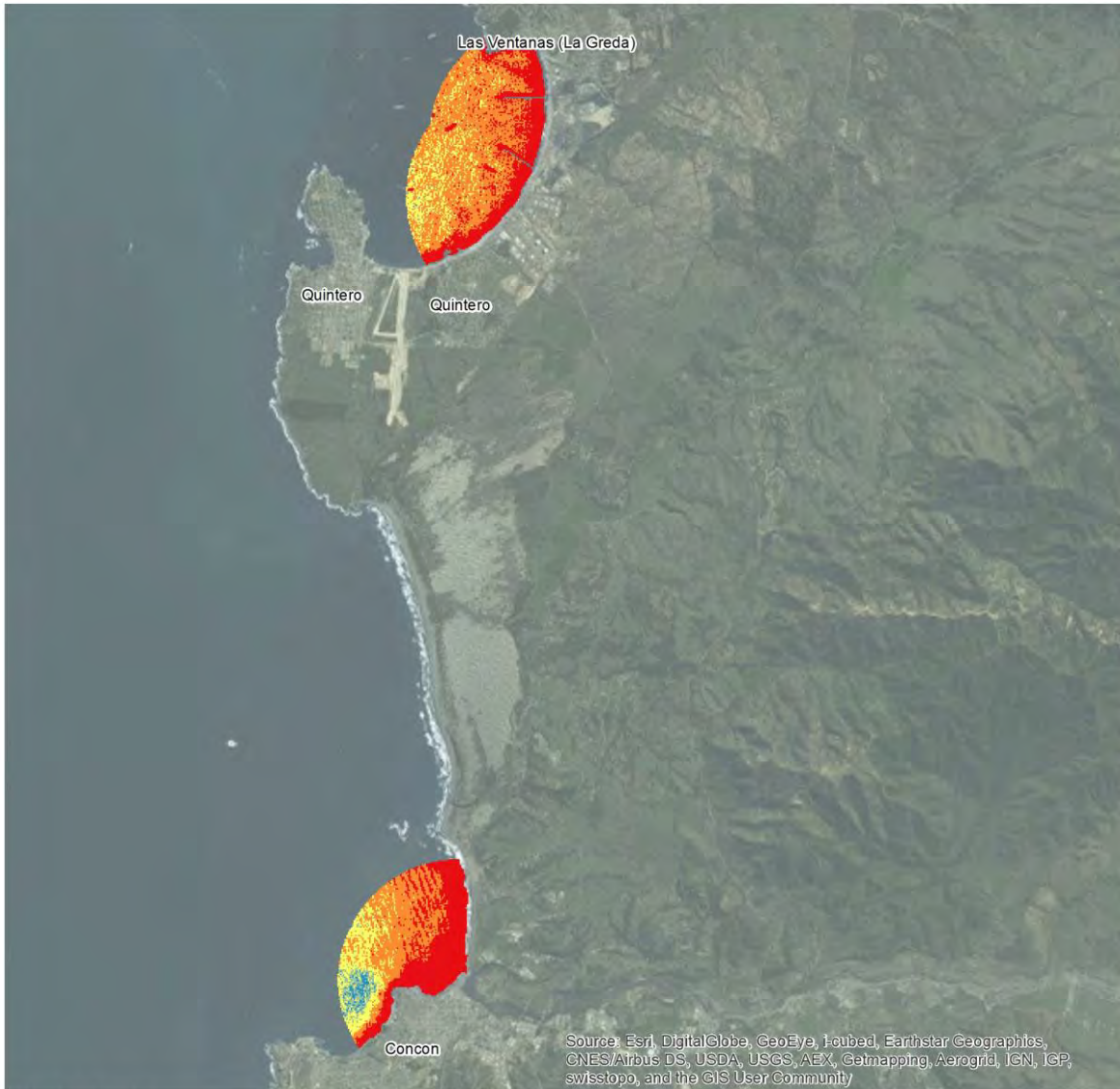
Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

-  0,029 - 0,035 (Media)
-  0,036 - 0,049 (Baja)
-  0,05 - 0,907 (Muy Baja)



INDICADORES AMBIENTALES - CALIDAD ANUAL AGUA MAR SUPERFICIAL

Área de Estudio: Quinteros - Concón | 2000



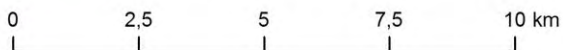
Simbología

CAAMS - Calidad Anual del Agua del Mar Supeficial

- 0,005 - 0,012 (Muy Alta)
- 0,013 - 0,015 (Alta)

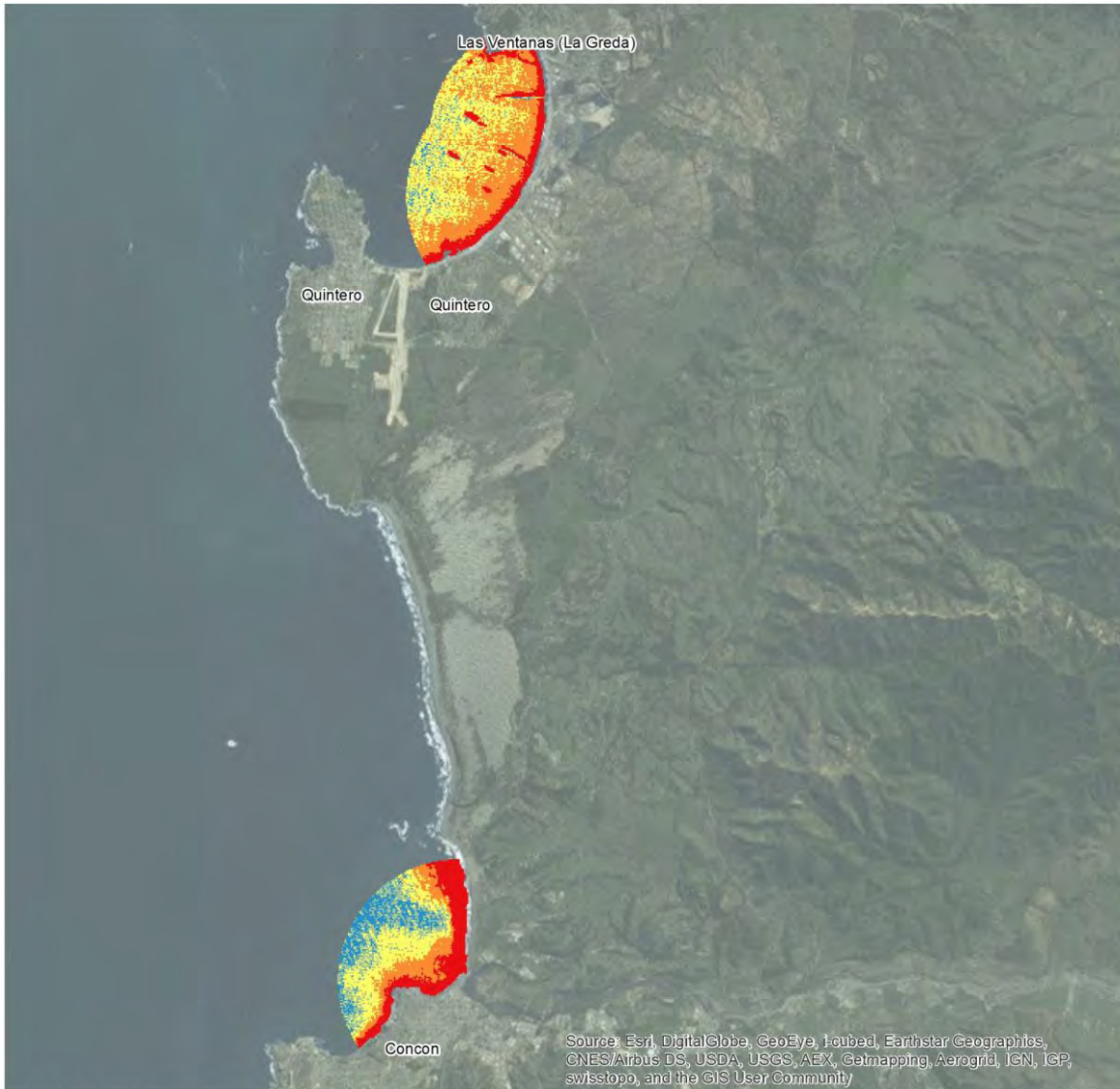
Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

- 0,016 - 0,022 (Media)
- 0,023 - 0,032 (Baja)
- 0,033 - 0,882 (Muy Baja)



INDICADORES AMBIENTALES - CALIDAD ANUAL AGUA MAR SUPERFICIAL

Área de Estudio: Quinteros - Concón | 2005



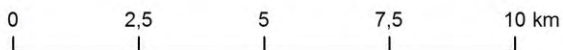
Simbología

CAAMS - Calidad Anual del Agua del Mar Supeficial

- 0,003 - 0,013 (Muy Alta)
- 0,014 - 0,017 (Alta)

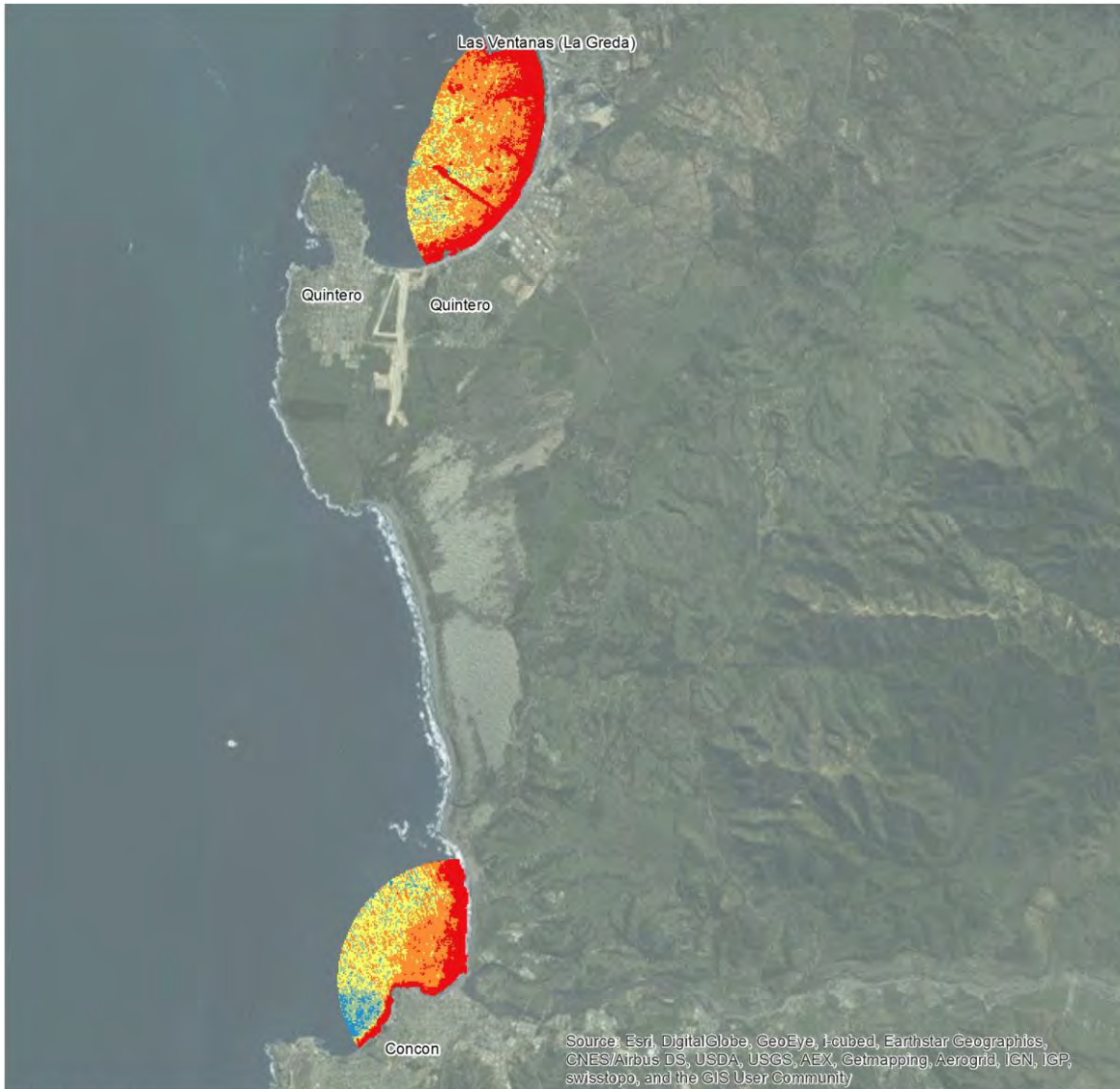
Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

- 0,018 - 0,024 (Media)
- 0,025 - 0,038 (Baja)
- 0,039 - 0,896 (Muy Baja)



INDICADORES AMBIENTALES - CALIDAD ANUAL AGUA MAR SUPERFICIAL

Área de Estudio: Quinteros - Concón | 2010



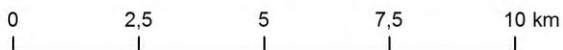
Simbología

CAAMS - Calidad Anual del Agua del Mar Supeficial

- 0,003 - 0,018 (Muy Alto)
- 0,019 - 0,026 (Alto)

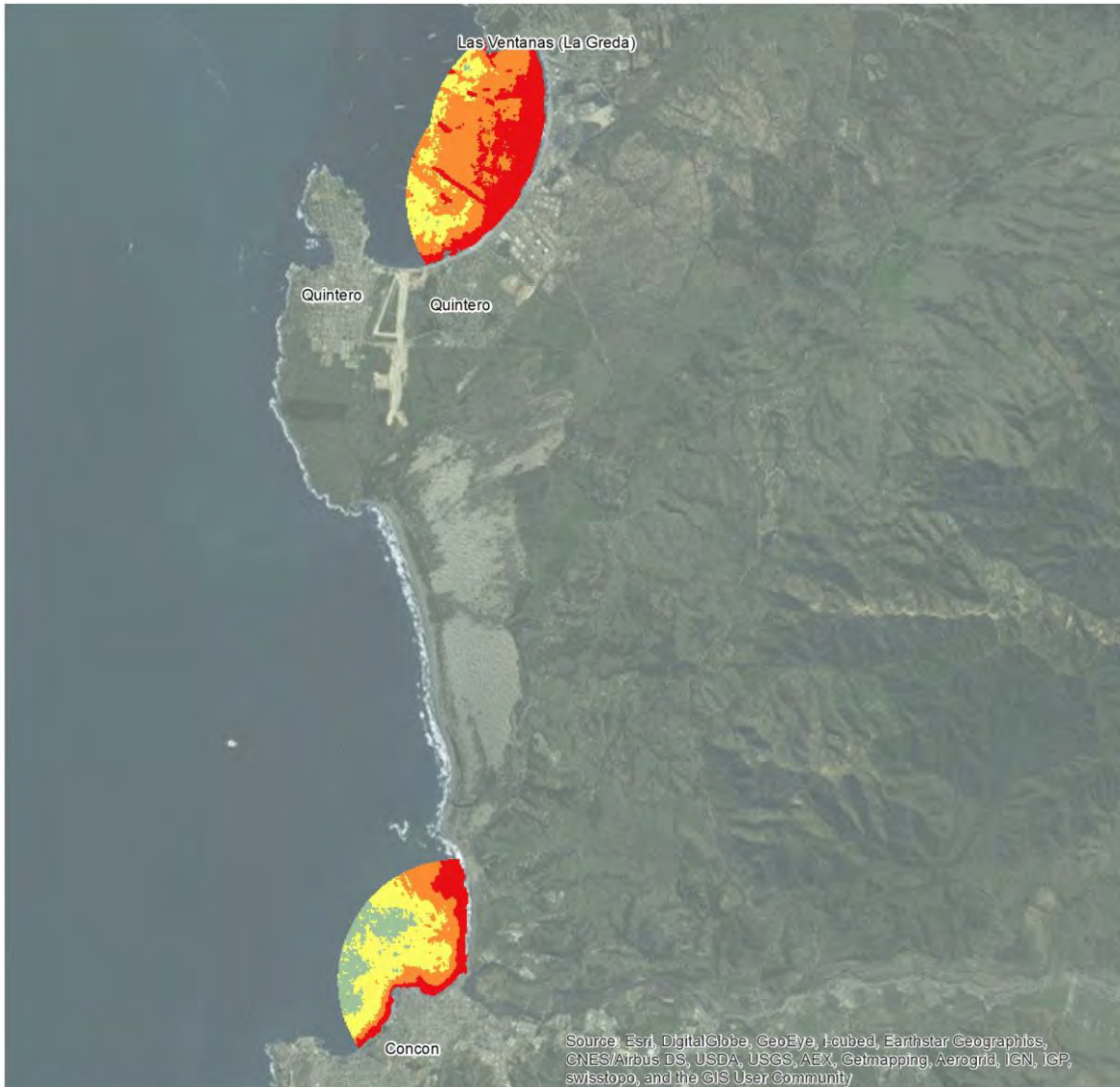
Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

- 0,027 - 0,034 (Medio)
- 0,035 - 0,049 (Bajo)
- 0,05 - 0,975 (Muy Bajo)



INDICADORES AMBIENTALES - CALIDAD ANUAL AGUA MAR SUPERFICIAL

Área de Estudio: Quinteros - Concón | 2015



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Simbología

CAAMS - Calidad Anual del Agua del Mar Supeficial

0,001 (Muy Alta)

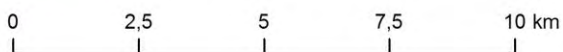
0,002 - 0,005 (Alta)

Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

0,006 - 0,009 (Media)

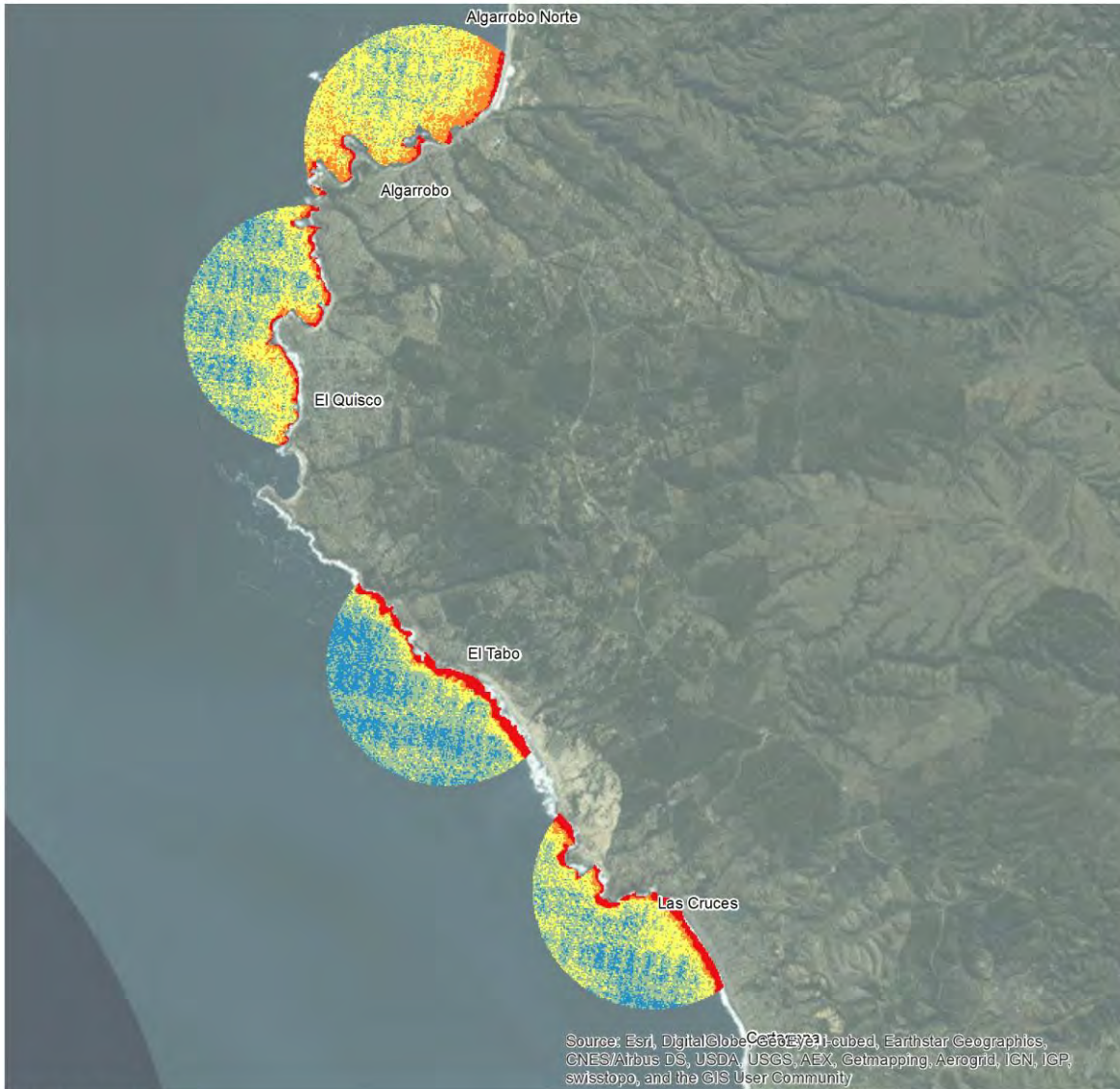
0,01 - 0,016 (Baja)

0,017 - 0,957 (Muy Baja)



INDICADORES AMBIENTALES - CALIDAD ANUAL AGUA MAR SUPERFICIAL

Área de Estudio: Litoral Central | 1990



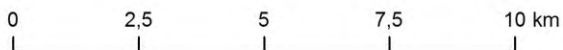
Simbología

CAAMS - Calidad Anual del Agua del Mar Supeficial

- 0,00641 - 0,02142 (Muy Alta)
- 0,02143 - 0,02893 (Alta)

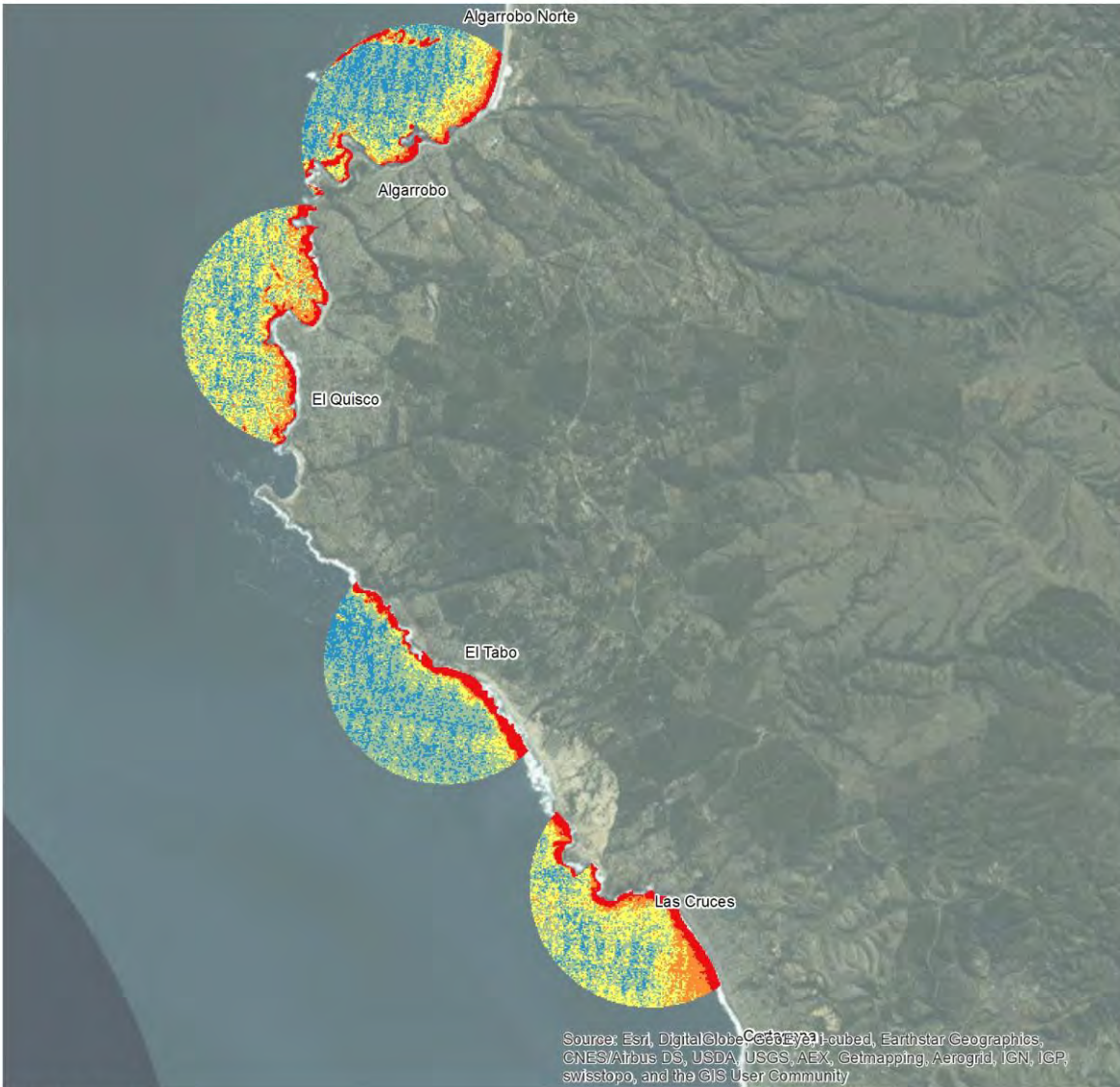
Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

- 0,02894 - 0,04019 (Media)
- 0,0402 - 0,06646 (Baja)
- 0,06647 - 0,96352 (Muy Baja)



INDICADORES AMBIENTALES - CALIDAD ANUAL AGUA MAR SUPERFICIAL

Área de Estudio: Litoral Central | 1995



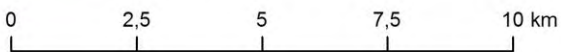
Simbología

CAAMS - Calidad Anual del Agua del Mar Supeficial

- 0,003 - 0,021 (Muy Alta)
- 0,022 - 0,028 (Alta)

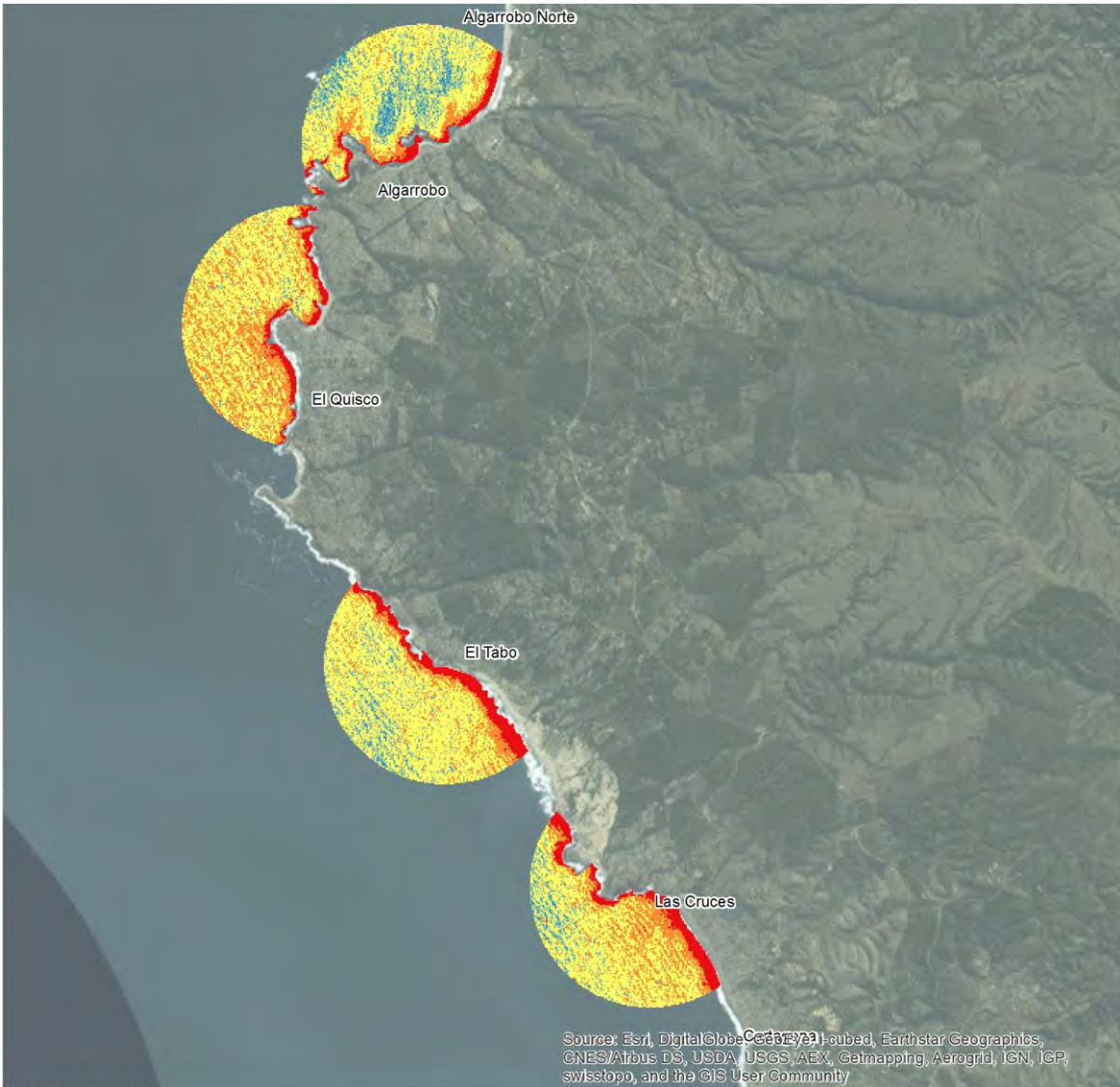
Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

- 0,029 - 0,035 (Media)
- 0,036 - 0,049 (Muy Baja)
- 0,05 - 0,907 (Baja)



INDICADORES AMBIENTALES - CALIDAD ANUAL AGUA MAR SUPERFICIAL

Área de Estudio: Litoral Central | 2000



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

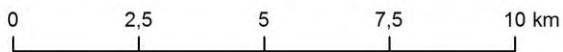
Simbología

CAAMS - Calidad Anual del Agua del Mar Supeficial

- 0,005 - 0,012 (Muy Alta)
- 0,013 - 0,015 (Alta)

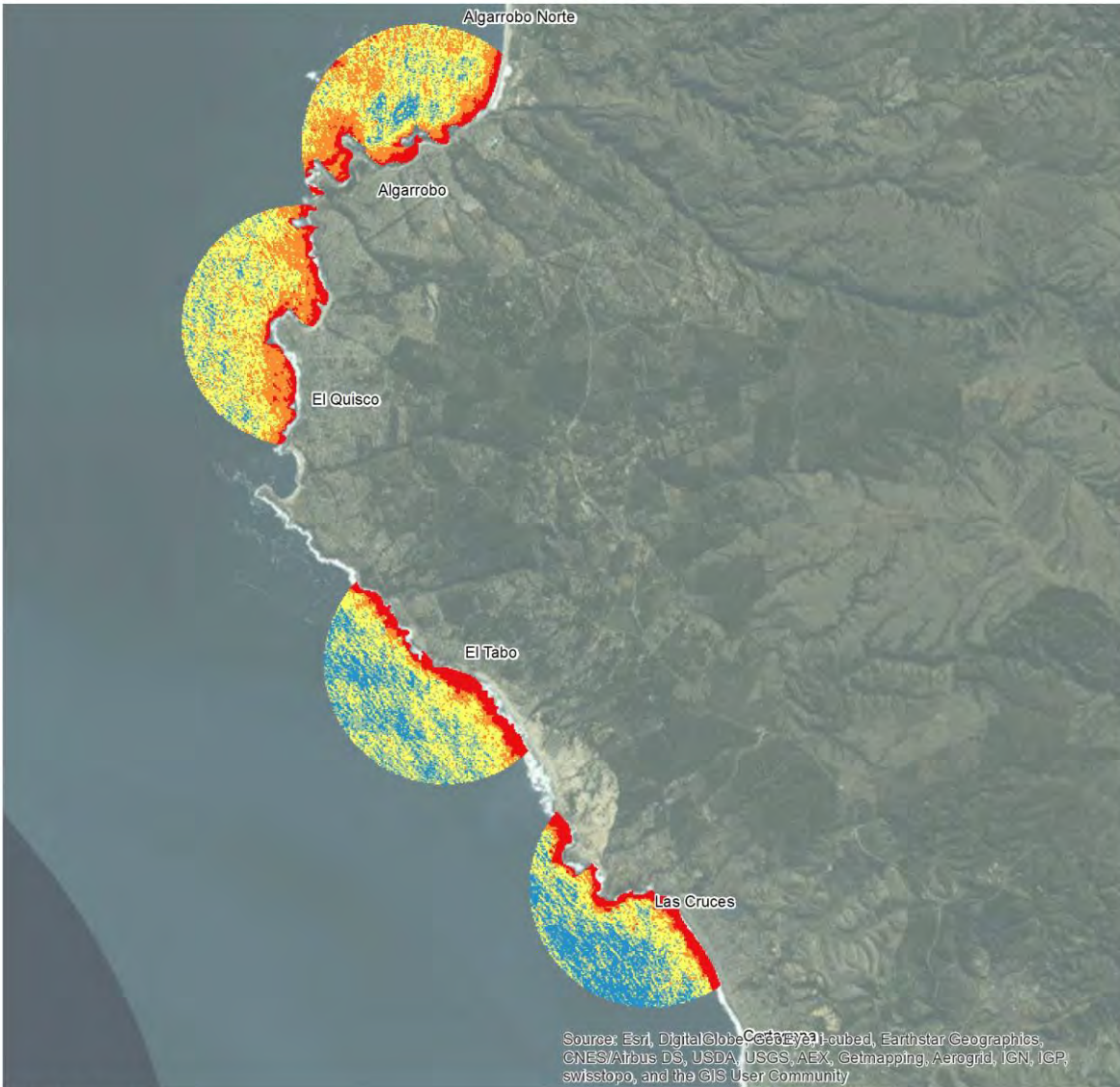
Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

- 0,016 - 0,022 (Media)
- 0,023 - 0,032 (Baja)
- 0,033 - 0,882 (Muy Baja)



INDICADORES AMBIENTALES - CALIDAD ANUAL AGUA MAR SUPERFICIAL

Área de Estudio: Litoral Central | 2005



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

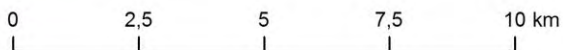
Simbología

CAAMS - Calidad Anual del Agua del Mar Supeficial

- 0,003 - 0,013 (Muy Alta)
- 0,014 - 0,017 (Alta)

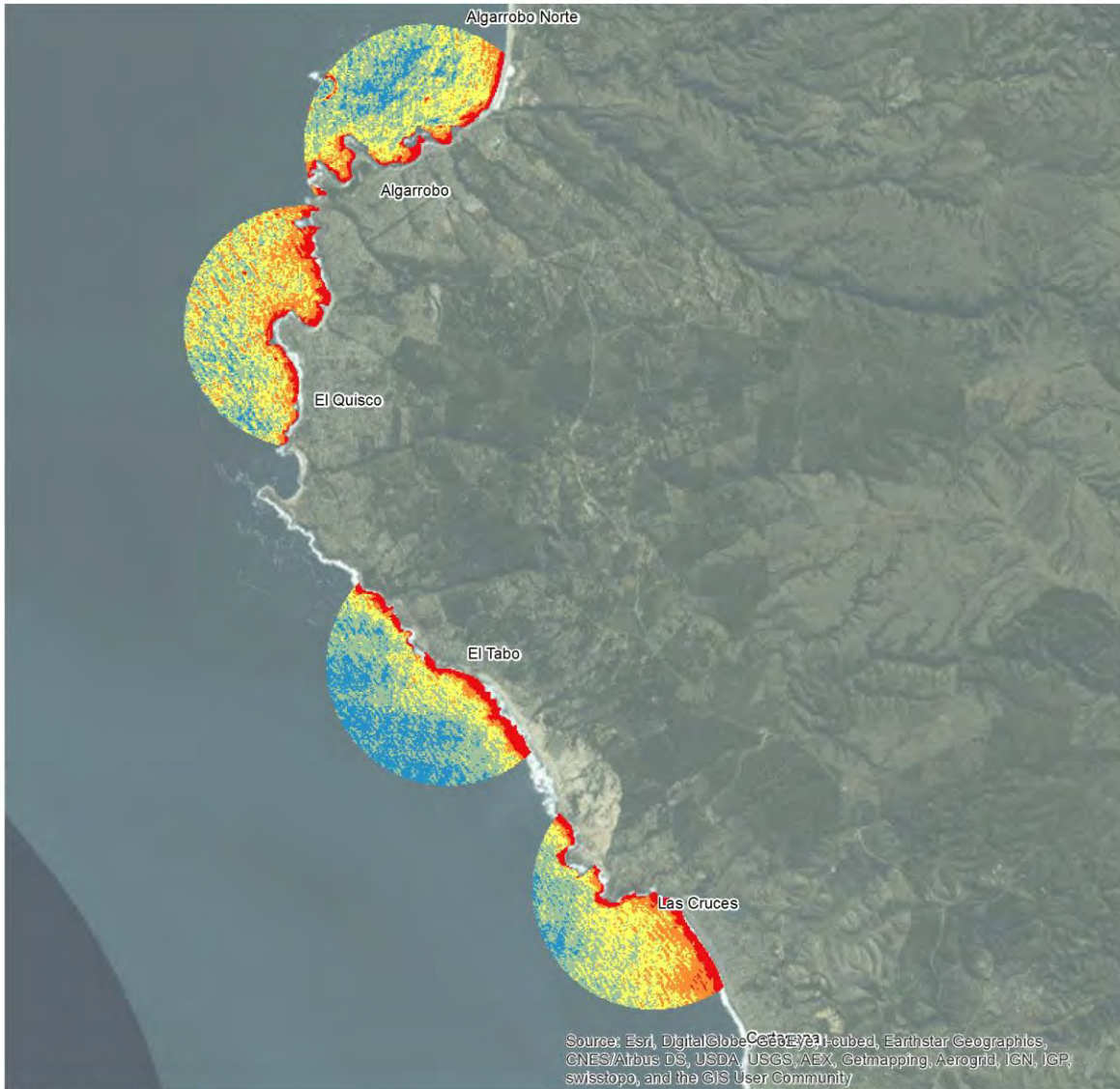
Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

- 0,018 - 0,024 (Media)
- 0,025 - 0,038 (Baja)
- 0,039 - 0,896 (Media Baja)



INDICADORES AMBIENTALES - CALIDAD ANUAL AGUA MAR SUPERFICIAL

Área de Estudio: Litoral Central | 2010



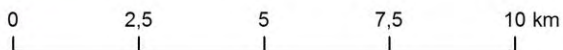
Simbología

CAAMS - Calidad Anual del Agua del Mar Supeficial

- 0,003 - 0,018 (Muy Alto)
- 0,019 - 0,026 (Alto)

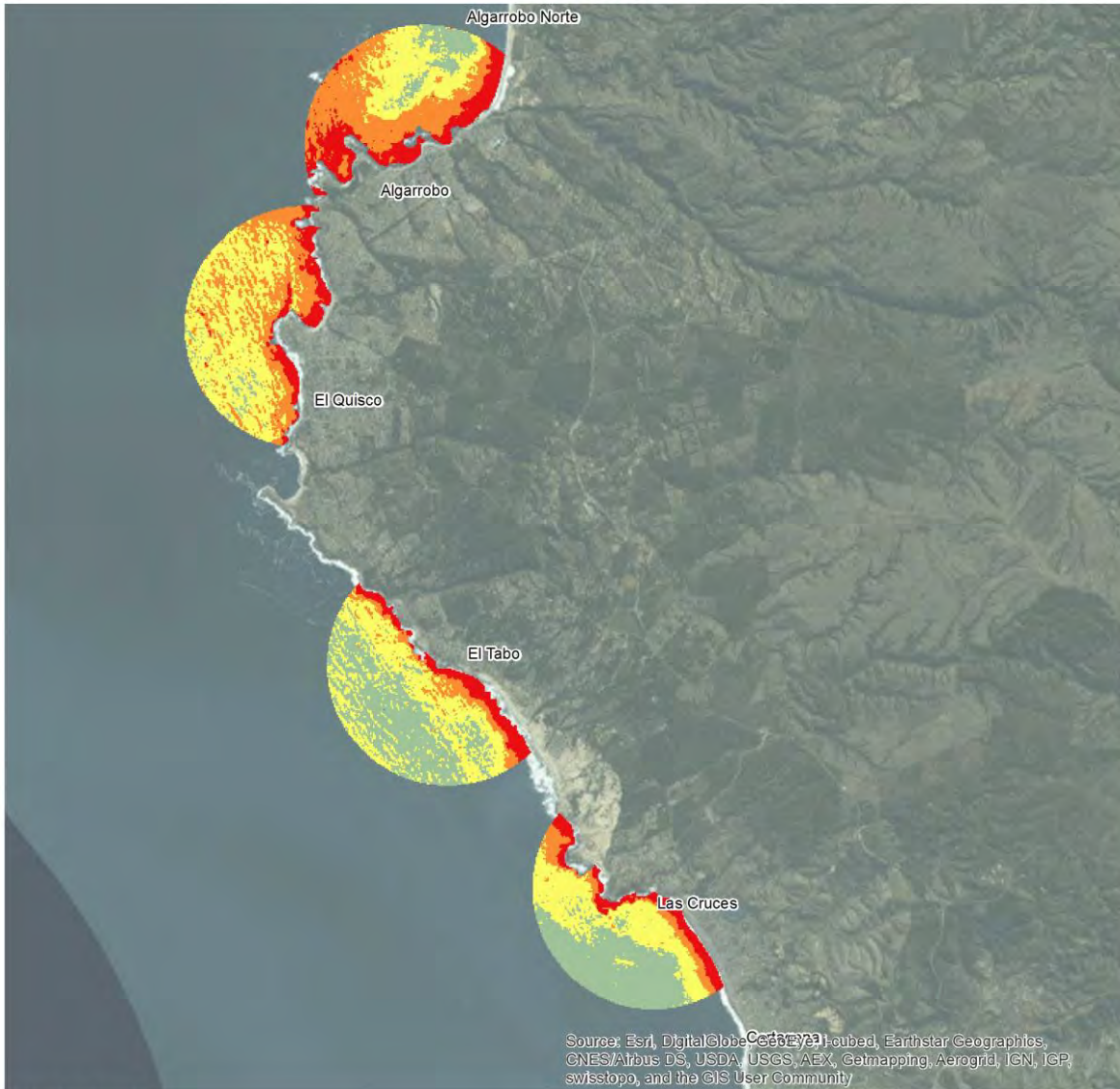
Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

- 0,027 - 0,034 (Medio)
- 0,035 - 0,049 (Bajo)
- 0,05 - 0,975 (Muy Bajo)



INDICADORES AMBIENTALES - CALIDAD ANUAL AGUA MAR SUPERFICIAL

Área de Estudio: Quinteros - Concón | 2015



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

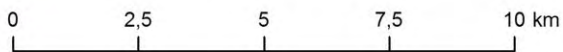
Simbología

CAAMS - Calidad Anual del Agua del Mar Supeficial

- 0,001 (Muy Alta)
- 0,002 - 0,005 (Alta)

Fuente: Elaboración Propia en Base a MMA y Landsat

- 0,006 - 0,009 (Media)
- 0,01 - 0,016 (Baja)
- 0,017 - 0,957 (Muy Baja)



4. Indicador desarrollado para el ambiente lacustre

4.1 Eutrofización anual de la superficie lacustre (EASL)

La superficie del cuerpo lacustre (SCL) y el índice de eutrofización lacustre (IEL) componen al indicador del grado de eutrofización superficial de lagos y lagunas. Los parámetros definidos y los modelos utilizados deben ser contrastados con la información sistematizada levantada en campañas de terreno, esto a fin de definir valores de umbrales críticos para el fenómeno de eutrofización en los diferentes cuerpos lacustres analizados.

Se han seleccionado dos cuerpos de agua para la caracterización del indicador del ambiente lacustre. Se escogió el Lago Chungará en el norte del país (Región de Arica u Parinacota), mientras que en el centro se eligió a la Laguna de Aculeo (Región Metropolitana). Los detalles de las imágenes satelitales consideradas por cuerpo lacustre se exponen en la Tabla 21.

Tabla 21. Cuerpos lacustres caracterizados con el indicador ambiental.

| Sector | Región | Imágenes | Ángulo de elevación solar (°) | Ángulo de azimut solar (°) | Distancia al Sol (UA) |
|------------------|------------------------------|-------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| Lago Chungará | Región de Arica y Parinacota | L5017390046 | 48,34 | 88,03 | 1,02 |
| | | L5017390206 | 34,14 | 48,76 | 0,99 |
| | | L5017395252 | 40,81 | 64,91 | 1,01 |
| | | L5017395348 | 49,63 | 104,03 | 0,98 |
| | | L7017300258 | 52,50 | 57,41 | 0,99 |
| | | L7017300322 | 63,16 | 95,45 | 1,00 |
| | | L5017305071 | 51,97 | 70,05 | 1,02 |
| | | L5017305183 | 36,73 | 39,76 | 0,99 |
| | | L5017310085 | 50,96 | 60,86 | 1,01 |
| | | L5017310229 | 44,20 | 47,91 | 1,01 |
| | | L8017315051 | 57,05 | 81,11 | 0,99 |
| | | L8017315131 | 43,53 | 39,57 | 1,01 |
| Laguna de Aculeo | Región Metropolitana | L5338390119 | 27,95 | 46,72 | 1,01 |
| | | L5338390231 | 28,29 | 49,37 | 0,98 |
| | | L5338395005 | 48,89 | 87,11 | 1,00 |
| | | L5338395165 | 18,71 | 43,97 | 1,00 |
| | | L7338300059 | 47,40 | 62,42 | 1,02 |
| | | L7338300283 | 50,45 | 54,66 | 0,99 |
| | | L5338305064 | 45,04 | 61,20 | 1,02 |
| | | L5338305304 | 55,93 | 63,82 | 1,00 |
| | | L5338310030 | 52,63 | 74,85 | 1,02 |
| | | L5338310334 | 59,50 | 76,10 | 1,01 |
| | | L8338315060 | 48,51 | 60,16 | 0,99 |
| | | L8338315124 | 32,27 | 36,68 | 1,01 |

Fuente: CIT-UAI, 2015

4.2 EASL: resultados y tendencias. Periodo 1990 - 2015

Los resultados en el Lago Chungará muestran una tendencia relativamente constante, con peaks asociados a las zonas más periféricas del lago y de menos profundidad; es importante destacar que se debe realizar una corrección espacial en la imagen Landsat del año 2000, para la zona de la cuenca del Río Lauca, por lo pronto el gráfico mantiene la tendencia entre los años 1995 y 2005.

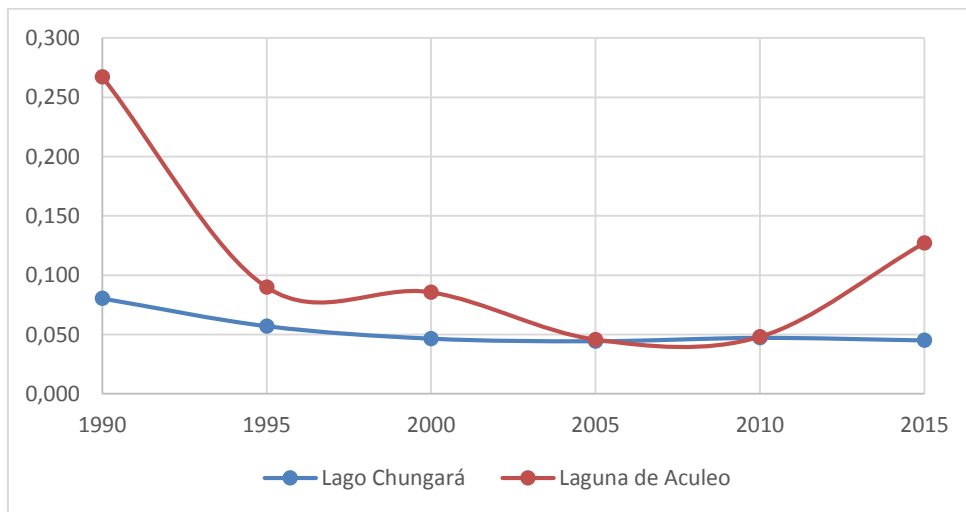
Por su parte la Laguna de Aculeo presenta un ciclo particular de alto grado de eutrofización ligado a los periodos de sequía en la zona central, particularmente en el año 1990 y durante el presente año (2015). Para la primera década del siglo XXI se evidencia una recuperación en la superficie con agua de la laguna y muy bajos niveles de eutrofización, situación que cambia dramáticamente para el año 2015. La unidad de medida del indicador es relativo, debido a que es necesario calibrar para obtener una unidad de medida real.

Tabla 22. Resultados obtenidos para el SACCG. Periodo 1990 – 2015.

| Topónimo | CAAMS | | | | | |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 | 2015 |
| Lago Chungará | 0,080 | 0,057 | 0,047 | 0,044 | 0,047 | 0,045 |
| Laguna de Aculeo | 0,267 | 0,090 | 0,086 | 0,046 | 0,048 | 0,127 |

Fuente: CIT-UAI, 2015

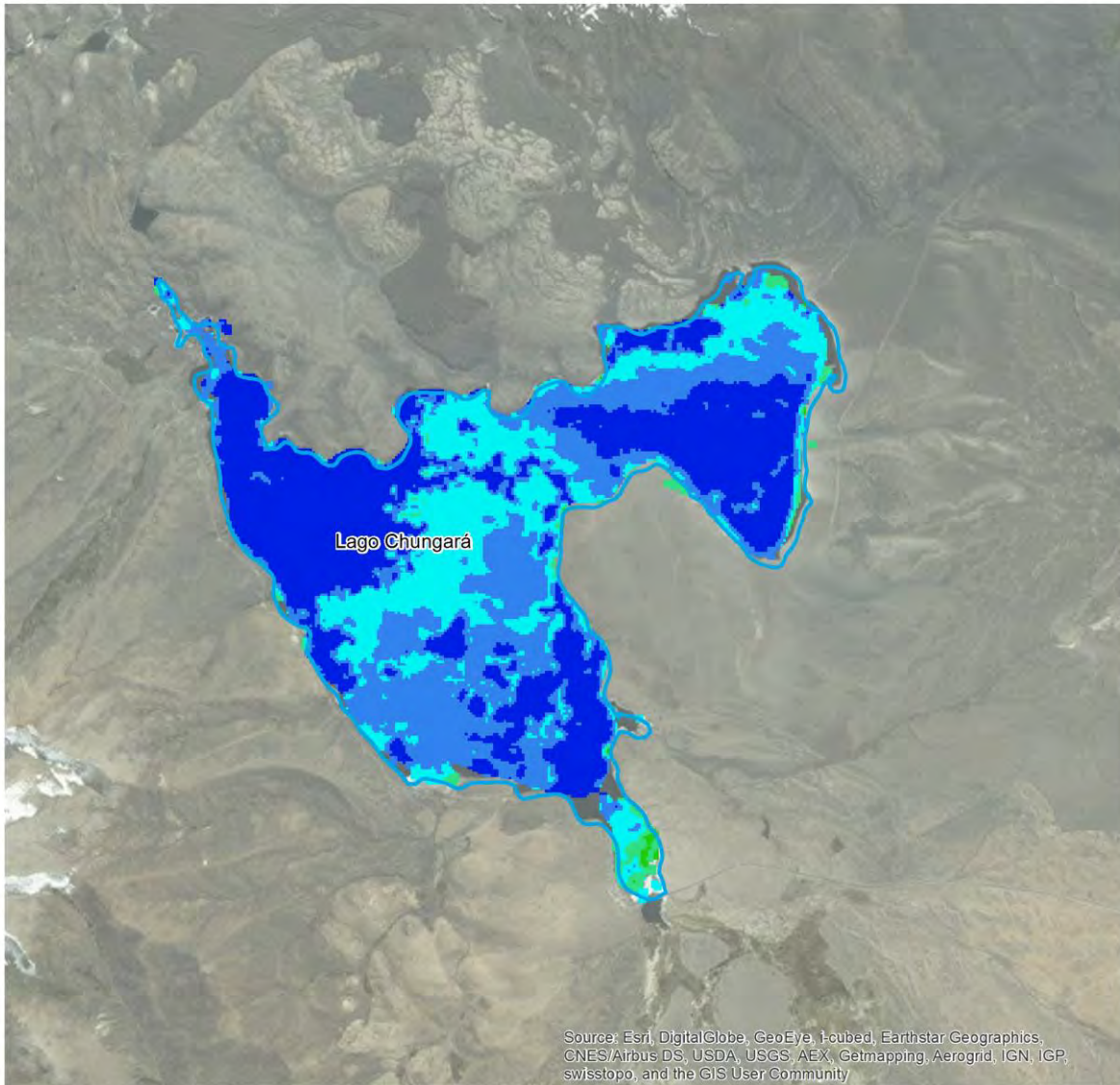
Gráfico 7. Comportamiento temporal y tendencias lineales del SACCG. Periodo 1990 – 2015.



Fuente: CIT-UAI, 2015

INDICADORES AMBIENTALES - EUTROFIZACIÓN SUPERFICIE LACUSTRE

Área de Estudio: Lago Chungará | 1990



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, I-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

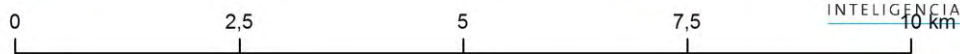
Simbología

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

EASL - Eutrofización Anual Superficie Lacustre

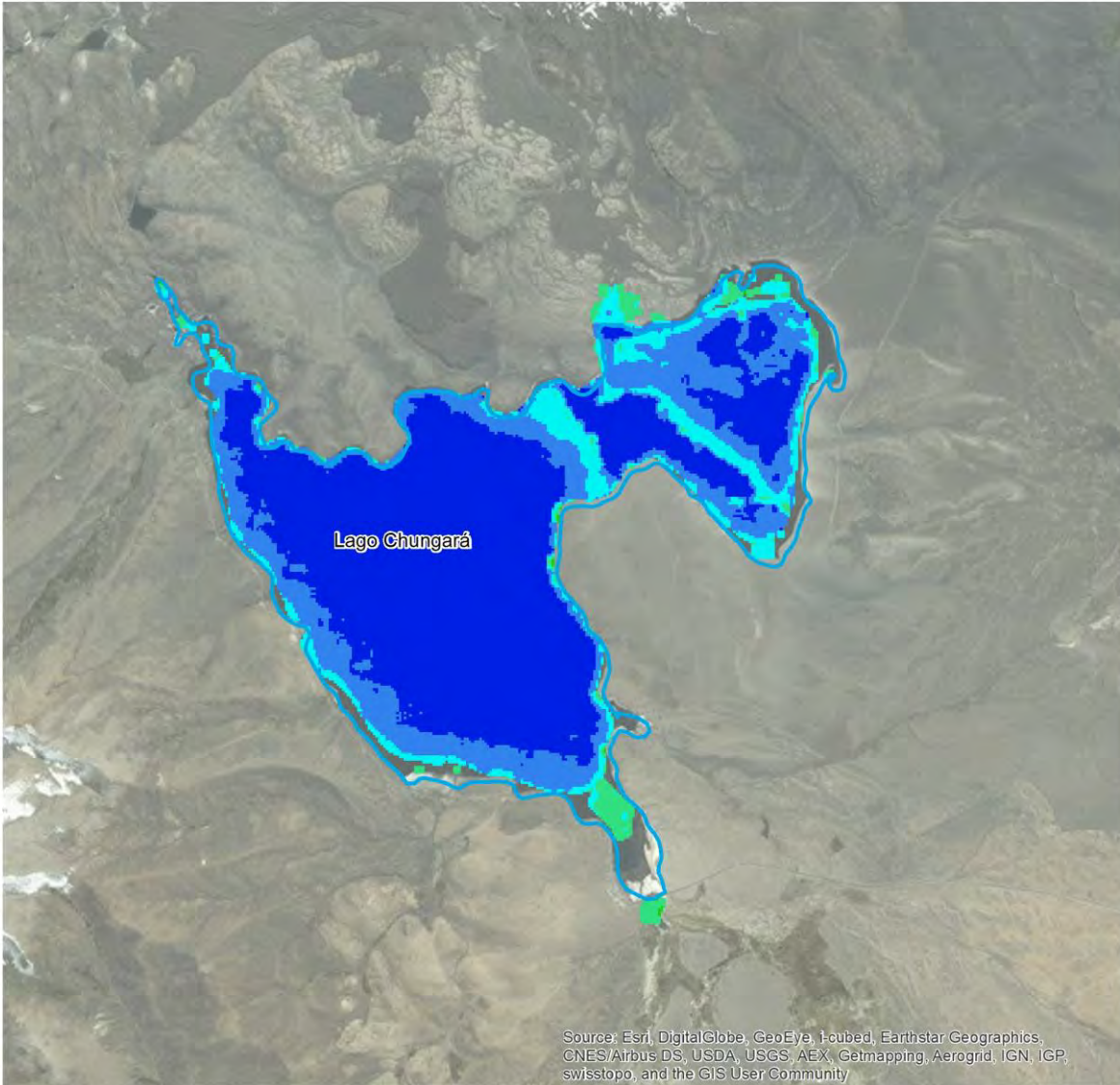
- 0 - 0,06 (Muy Baja)
- 0,07 - 0,11 (Baja)

- 0,12 - 0,18 (Media)
- 0,19 - 0,29 (Alta)
- 0,3 - 0,5 (Muy Alta)



INDICADORES AMBIENTALES - EUTROFIZACIÓN SUPERFICIE LACUSTRE

Área de Estudio: Lago Chungará | 1995



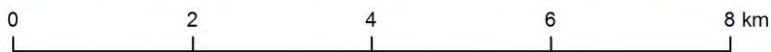
Simbología

EASL - Eutrofización Anual Superficie Lacustre

- 0 - 0,05 (Muy baja)
- 0,06 - 0,08 (Baja)

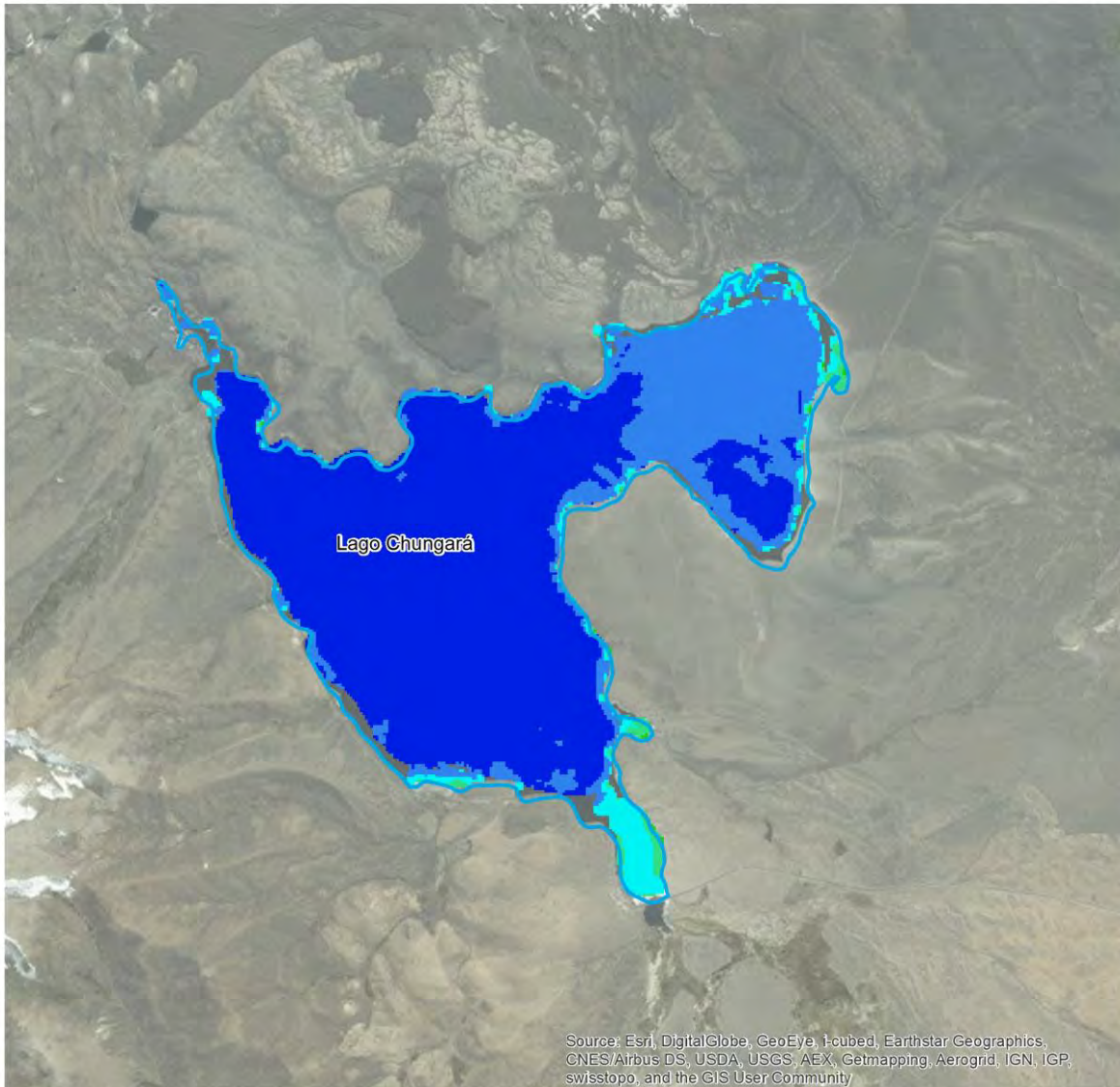
Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

- 0,09 - 0,13 (Media)
- 0,14 - 0,24 (Alta)
- 0,25 - 0,5 (Muy Alta)



INDICADORES AMBIENTALES - EUTROFIZACIÓN SUPERFICIE LACUSTRE

Área de Estudio: Lago Chungará | 2000



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, I-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

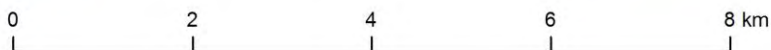
Simbología

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

EASL - Eutrofización Anual Superficie Lacustre

- 0 - 0,05 (Muy Baja)
- 0,06 - 0,08 (Baja)

- 0,09 - 0,14 (Medio)
- 0,15 - 0,25 (Alto)
- 0,26 - 0,5 (Muy Alta)



INDICADORES AMBIENTALES - EUTROFIZACIÓN SUPERFICIE LACUSTRE

Área de Estudio: Lago Chungará | 2005



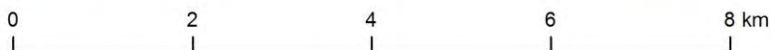
Simbología

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

EASL - Eutrofización Anual Superficie Lacustre

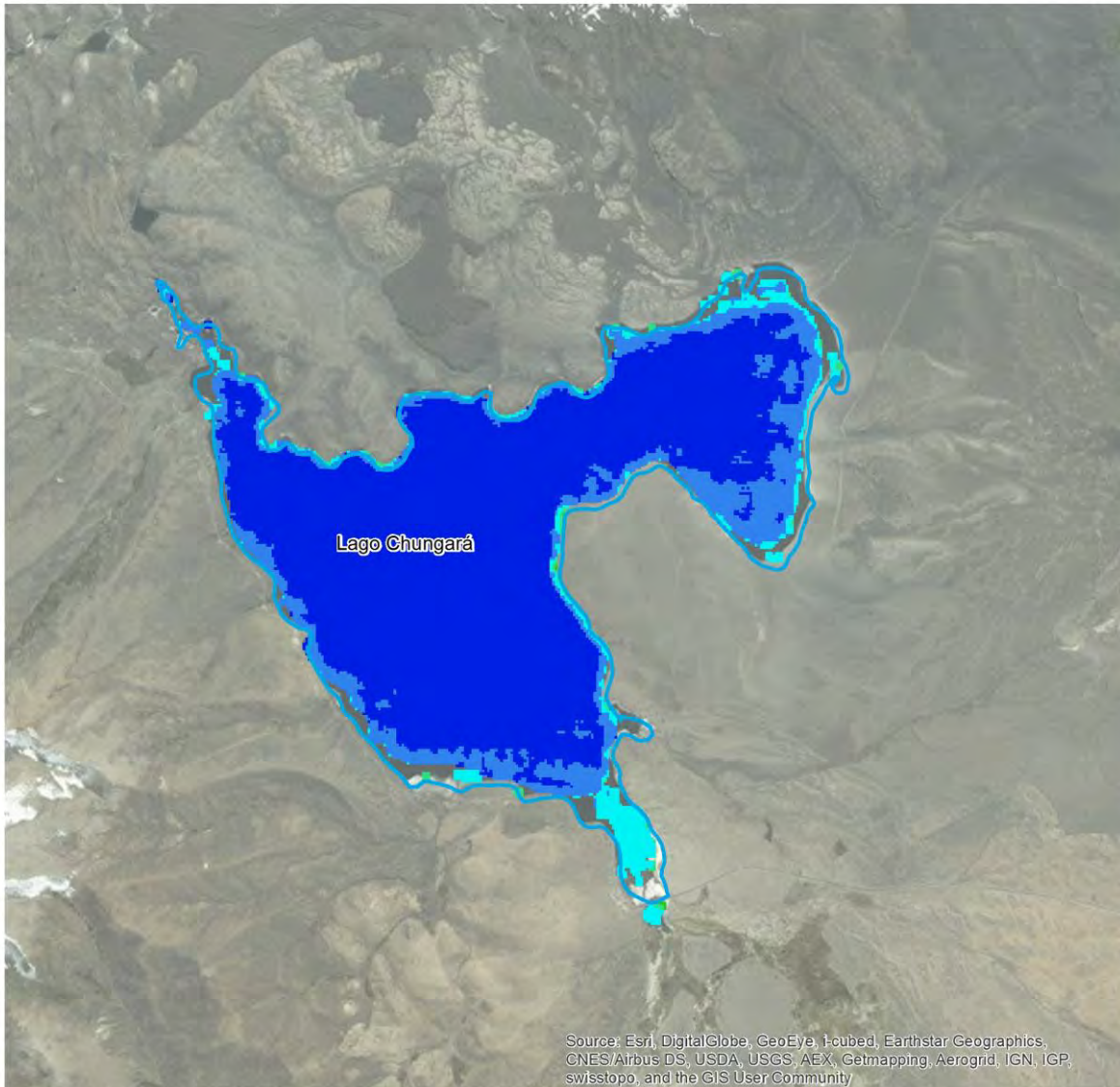
- 0 - 0,06 (Muy Bajo)
- 0,07 - 0,11 (Bajo)

- 0,12 - 0,19 (Medio)
- 0,2 - 0,3 (Alto)
- 0,31 - 0,5 (Muy Alto)



INDICADORES AMBIENTALES - EUTROFIZACIÓN SUPERFICIE LACUSTRE

Área de Estudio: Lago Chungará | 2010



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Simbología

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

EASL - Eutrofización Anual Superficie Lacustre

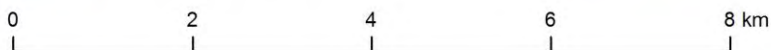
0,005 - 0,05 (Muy Bajo)

0,051 - 0,09 (Bajo)

0,091 - 0,168 (Medio)

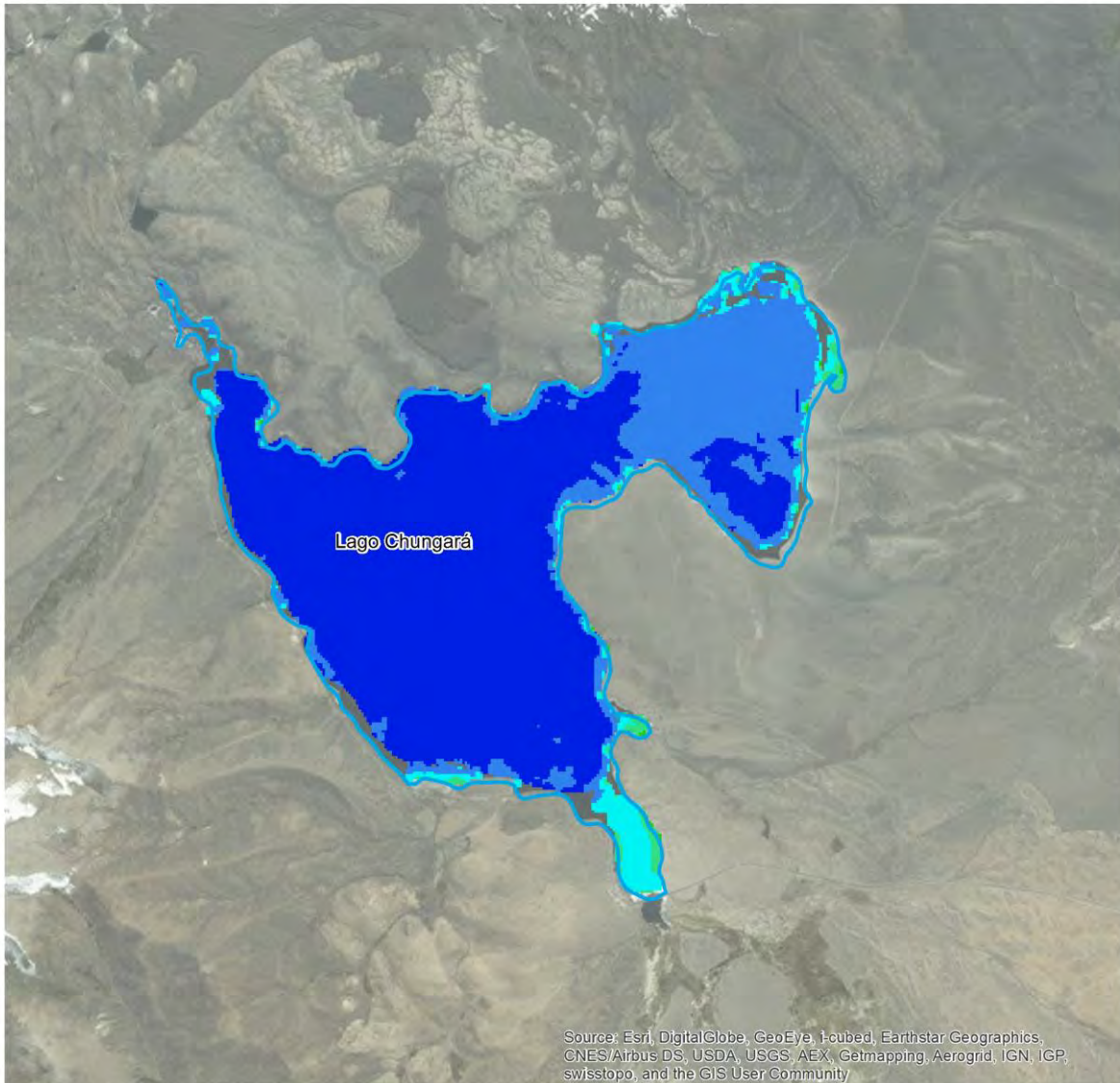
0,169 - 0,286 (Alto)

0,287 - 0,5 (Muy Alto)



INDICADORES AMBIENTALES - EUTROFIZACIÓN SUPERFICIE LACUSTRE

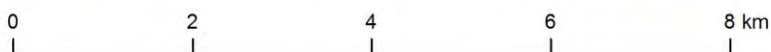
Área de Estudio: Lago Chungará | 2015



Simbología

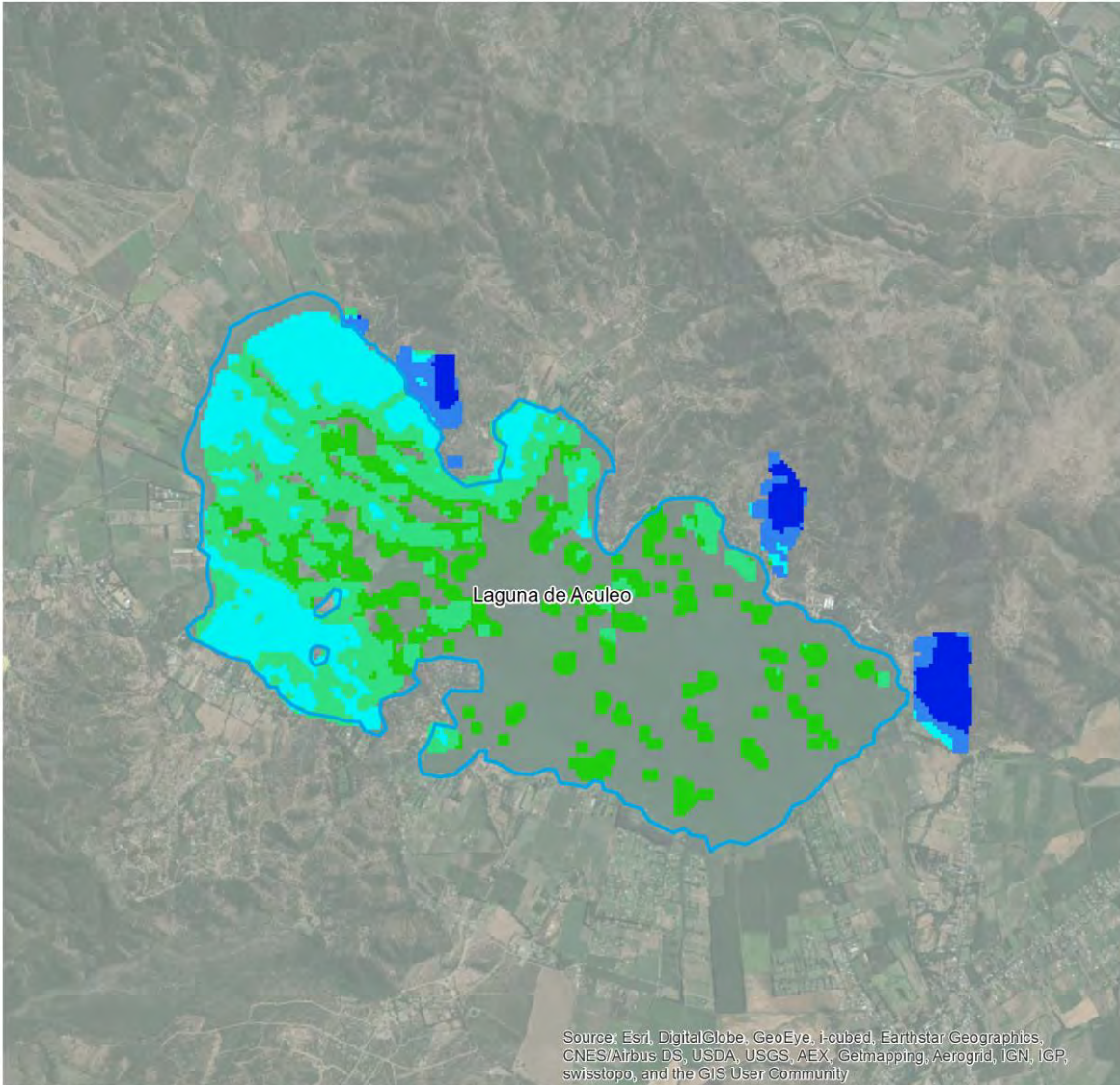
Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

| EASL - Eutrofización Anual Superficie Lacustre | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  0 - 0,05 (Muy Bajo) |  0,09 - 0,14 (Medio) |
|  0,06 - 0,08 (Bajo) |  0,15 - 0,25 (Alto) |
| |  0,26 - 0,5 (Muy Alto) |



INDICADORES AMBIENTALES - EUTROFIZACIÓN SUPERFICIE LACUSTRE

Área de Estudio: Laguna de Aculeo | 1990



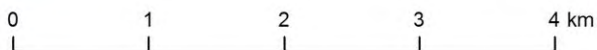
Simbología

EASL - Eutrofización Anual Superficie Lacustre

- 0 - 0,07 (Muy Bajo)
- 0,08 - 0,14 (Bajo)

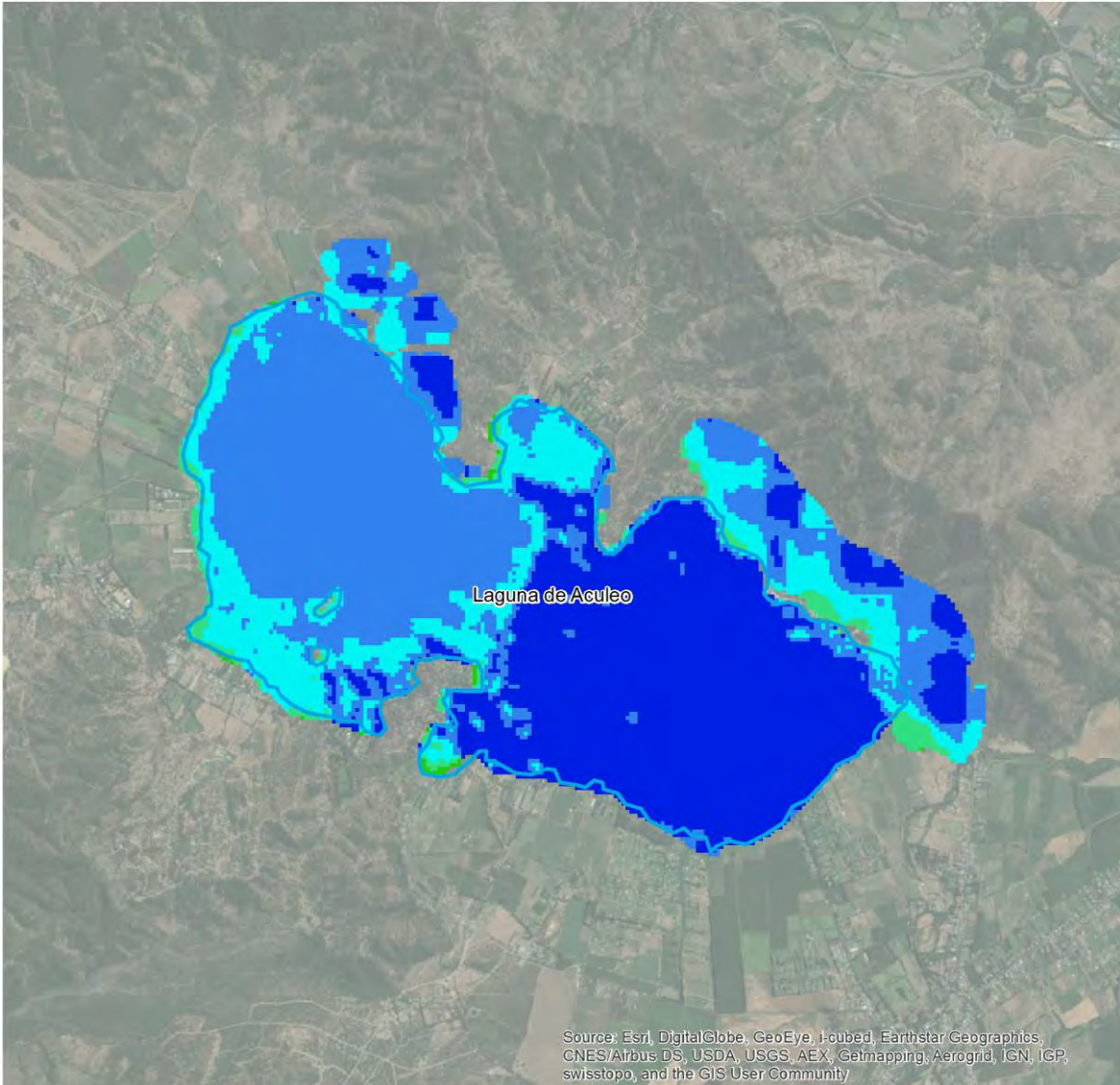
Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

- 0,15 - 0,22 (Medio)
- 0,23 - 0,31 (Alto)
- 0,32 - 0,5 (Muy Alta)



INDICADORES AMBIENTALES - EUTROFIZACIÓN SUPERFICIE LACUSTRE

Área de Estudio: Laguna de Aculeo | 1995



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, I-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

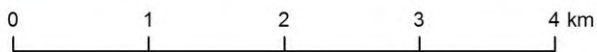
Simbología

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

EASL - Eutrofización Anual Superficie Lacustre

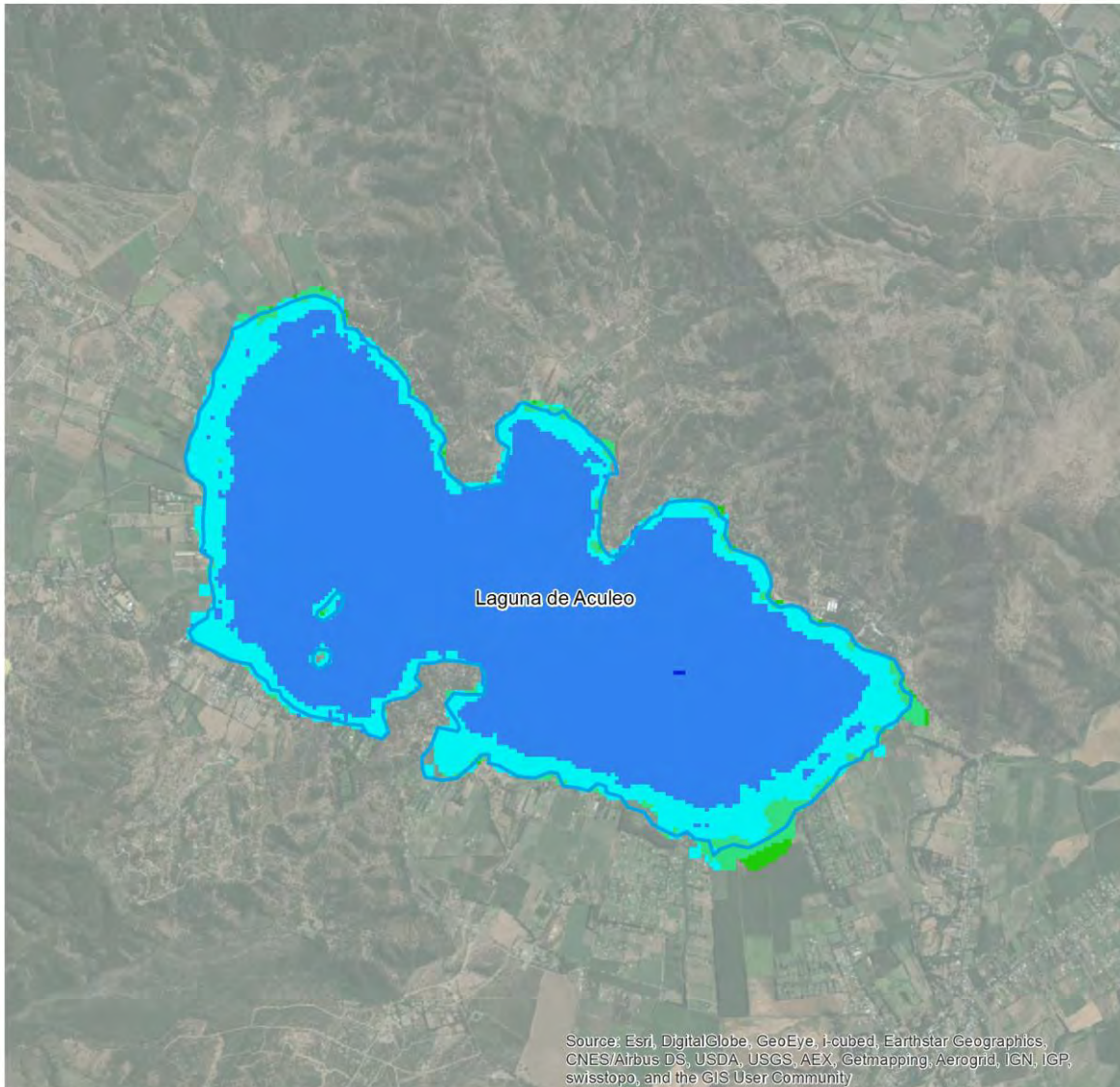
- 0 - 0,08 (Muy Baja)
- 0,09 - 0,14 (Baja)

- 0,15 - 0,2 (Media)
- 0,21 - 0,29 (Alta)
- 0,3 - 0,5 (Muy Alta)



INDICADORES AMBIENTALES - EUTROFIZACIÓN SUPERFICIE LACUSTRE

Área de Estudio: Laguna de Aculeo | 2000



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, I-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Simbología

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

EASL - Eutrofización Anual Superficie Lacustre

0 - 0,05 (Muy Baja)

0,06 - 0,11 (Baja)

0,12 - 0,18 (Media)

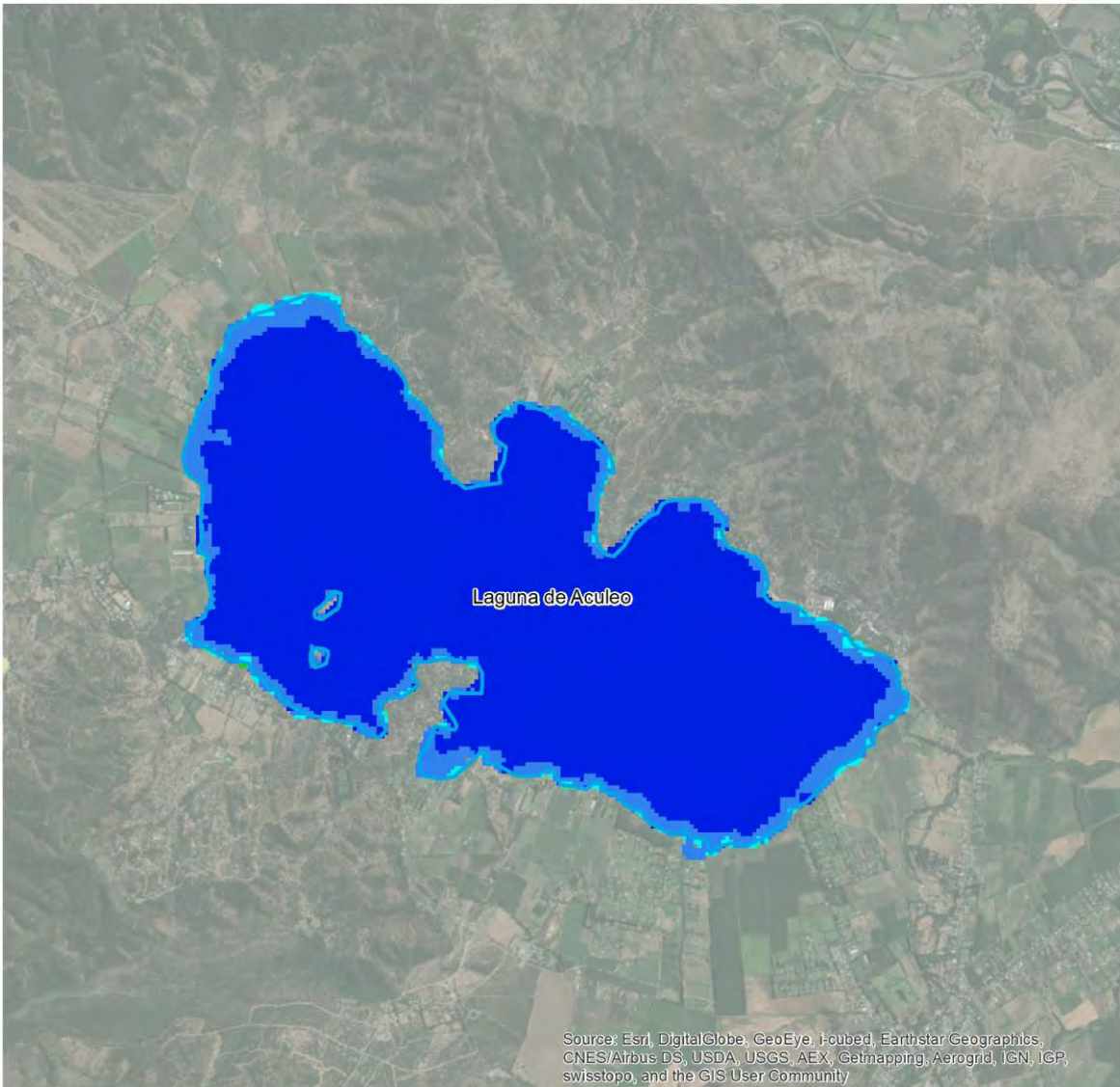
0,19 - 0,29 (Alta)

0,3 - 0,5 (Muy Alta)



INDICADORES AMBIENTALES - EUTROFIZACIÓN SUPERFICIE LACUSTRE

Área de Estudio: Laguna de Aculeo | 2005



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Simbología

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

EASL - Eutrofización Anual Superficie Lacustre

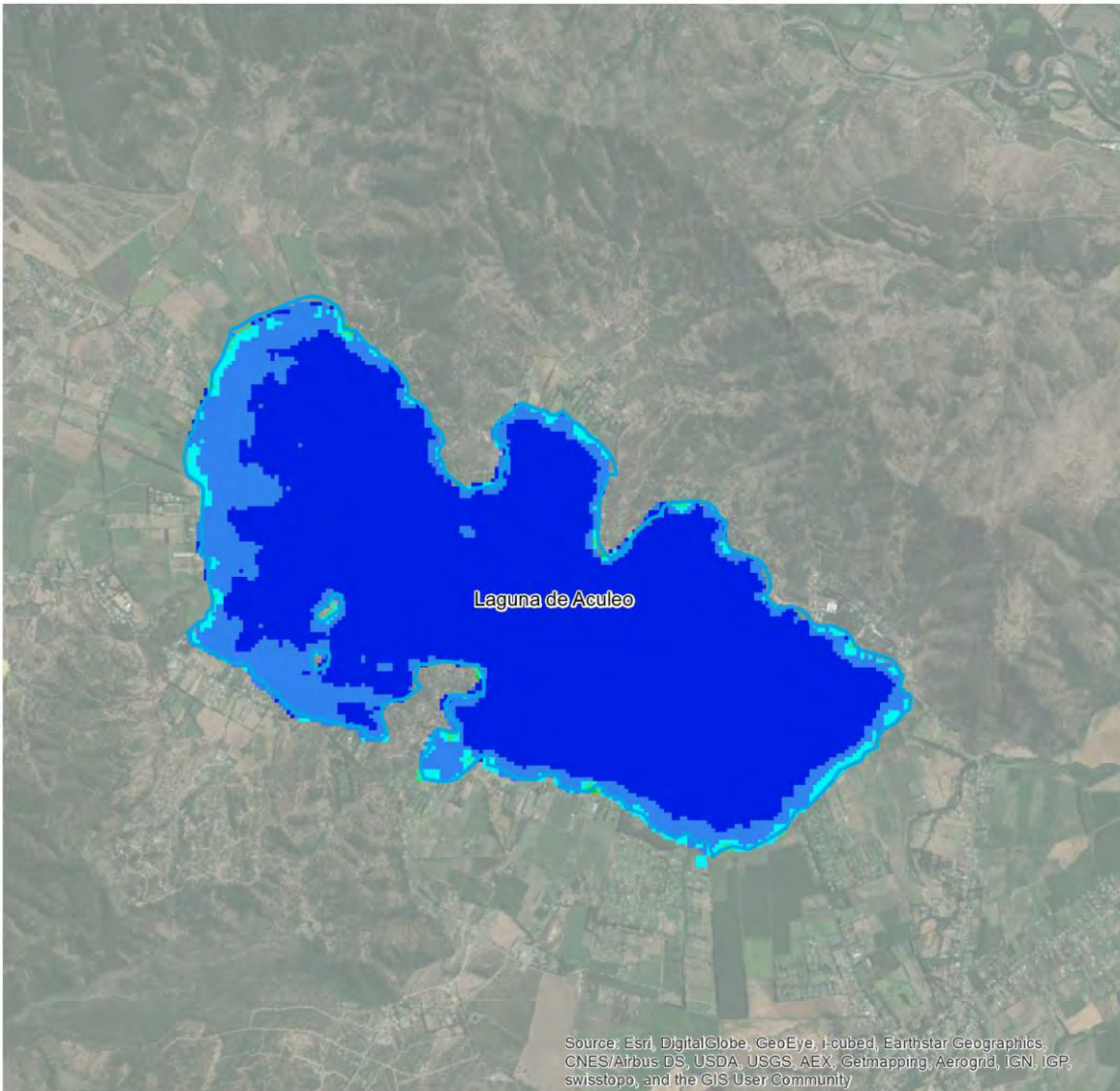
- 0 - 0,06 (Muy Bajo)
- 0,07 - 0,13 (Bajo)

- 0,14 - 0,22 (Medio)
- 0,23 - 0,32 (Alto)
- 0,33 - 0,5 (Muy Alto)



INDICADORES AMBIENTALES - EUTROFIZACIÓN SUPERFICIE LACUSTRE

Área de Estudio: Laguna de Aculeo | 2010



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Simbología

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

EASL - Eutrofización Anual Superficie Lacustre

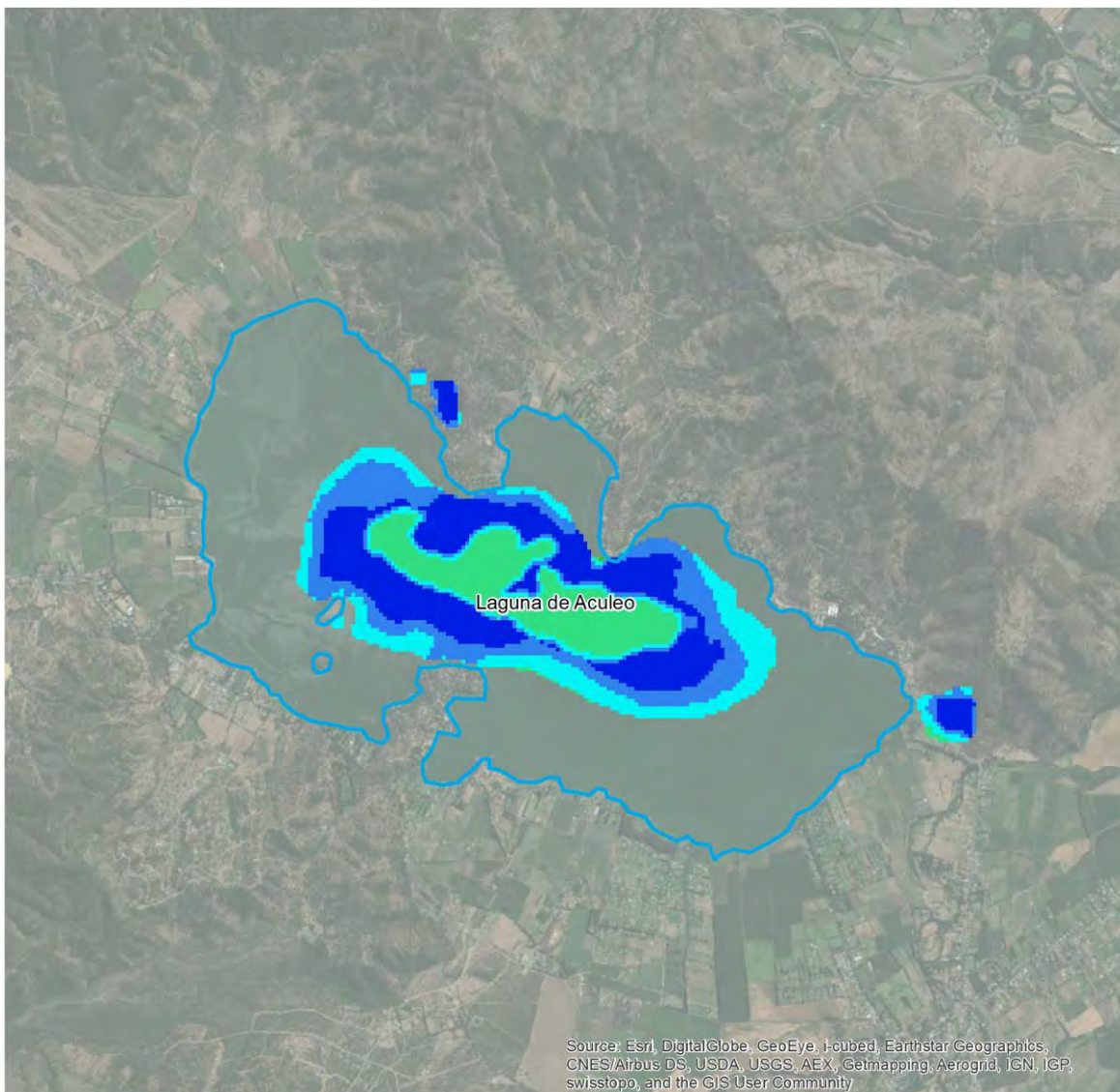
- 0 - 0,06 (Muy Bajo)
- 0,07 - 0,1 (Bajo)

- 0,11 - 0,17 (Medio)
- 0,18 - 0,27 (Alto)
- 0,28 - 0,5 (Muy Alto)



INDICADORES AMBIENTALES - EUTROFIZACIÓN SUPERFICIE LACUSTRE

Área de Estudio: Laguna de Aculeo | 2015



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Simbología

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

EASL - Eutrofización Anual Superficie Lacustre

- 0 - 0,08 (Muy Bajo)
- 0,09 - 0,13 (Bajo)

- 0,14 - 0,2 (Medio)
- 0,21 - 0,33 (Alto)
- 0,34 - 0,5 (Muy Alto)



5. Indicador desarrollado para el ambiente glaciar

5.1 Superficie anual cubierta por cuerpos glaciares (SACCG)

El indicador desarrollado para medir la superficie anual cubierta por cuerpos glaciares, se basa en el cálculo de las variables de índice de nieve y hielo (NDSI), tal y como se detalla en la metodología, en el acápite de ambientes glaciares.

Para la caracterización del indicador, se seleccionaron dos cuerpos glaciares, presentes en la Región de Valparaíso –el glaciar Río Blanco– y en la Región Metropolitana –el Marmolejo–. El detalle de las imágenes satelitales consideradas por cuerpo glaciar se exponen en la Tabla 23.

Tabla 23. Glaciares caracterizados con el indicador ambiental.

| Sector | Región | Imágenes | Ángulo de elevación solar (°) | Ángulo de azimut solar (°) | Distancia al Sol (UA) | Ángulo de elevación solar (°) |
|-------------------------|------------------------------------------------|-------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| Río Blanco Marmolejo | Región de Valparaíso y Región Metropolitana | L5338305064 | 45,04 | 61,20 | 1,016 | 45,04 |
| | | L5338305304 | 55,93 | 63,82 | 0,996 | 55,93 |
| | | L5338310030 | 52,63 | 74,85 | 1,016 | 52,63 |
| | | L5338310334 | 59,50 | 76,10 | 1,006 | 59,50 |
| | | L5338390119 | 27,95 | 46,72 | 1,010 | 27,95 |
| | | L5338390231 | 28,29 | 49,37 | 0,984 | 28,29 |
| | | L5338395005 | 48,89 | 87,11 | 1,000 | 48,89 |
| | | L5338395165 | 18,71 | 43,97 | 0,996 | 18,71 |
| | | L7338300059 | 47,40 | 62,42 | 1,017 | 47,40 |
| | | L7338300283 | 50,45 | 54,66 | 0,989 | 50,45 |
| | | L8338315060 | 48,51 | 60,16 | 0,991 | 48,51 |
| | | L8338315124 | 32,27 | 36,68 | 1,008 | 32,27 |

Fuente: CIT-UAI, 2015.

5.2 SACCG: resultados y tendencias. Periodo 1990 - 2015

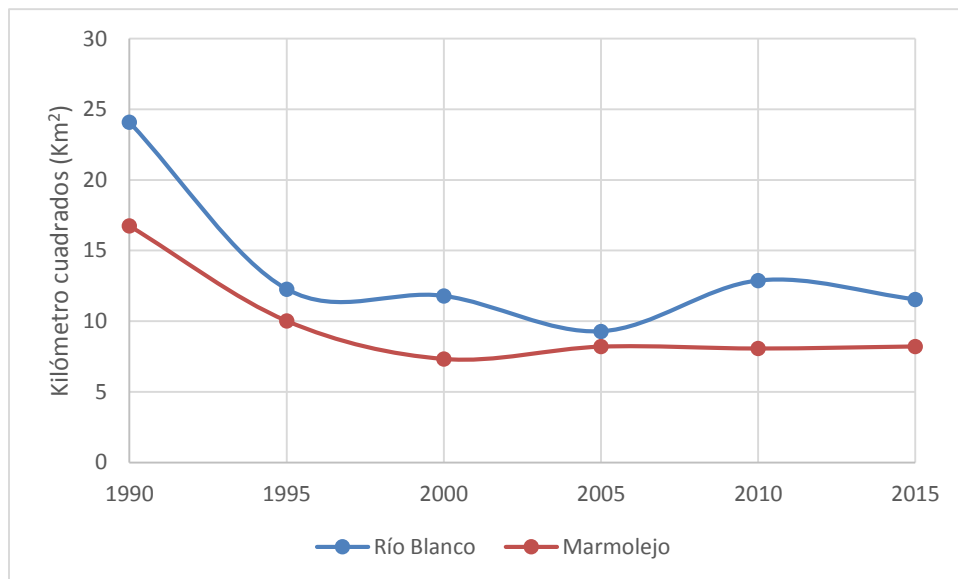
En la tabla y gráfico presentados a continuación se detalla el comportamiento de ambos glaciares (1990 – 2015). En general las curvas de tendencia de los dos glaciares son similares, experimentando una baja importante en la superficie a partir del año 1990, situación que se consolida en el año 2000, produciéndose una estabilización en la superficie de ambos glaciares aun cuando el glaciar Río Blanco presenta variaciones más relevantes (baja importante el año 2005 y un aumento significativo el año 2010).

Tabla 24. Resultados obtenidos para el SACCG. Periodo 1990 – 2015.

| Glaciares | SACCG | | | | | |
|------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 | 2015 |
| Río Blanco | 24,08573 | 12,27464 | 11,790041 | 9,283803 | 12,878463 | 11,546247 |
| Marmolejo | 16,740347 | 10,023375 | 7,331461 | 8,200332 | 8,0694 | 8,21365 |

Fuente: CIT-UAI, 2015.

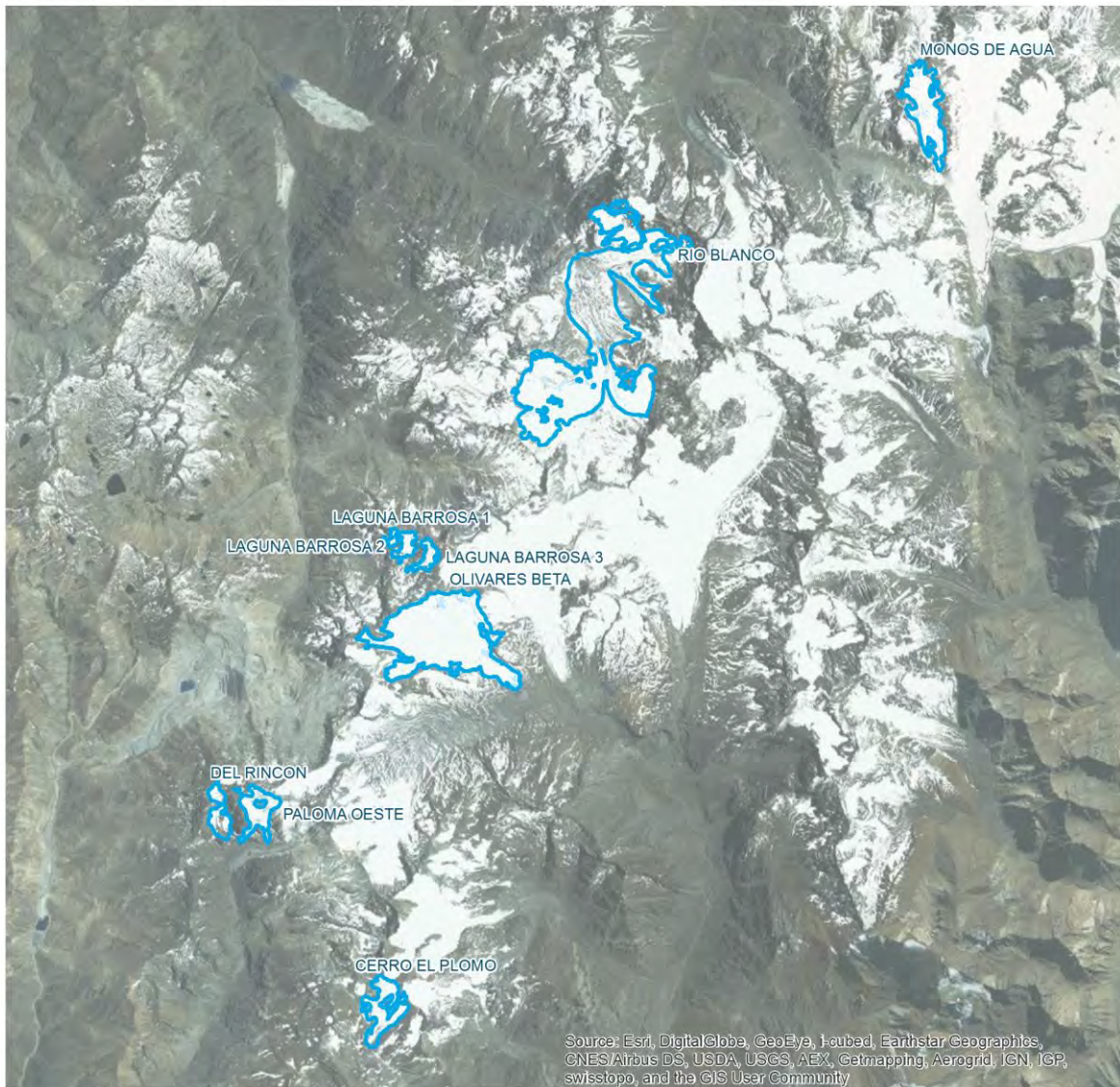
Gráfico 8. Comportamiento temporal y tendencias lineales del SACCG. Periodo 1990 – 2015.



Fuente: CIT-UAI, 2015.

INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE GLACIARES

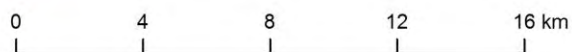
Área de Estudio: Monos de Agua - Cerro El Plomo | 1990



Fuente: Elaboración propia en base a MMA y Landsat

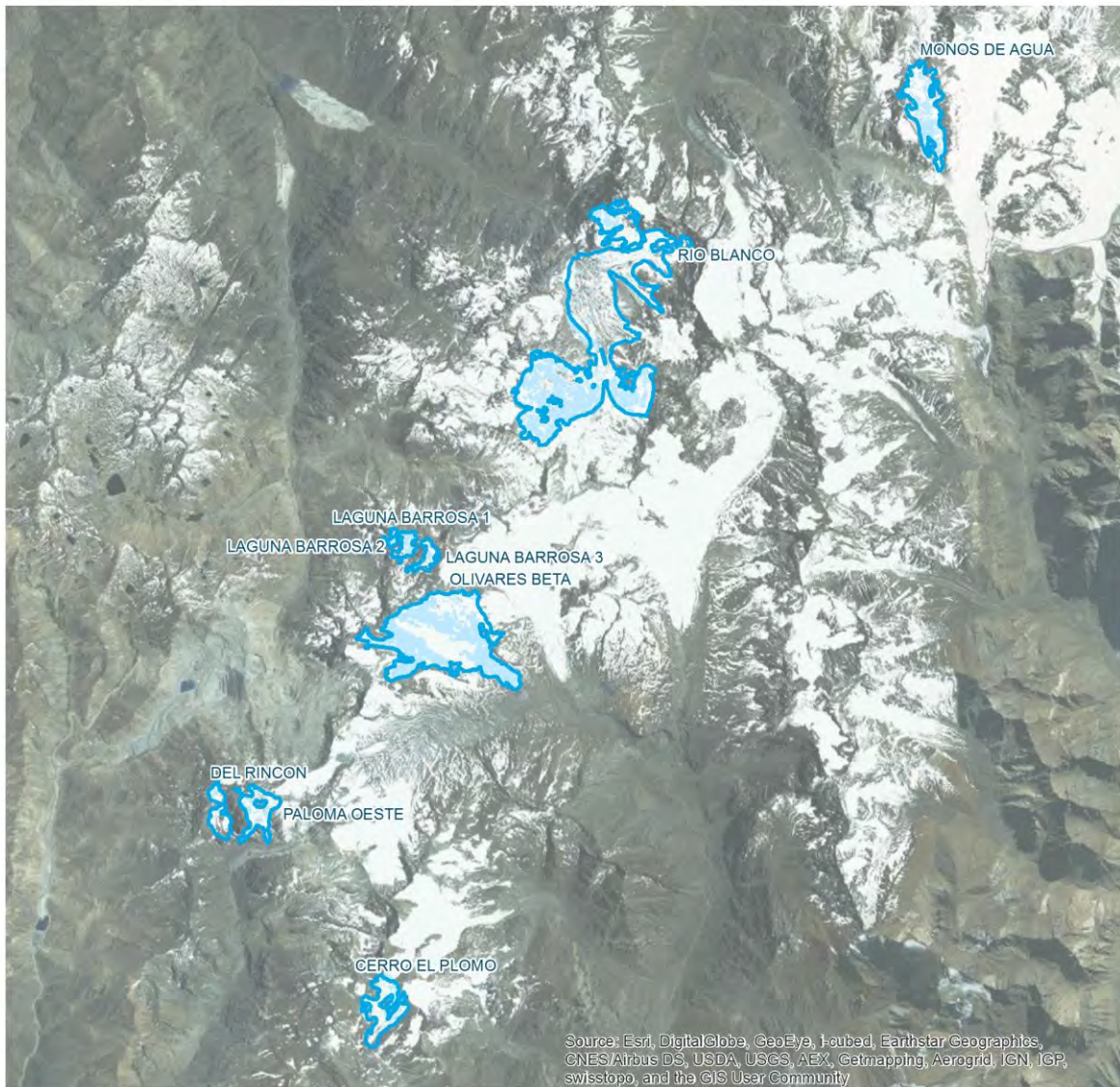
Simbología

-  Glaciares
-  SACCG - Indicador Superficie Anual Cuerpos Glaciares



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE GLACIARES

Área de Estudio: Monos de Agua - Cerro El Plomo | 1995

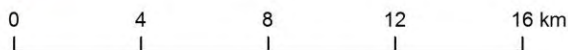


Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Ikonos, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Fuente: Elaboración propia en base a MMA y Landsat

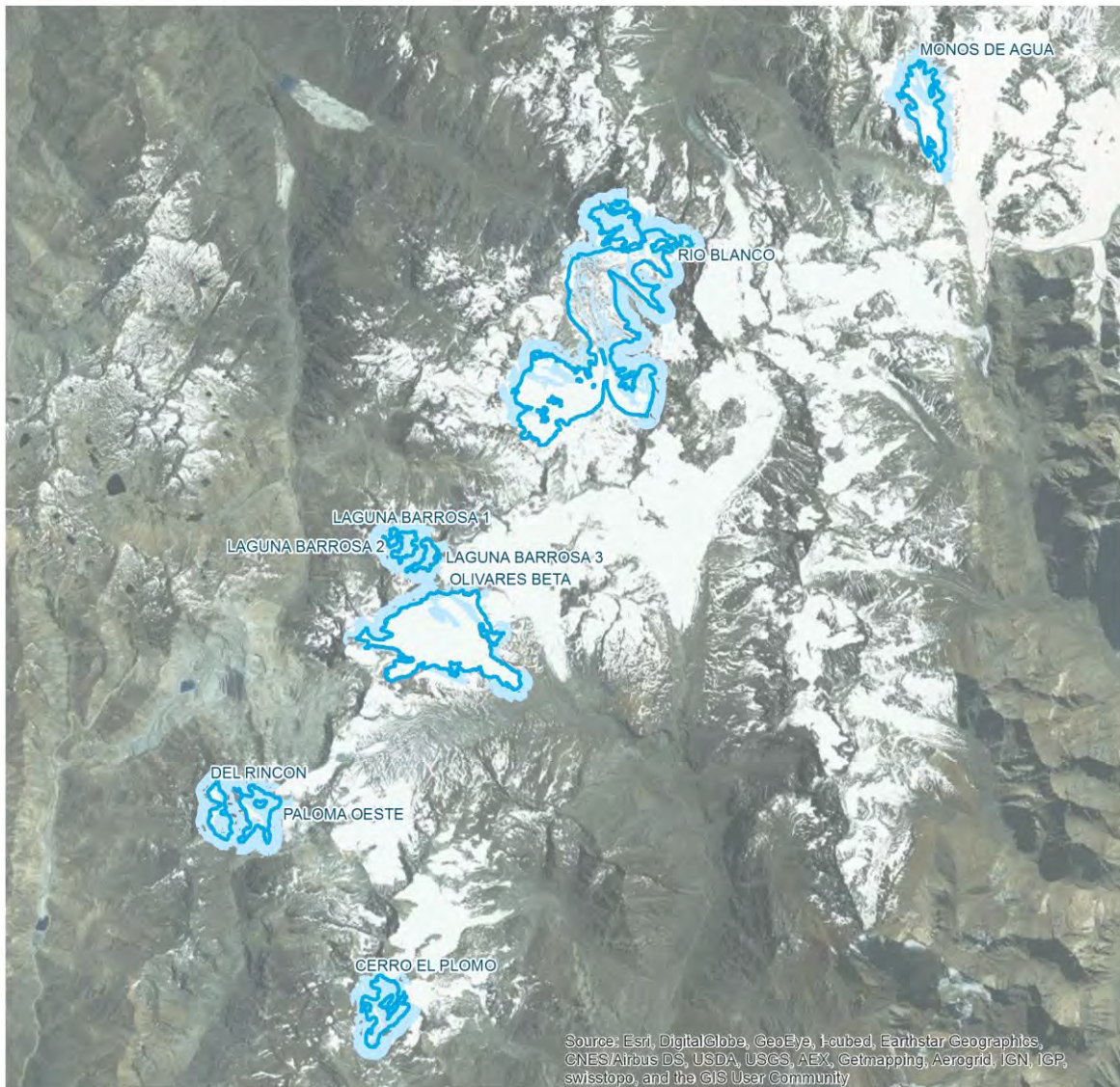
Simbología

-  Glaciares
-  SACCG - Indicador Superficie Anual Cuerpos Glaciares



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE GLACIARES

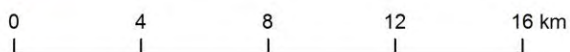
Área de Estudio: Monos de Agua - Cerro El Plomo | 2000



Fuente: Elaboración propia en base a MMA y Landsat

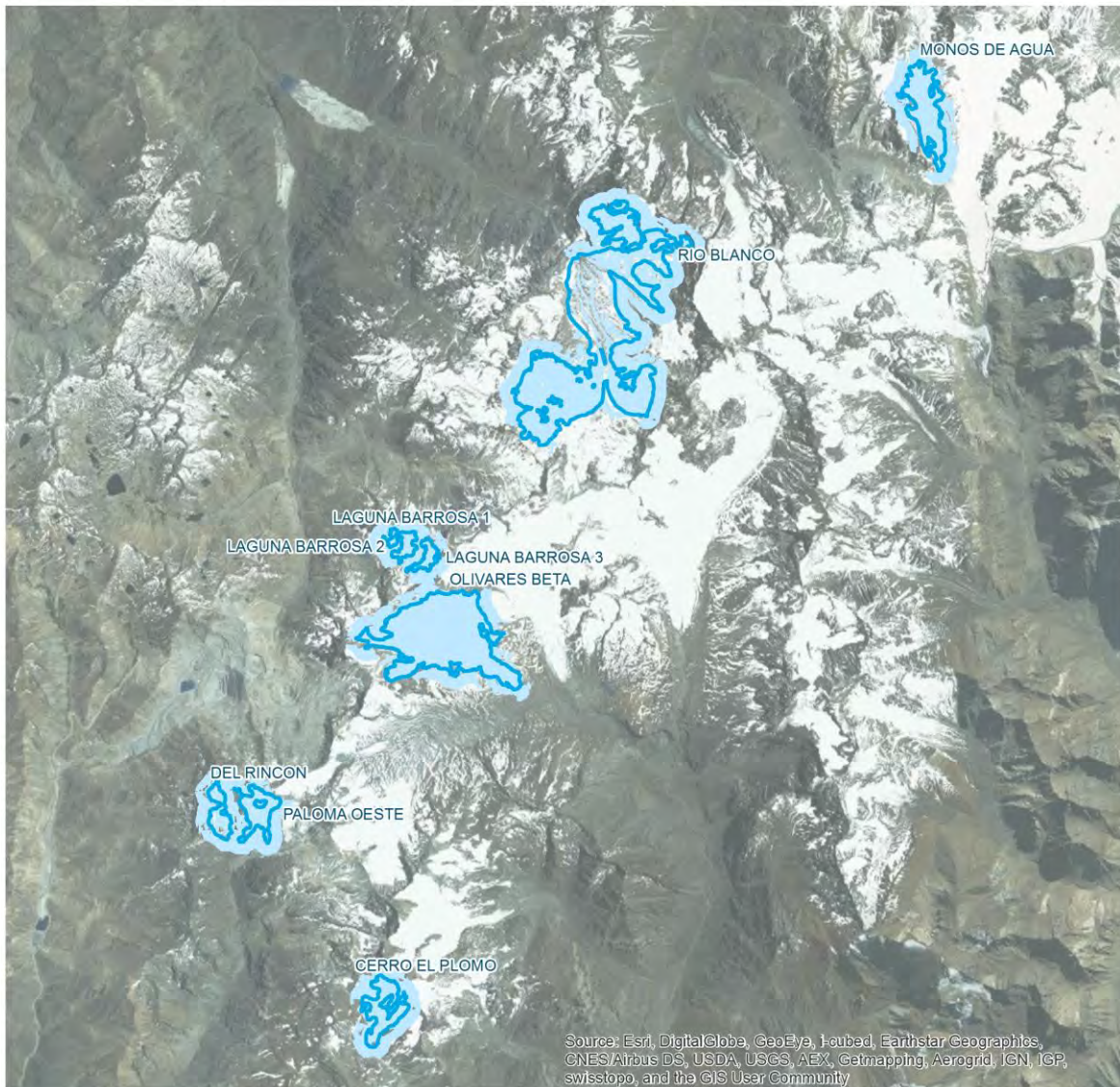
Simbología

-  Glaciares
-  SACCG - Indicador Superficie Anual Cuerpos Glaciares



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE GLACIARES

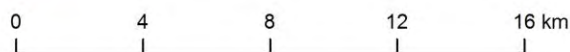
Área de Estudio: Monos de Agua - Cerro El Plomo | 2005



Fuente: Elaboración propia en base a MMA y Landsat

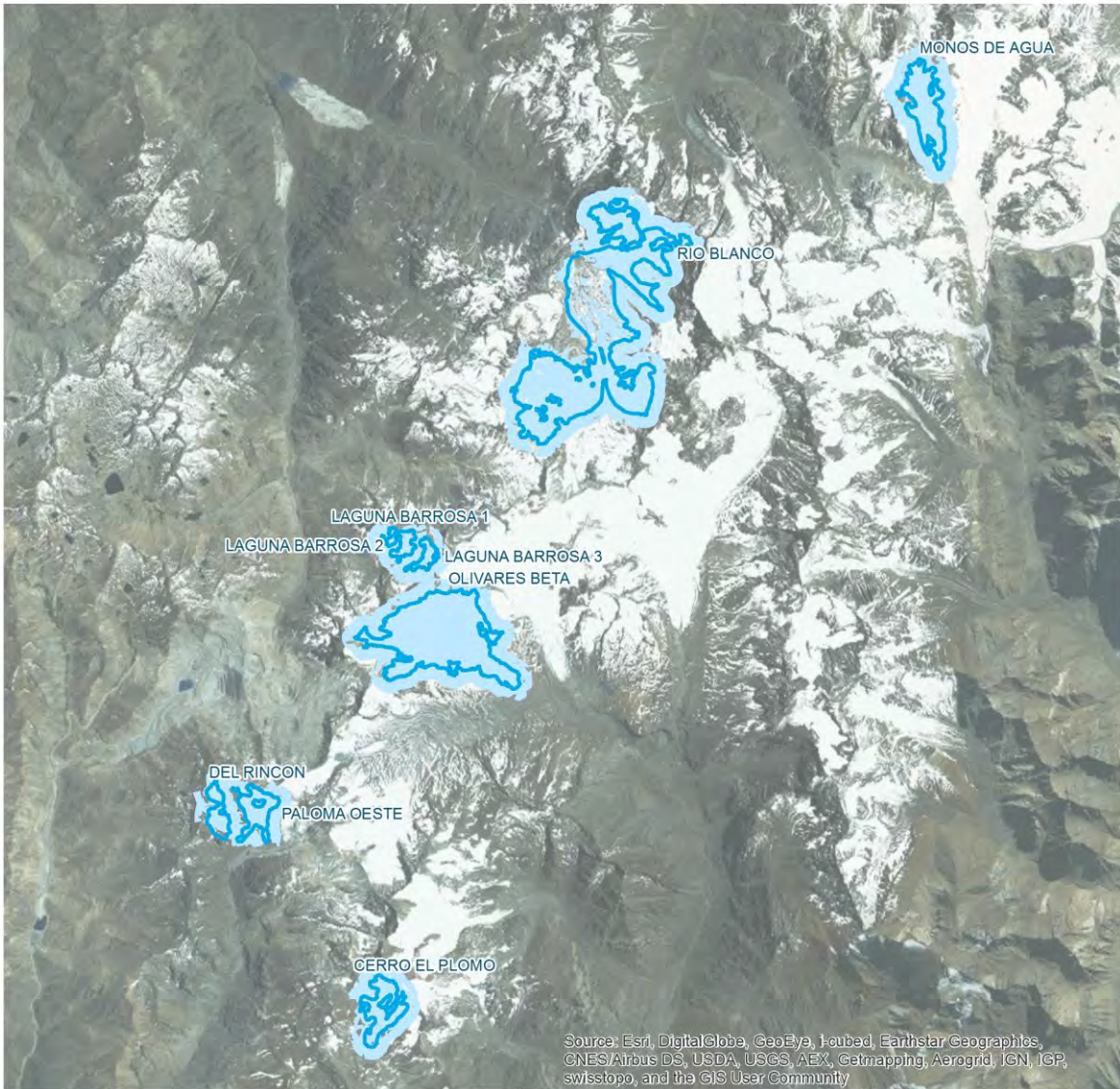
Simbología

-  Glaciares
-  SACCG - Indicador Superficie Anual Cuerpos Glaciares



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE GLACIARES

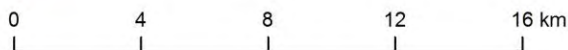
Área de Estudio: Monos de Agua - Cerro El Plomo | 2010



Fuente: Elaboración propia en base a MMA y Landsat

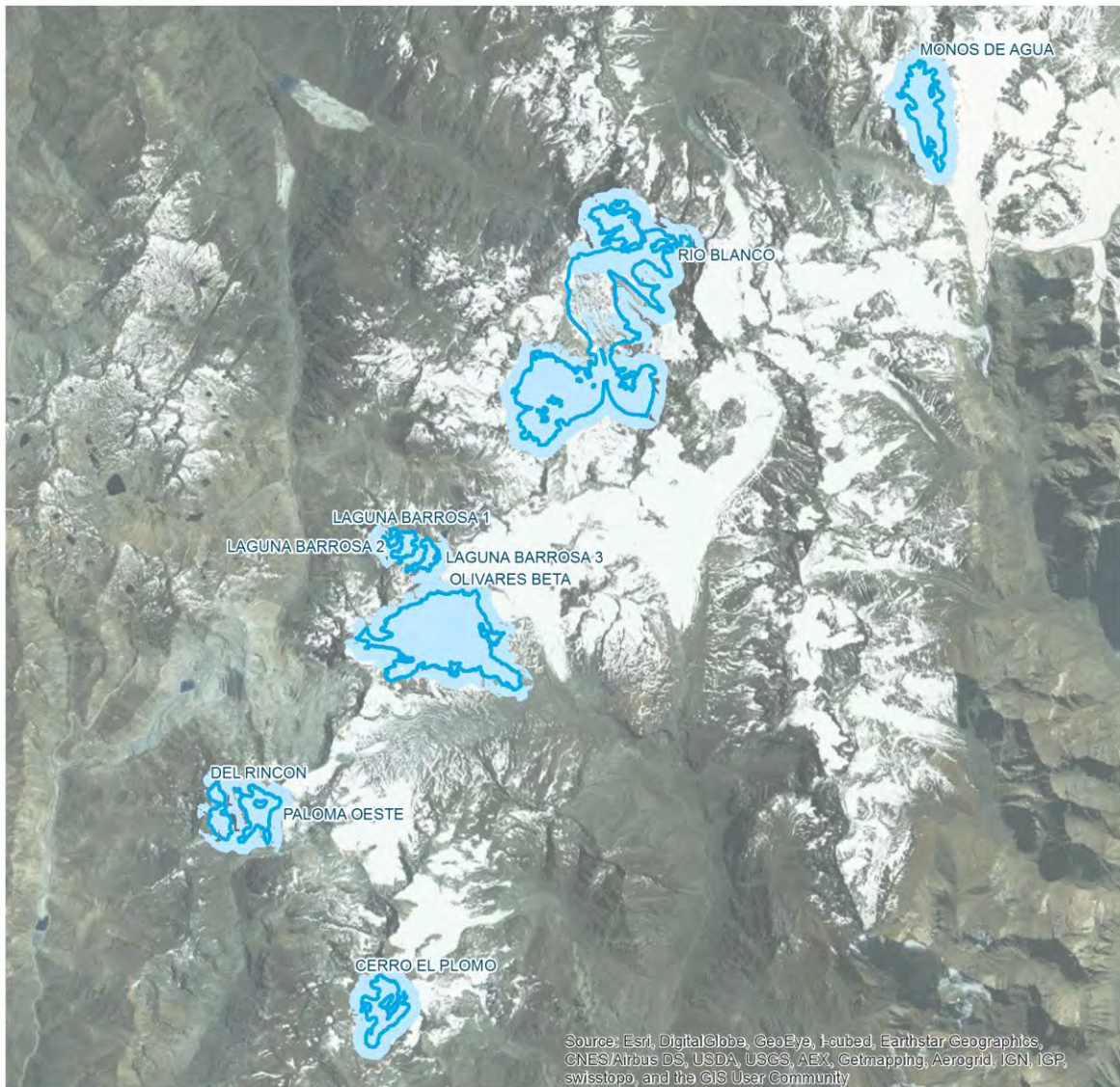
Simbología

-  Glaciares
-  SACCG - Indicador Superficie Anual Cuerpos Glaciares



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE GLACIARES

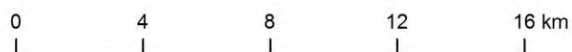
Área de Estudio: Monos de Agua - Cerro El Plomo | 2015



Fuente: Elaboración propia en base a MMA y Landsat

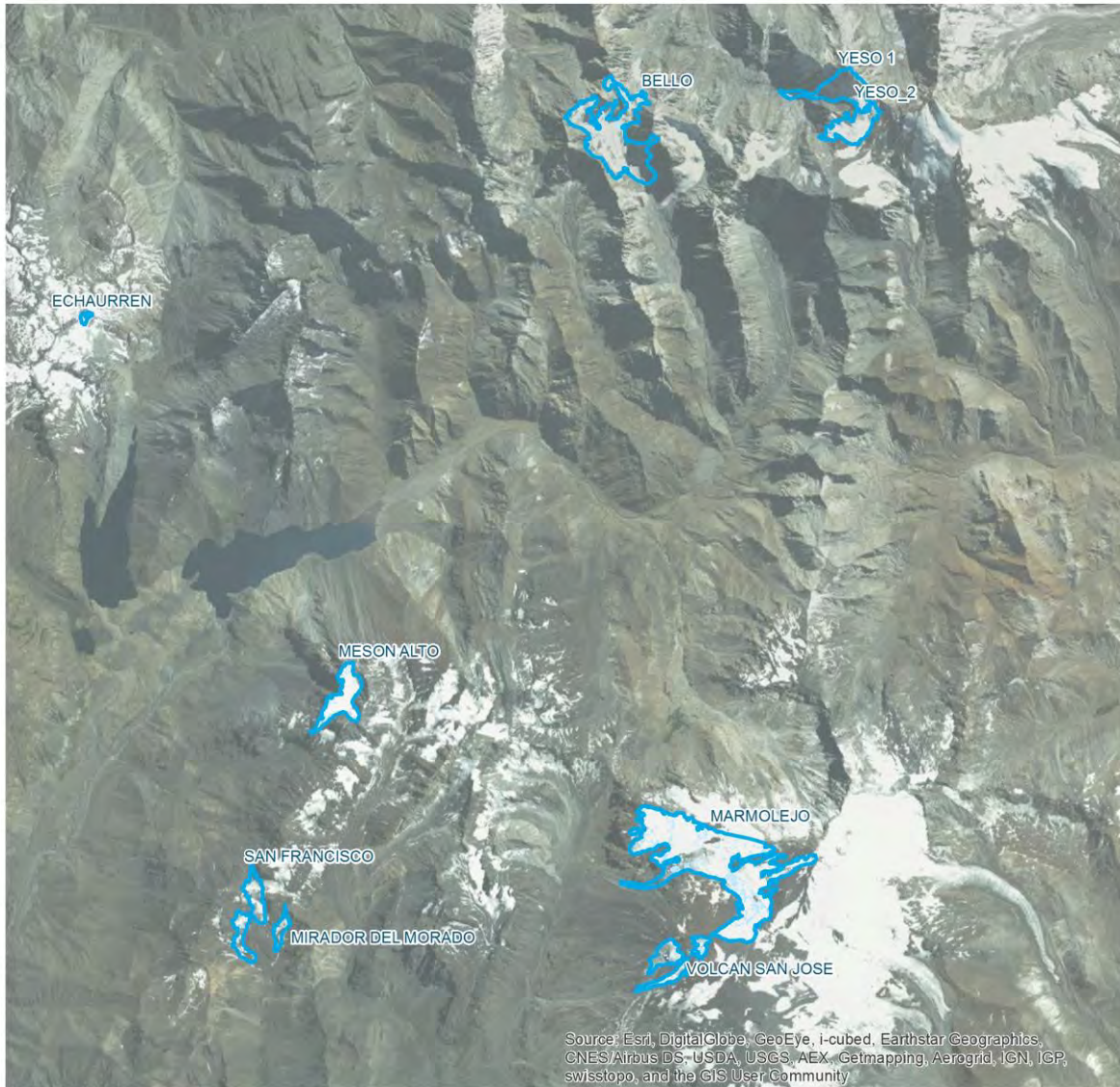
Simbología

-  Glaciares
-  SACCG - Indicador Superficie Anual Cuerpos Glaciares



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE GLACIARES

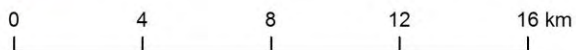
Área de Estudio: Yeso - Volcán San José | 1990



Fuente: Elaboración propia en base a MMA y Landsat

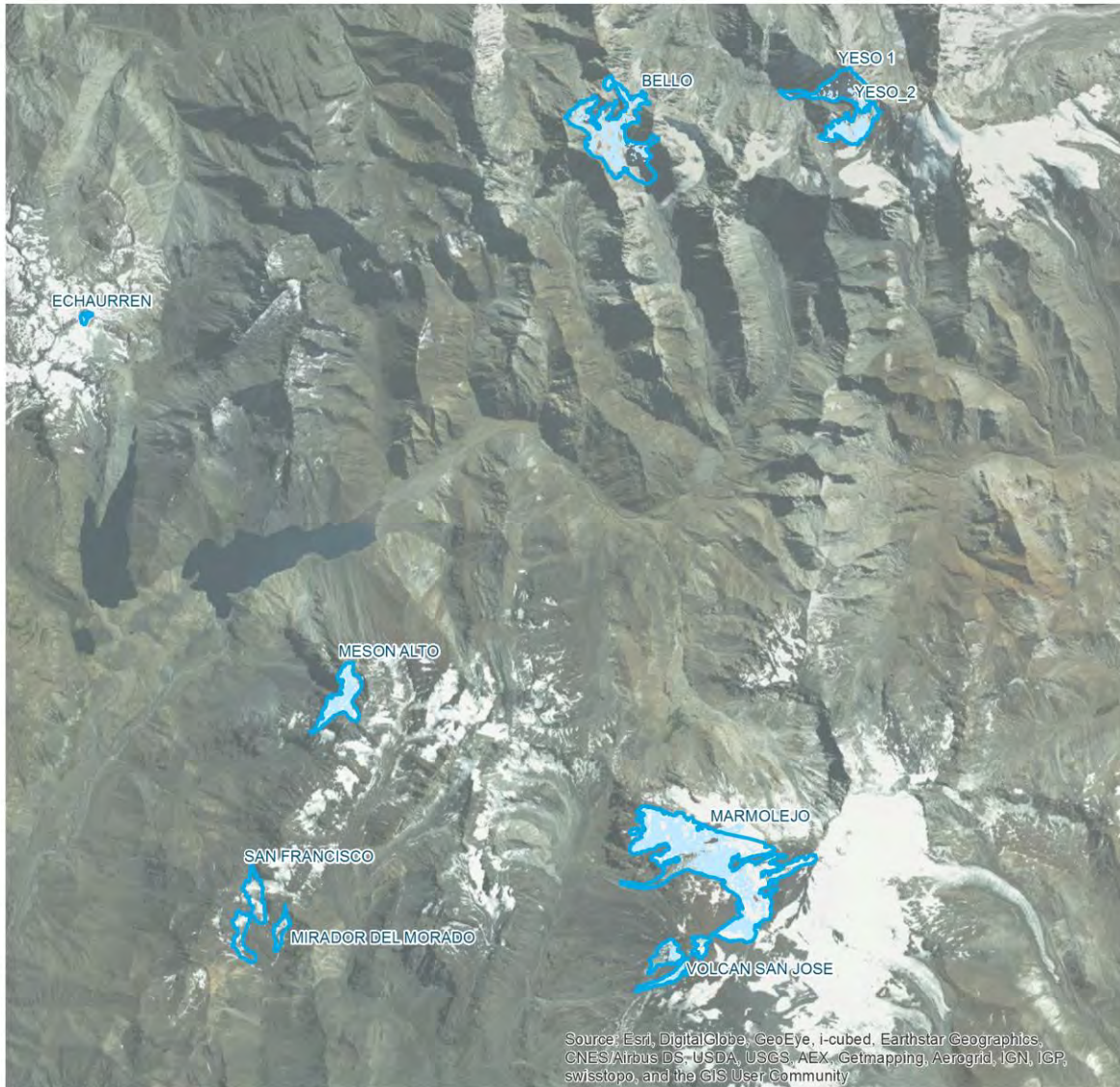
Simbología

- Glaciares
- SACCG - Indicador Superficie Anual Cuerpos Glaciares



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE GLACIARES

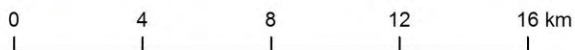
Área de Estudio: Yeso - Volcán San José | 1995



Fuente: Elaboración propia en base a MMA y Landsat

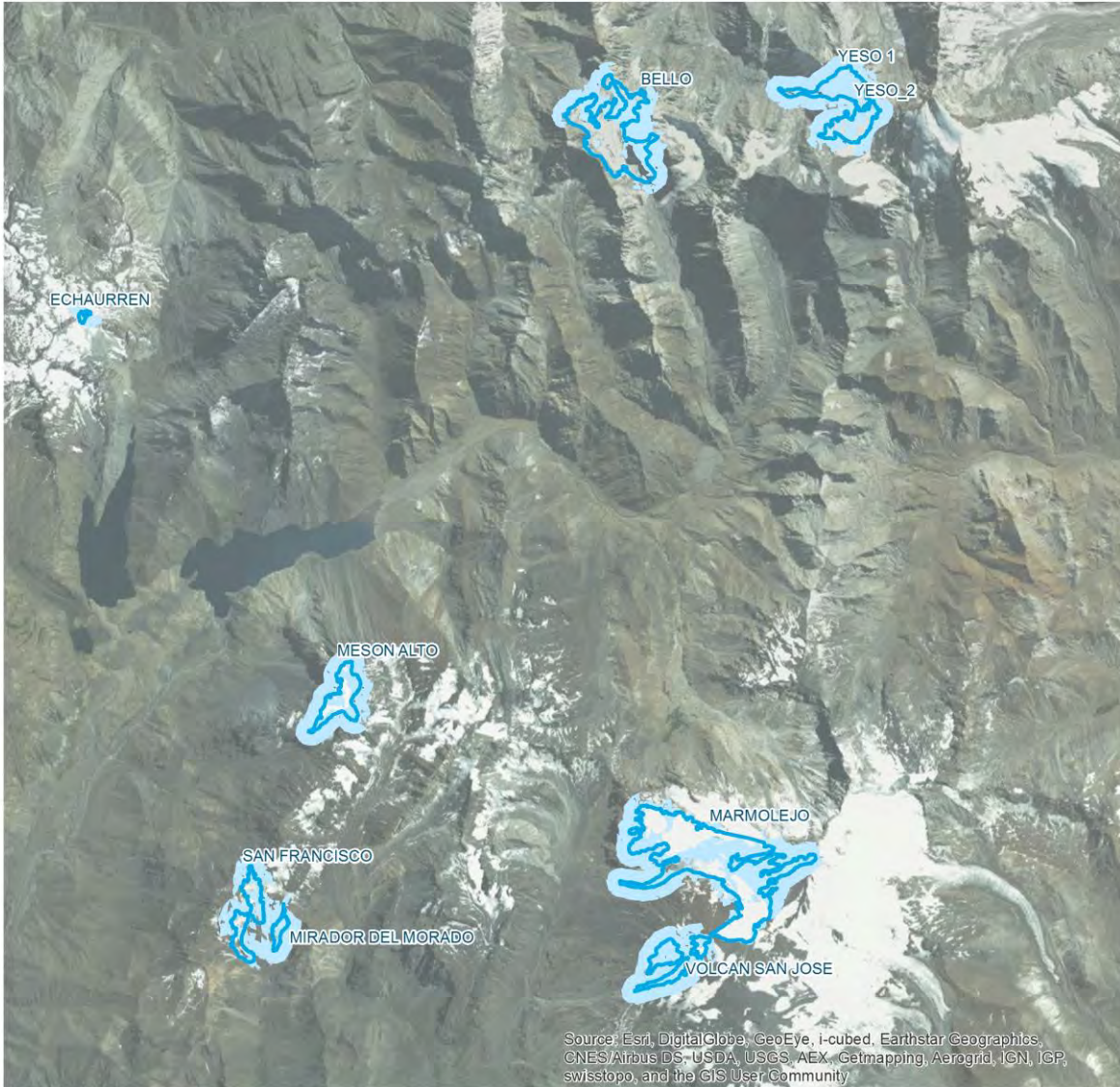
Simbología

-  Glaciares
-  SACCG - Indicador Superficie Anual Cuerpos Glaciares



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE GLACIARES

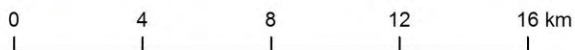
Área de Estudio: Yeso - Volcán San José | 2000



Fuente: Elaboración propia en base a MMA y Landsat

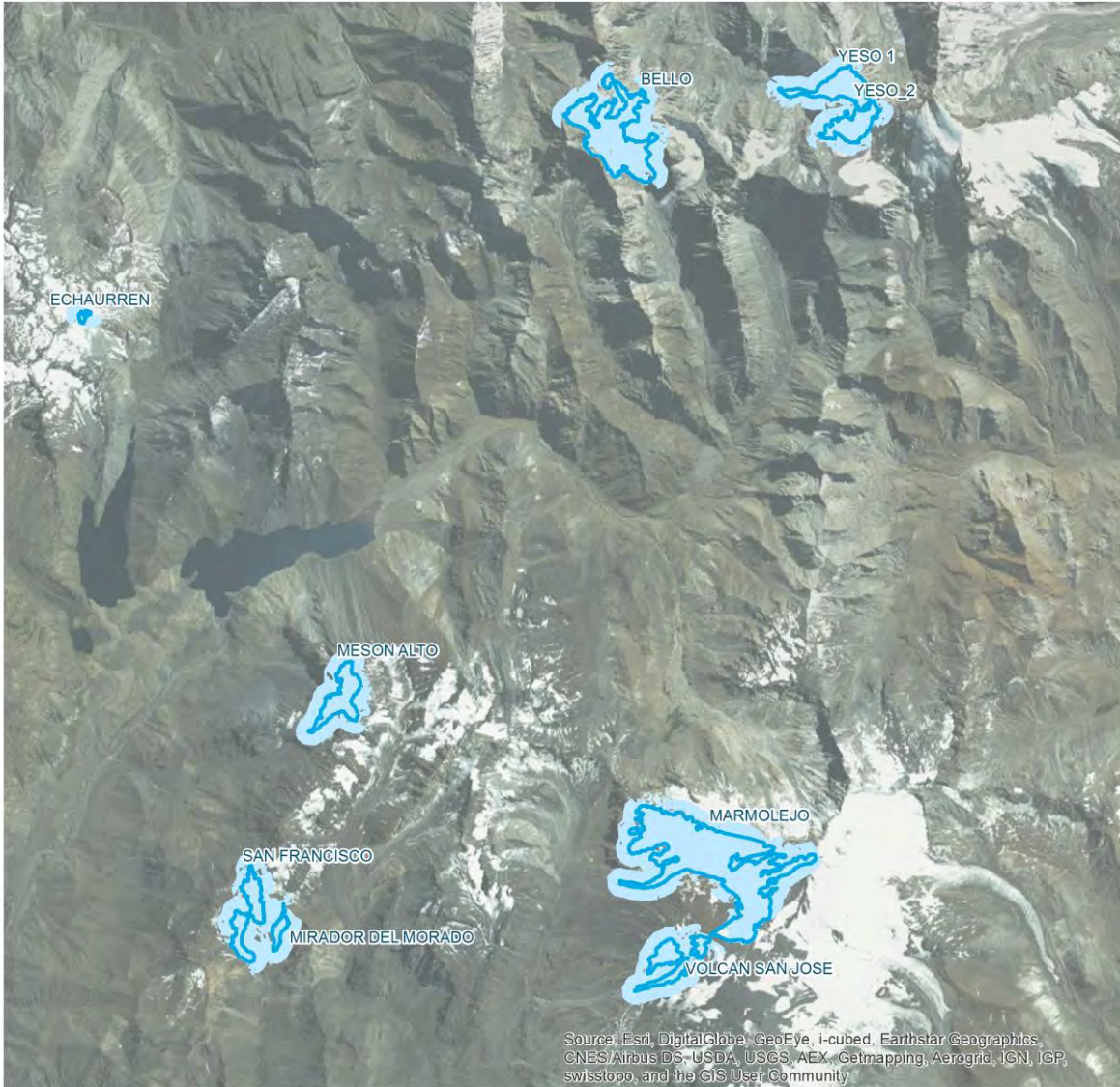
Simbología

- Glaciares
- SACCG - Indicador Superficie Anual Cuerpos Glaciares



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE GLACIARES

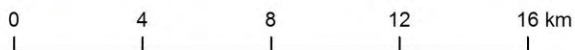
Área de Estudio: Yeso - Volcán San José | 2005



Fuente: Elaboración propia en base a MMA y Landsat

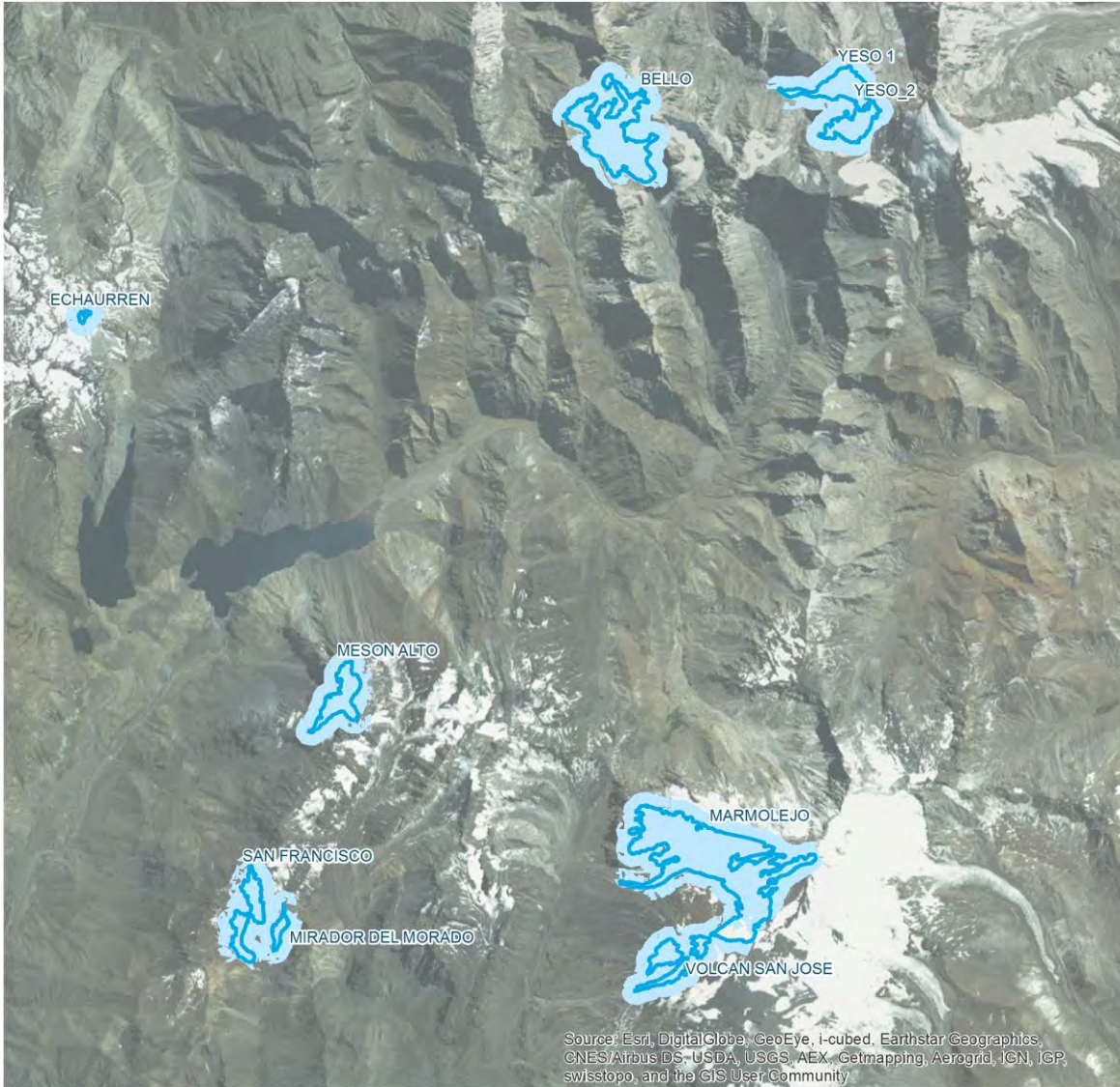
Simbología

- Glaciares
- SACCG - Indicador Superficie Anual Cuerpos Glaciares



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE GLACIARES

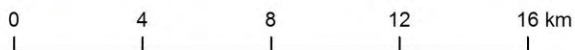
Área de Estudio: Yeso - Volcán San José | 2010



Fuente: Elaboración propia en base a MMA y Landsat

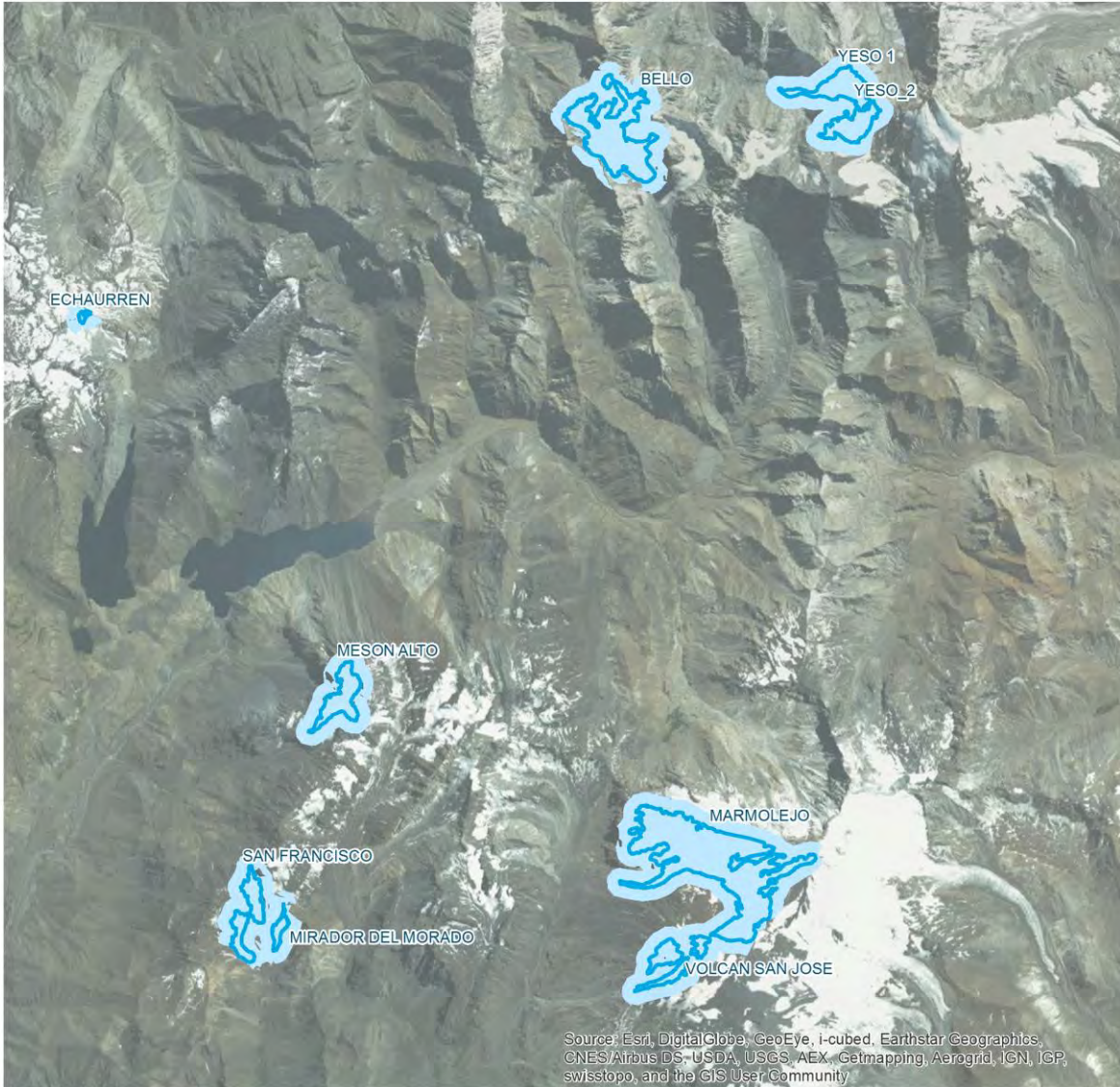
Simbología

- Glaciares
- SACCG - Indicador Superficie Anual Cuerpos Glaciares



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE GLACIARES

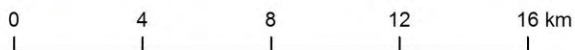
Área de Estudio: Yeso - Volcán San José | 2015



Fuente: Elaboración propia en base a MMA y Landsat

Simbología

-  Glaciares
-  SACCG - Indicador Superficie Anual Cuerpos Glaciares



6. Indicador desarrollado para el ambiente urbano

6.1 Superficie anual promedio de vegetación por manzana urbana (SACVMU)

Las variables utilizadas para la construcción del indicador del ambiente urbano corresponden a NDVI y manzanas censales. La caracterización para conocer los resultados posibles del mismo se fueron generados para las ciudades de Antofagasta y Santiago, a modo de ejemplo de los resultados posibles, ya que son centros urbanos de fácil contraste debido a las condiciones ambientales que las caracterizan. Sin embargo, el indicador se encuentra construido para poder calcular la vegetación urbana de las 20 ciudades restantes del país.

Tabla 25. Ciudades caracterizadas con el indicador ambiental.

| Sector | Región | Imágenes | Ángulo de elevación solar (°) | Ángulo de azimut solar (°) | Distancia al Sol (UA) | Ángulo de elevación solar (°) |
|-------------|-----------------------|-------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| Antofagasta | Región de Antofagasta | L5017605071 | 49,72 | 65,68 | 1,015 | 49,72 |
| | | L5017605183 | 32,95 | 38,47 | 0,989 | 32,95 |
| | | L5017610085 | 48,15 | 57,15 | 0,998 | 48,15 |
| | | L5017610229 | 40,74 | 45,69 | 1,012 | 40,74 |
| | | L5017690014 | 51,13 | 95,69 | 0,983 | 51,13 |
| | | L5017690238 | 37,78 | 54,64 | 1,011 | 37,78 |
| | | L5017695124 | 32,93 | 50,78 | 1,008 | 32,93 |
| | | L5017695268 | 42,68 | 68,1 | 1,002 | 42,68 |
| | | L7017600146 | 36,10 | 37,34 | 1,000 | 36,10 |
| | | L7017600338 | 62,03 | 94,12 | 1,003 | 62,03 |
| | | L8017615067 | 53,21 | 65,60 | 0,993 | 53,21 |
| | | L8017615115 | 43,22 | 42,08 | 1,006 | 43,22 |
| Santiago | Región Metropolitana | L5338305064 | 45,04 | 61,20 | 1,016 | 45,04 |
| | | L5338305304 | 55,93 | 63,82 | 0,996 | 55,93 |
| | | L5338310030 | 52,63 | 74,85 | 1,016 | 52,63 |
| | | L5338310334 | 59,50 | 76,10 | 1,006 | 59,50 |
| | | L5338390119 | 27,95 | 46,72 | 1,010 | 27,95 |
| | | L5338390231 | 28,29 | 49,37 | 0,984 | 28,29 |
| | | L5338395005 | 48,89 | 87,11 | 1,000 | 48,89 |
| | | L5338395165 | 18,71 | 43,97 | 0,996 | 18,71 |
| | | L7338300059 | 47,40 | 62,42 | 1,017 | 47,40 |
| | | L7338300283 | 50,45 | 54,66 | 0,989 | 50,45 |
| | | L8338315060 | 48,51 | 60,16 | 0,991 | 48,51 |
| | | L8338315124 | 32,27 | 36,68 | 1,008 | 32,27 |

Fuente: CIT-UAJ, 2015.

6.2 SACVMU: resultados y tendencias. Periodo 1990 - 2015

Las tendencias respectivas al indicador de vegetación urbana se visualizan en la Tabla 26 respecto de sus valores quinquenales entre los años 1990 y 2015. A su vez, el comportamiento del indicador por ciudad es visible en el Gráfico 9, el que muestra una clara diferencia de la cobertura vegetal entre ambas ciudades. Al respecto se señala que la ciudad de Antofagasta presenta una tendencia a la disminución, aspecto que se puede corroborar con los valores de la tabla, mientras que en Santiago se observa una cobertura considerablemente mayor en comparación al caso anterior. Dichas situaciones se explican claramente por el contexto geográfico diferenciado para cada caso.

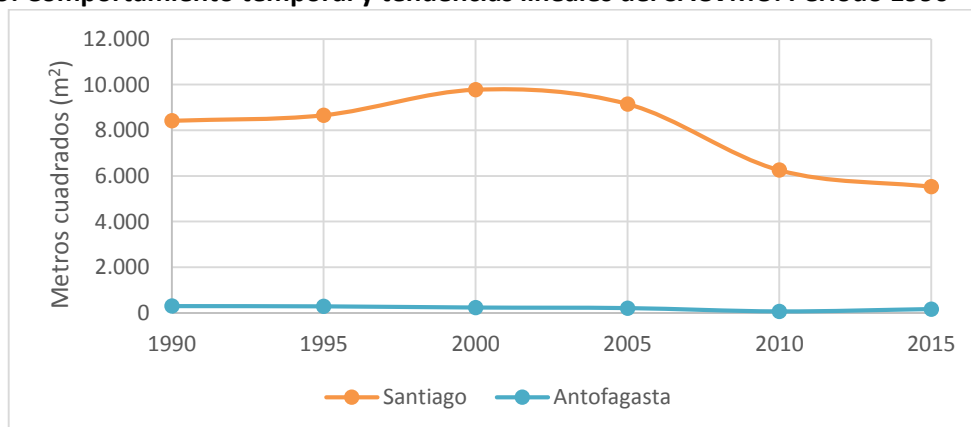
Adicionalmente es importante destacar que para el caso de Santiago, existe una clara segregación de la distribución de la vegetación que se explica por las diferencias comunales en el espacio público, pero sobre todo en el privado. En cuanto a la unidad de medida del indicador, esta es relativa a la superficie total de la manzana, la que es medida en metros cuadrados.

Tabla 26. Resultados obtenidos para el SACVMU. Periodo 1990 – 2015.

| Ciudades | SACVMU | | | | | |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 | 2015 |
| Antofagasta | 298,4 | 288,17 | 234,92 | 208,91 | 59,83 | 165,04 |
| Santiago | 8420,16 | 8662,83 | 9780,92 | 9158,09 | 6256,60 | 5530,57 |

Fuente: CIT-UAI, 2015.

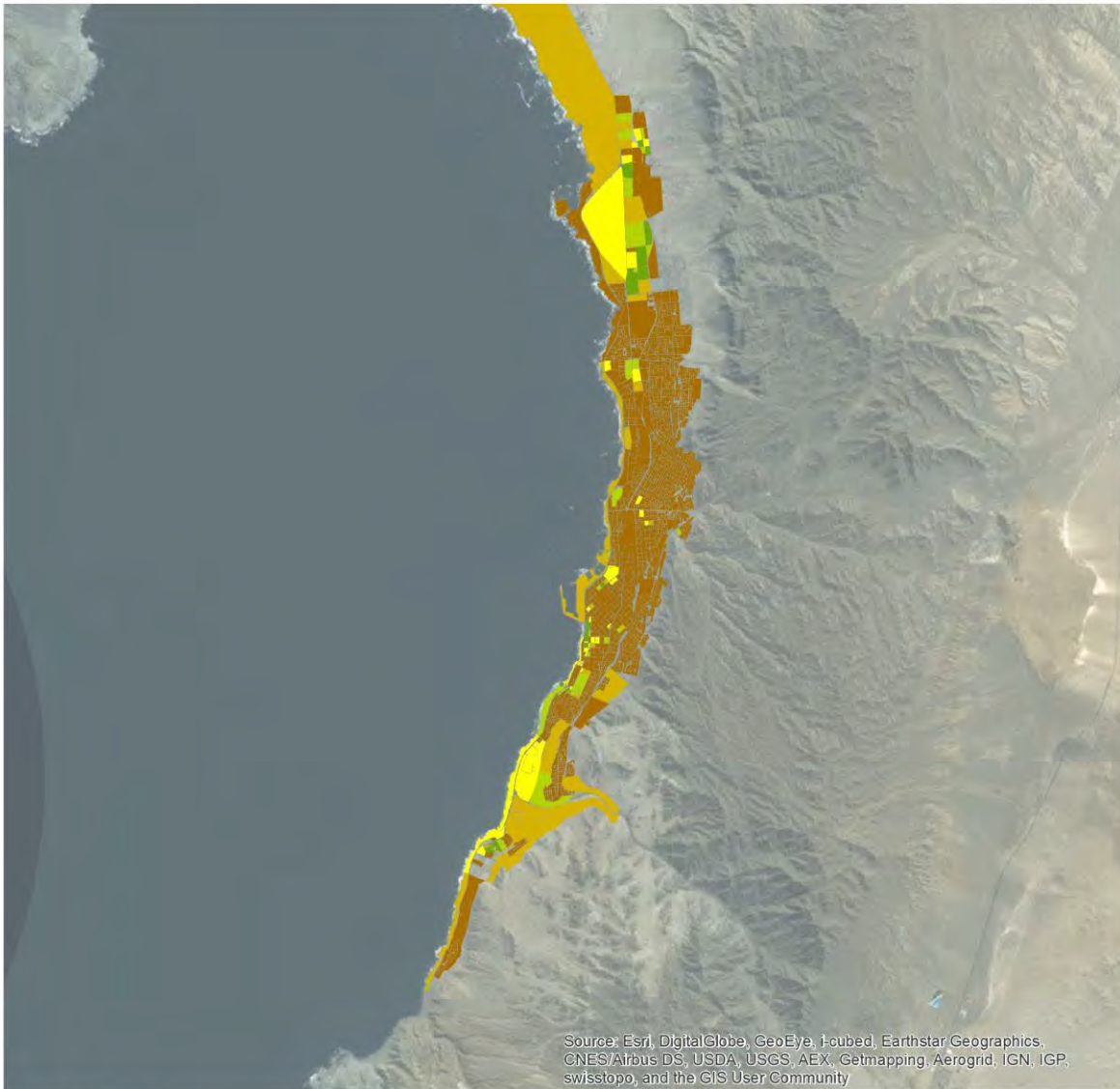
Gráfico 9. Comportamiento temporal y tendencias lineales del SACVMU. Periodo 1990 – 2015.



Fuente: CIT-UAI, 2015.

INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE ANUAL CUBIERTA CON VEGETACIÓN

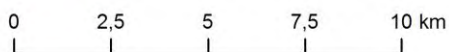
Área de Estudio: Antofagasta | 1990



Simbología

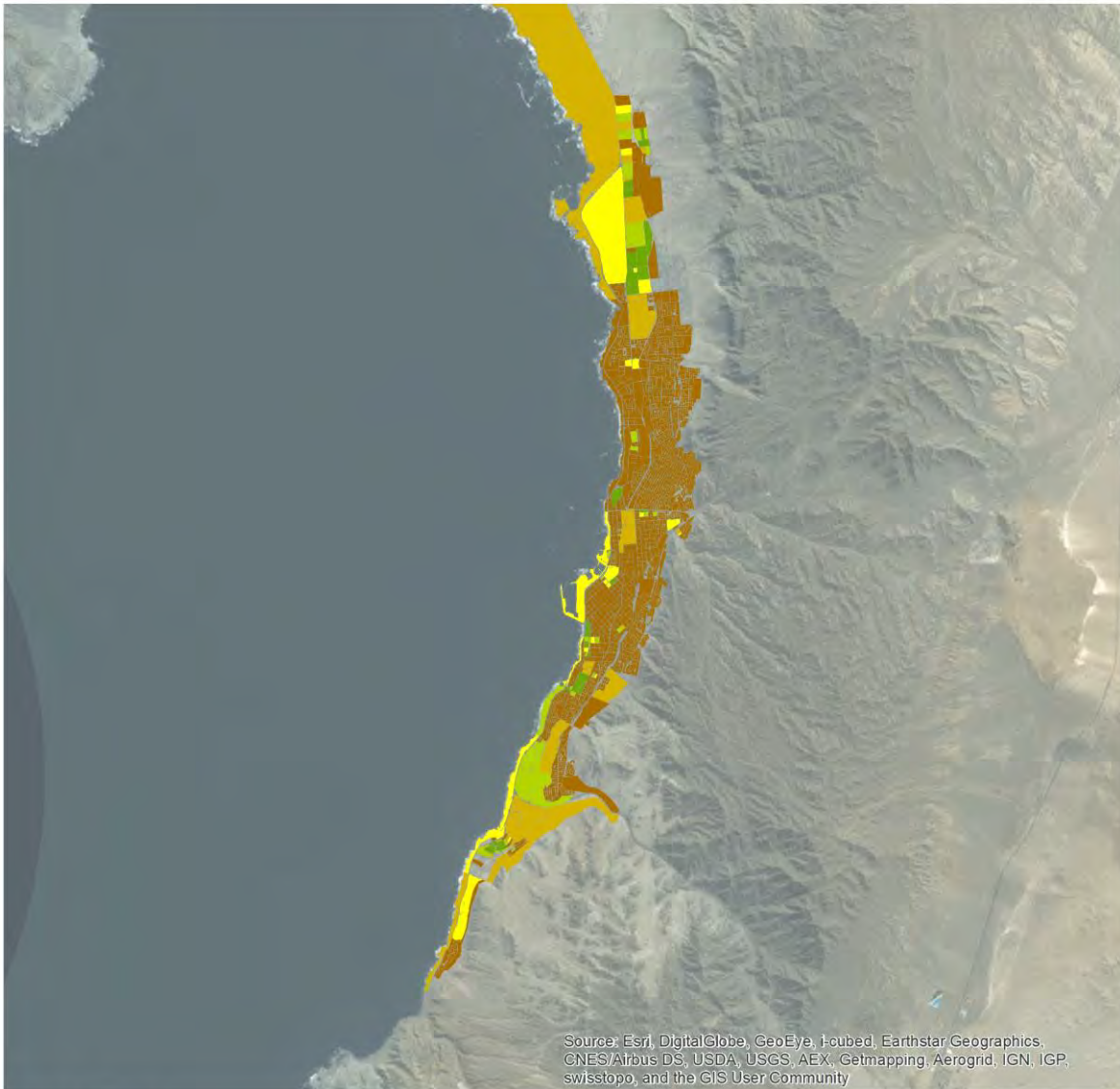
Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

| | | |
|-------------------------------------------------------------------|-------------|---------------|
| SACVMU - Superficie anual promedio cubierta con vegetación | 0,01 - 1,79 | 7,68 - 20,60 |
| Porcentaje de Vegetación por Manzana | 1,80 - 7,67 | 20,61 - 91,54 |
| 0,00 | | |



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE ANUAL CUBIERTA CON VEGETACIÓN

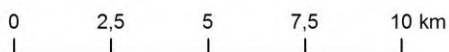
Área de Estudio: Antofagasta | 1995



Simbología

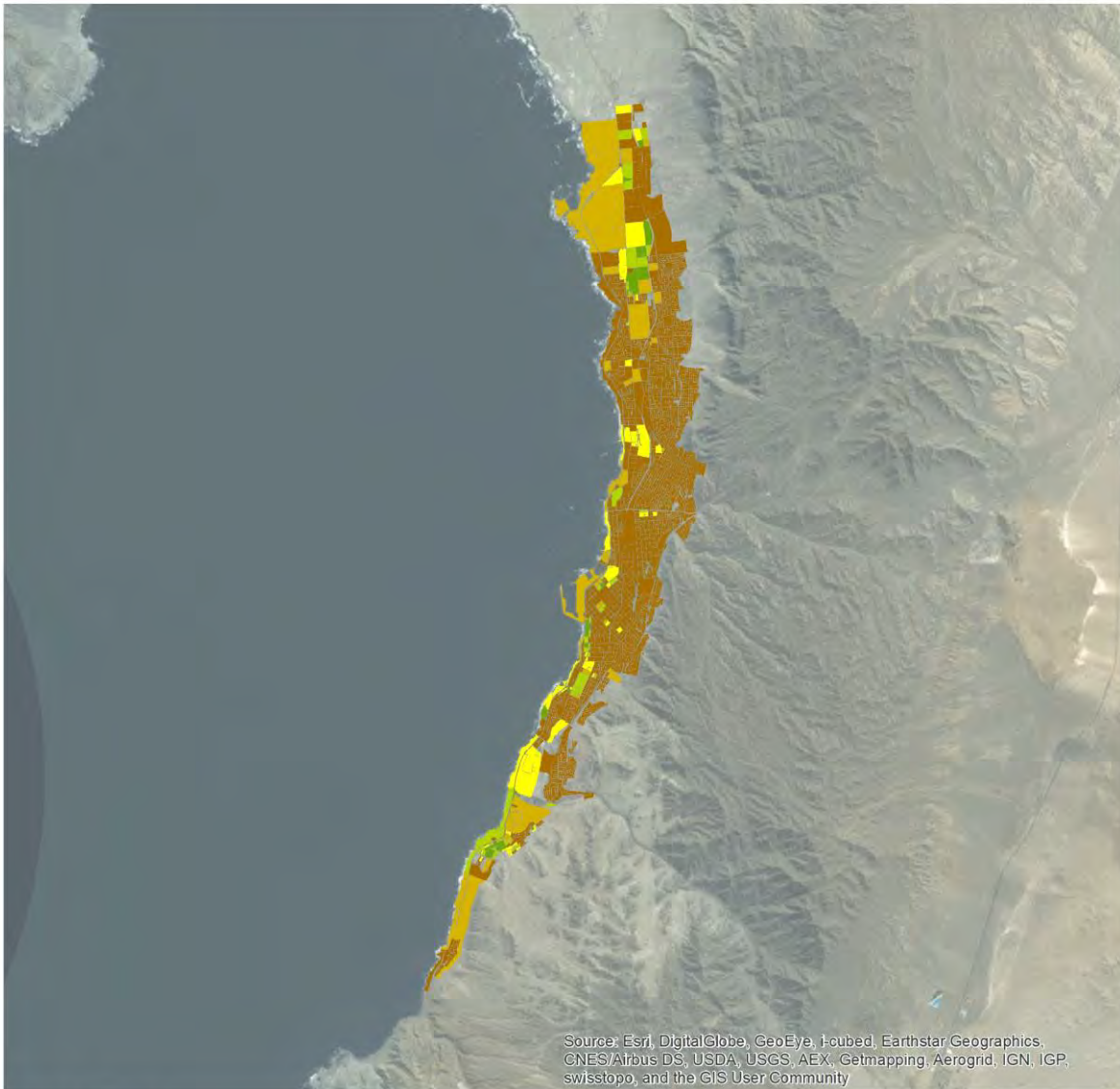
Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

| | | |
|-------------------------------------------------------------------|-------------|----------------|
| SACVMU - Superficie anual promedio cubierta con vegetación | 0,01 - 0,96 | 3,45 - 12,72 |
| Porcentaje de Vegetación por Manzana | 0,97 - 3,44 | 12,73 - 100,00 |
| 0,00 | | |



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE ANUAL CUBIERTA CON VEGETACIÓN

Área de Estudio: Antofagasta | 2000



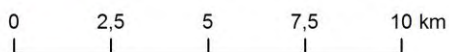
Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Simbología

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

| SACVMU - Superficie anual promedio cubierta con vegetación | |
|------------------------------------------------------------|----------------|
| 0,01 - 2,21 | 12,31 - 28,18 |
| 2,22 - 12,30 | 28,19 - 100,00 |

| Porcentaje de Vegetación por Manzana | |
|--------------------------------------|--|
| 0,00 | |



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE ANUAL CUBIERTA CON VEGETACIÓN






Área de Estudio: Antofagasta | 2005

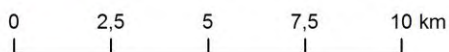


Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Simbología

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

| SACVMU - Superficie anual promedio cubierta con vegetación | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
|  | 0,00 |
|  | 0,01 - 2,69 |
|  | 11,22 - 27,86 |
|  | 2,70 - 11,21 |
|  | 27,87 - 100,00 |



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE ANUAL CUBIERTA CON VEGETACIÓN

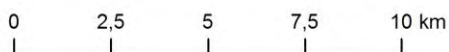
Área de Estudio: Antofagasta | 2010



Simbología

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

| | | |
|-------------------------------------------------------------------|-------------|----------------|
| SACVMU - Superficie anual promedio cubierta con vegetación | 0,01 - 1,69 | 6,99 - 19,19 |
| Porcentaje de Vegetación por Manzana | 1,70 - 6,98 | 19,20 - 100,00 |
| 0,00 | | |



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE ANUAL CUBIERTA CON VEGETACIÓN

Área de Estudio: Antofagasta | 2015

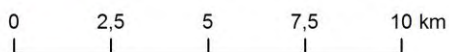


Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Simbología

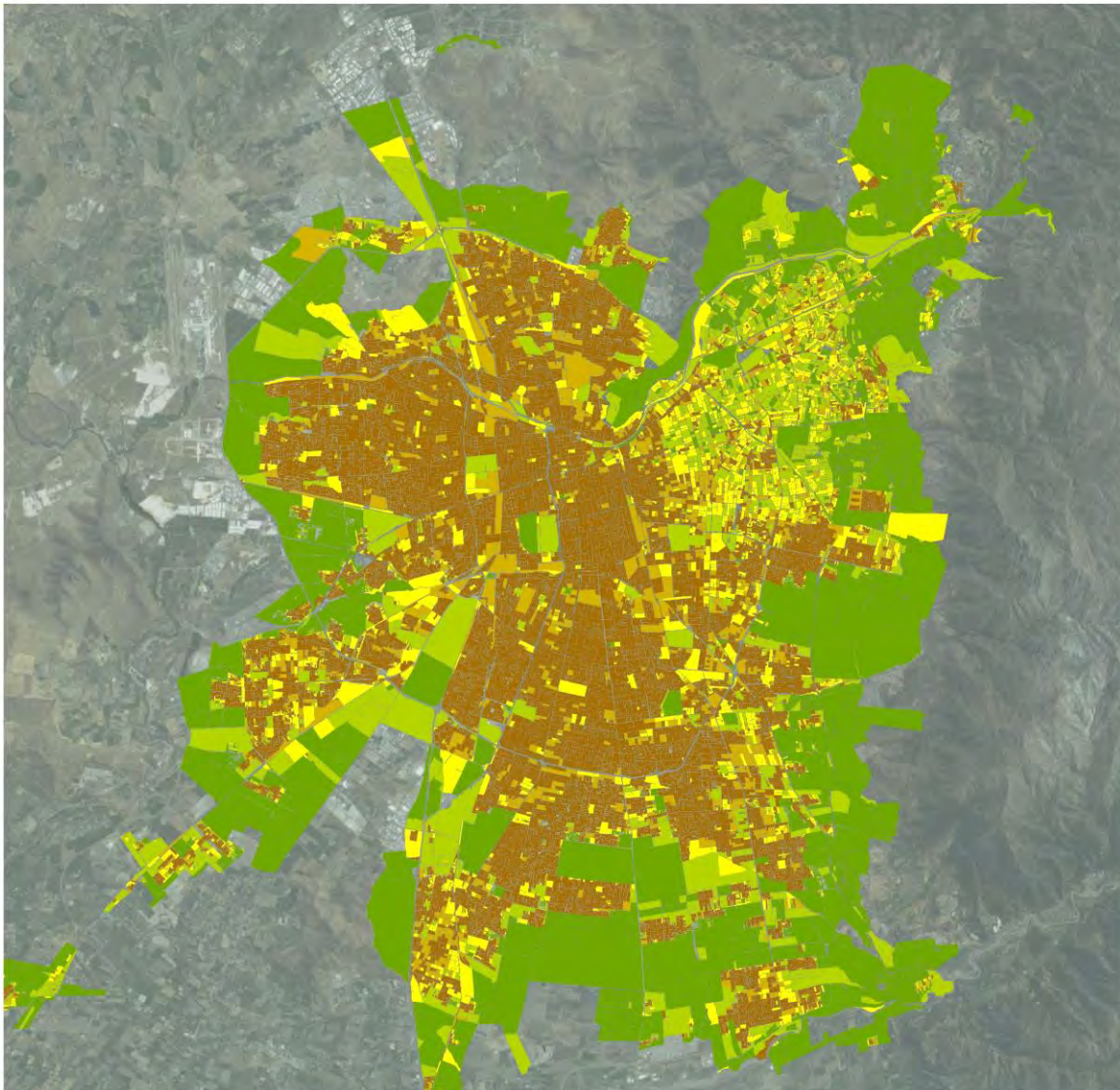
Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

| | | |
|-------------------------------------------------------------------|--------------|----------------|
| SACVMU - Superficie anual promedio cubierta con vegetación | 0,01 - 2,69 | 11,22 - 27,86 |
| Porcentaje de Vegetación por Manzana | 2,70 - 11,21 | 27,87 - 100,00 |
| 0,00 | | |








INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE ANUAL CUBIERTA CON VEGETACIÓN

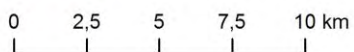
Área de Estudio: Santiago | 1990



Simbología

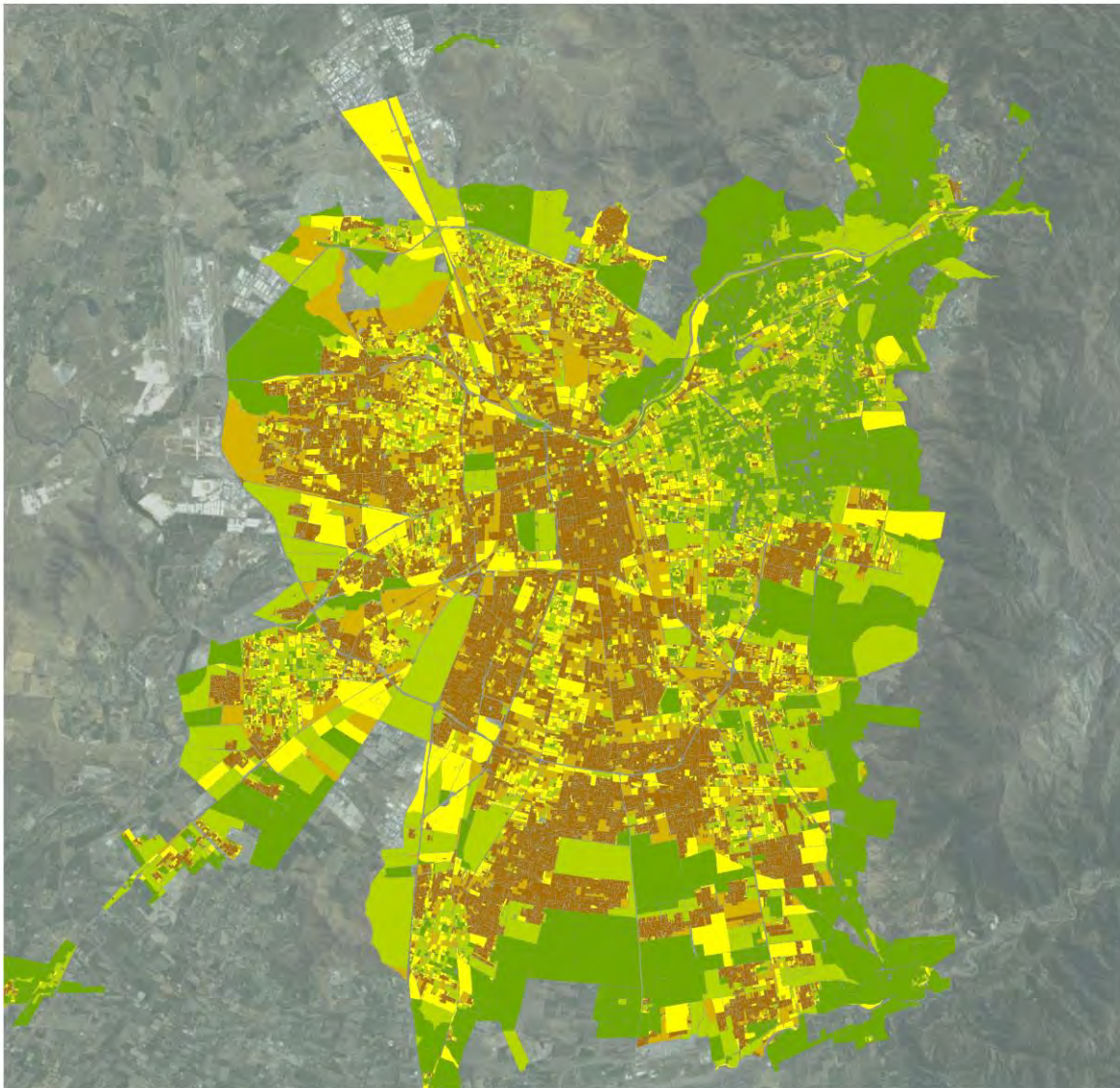
Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

| | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SACVMU - Superficie anual promedio cubierta con vegetación |  0,01 - 7,21 |  22,97 - 54,00 |
| Porcentaje de Vegetación por Manzana |  7,22 - 22,96 |  54,01 - 100,00 |
|  0,00 | | |



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE ANUAL CUBIERTA CON VEGETACIÓN

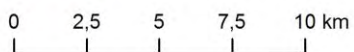
Área de Estudio: Santiago | 1995



Simbología

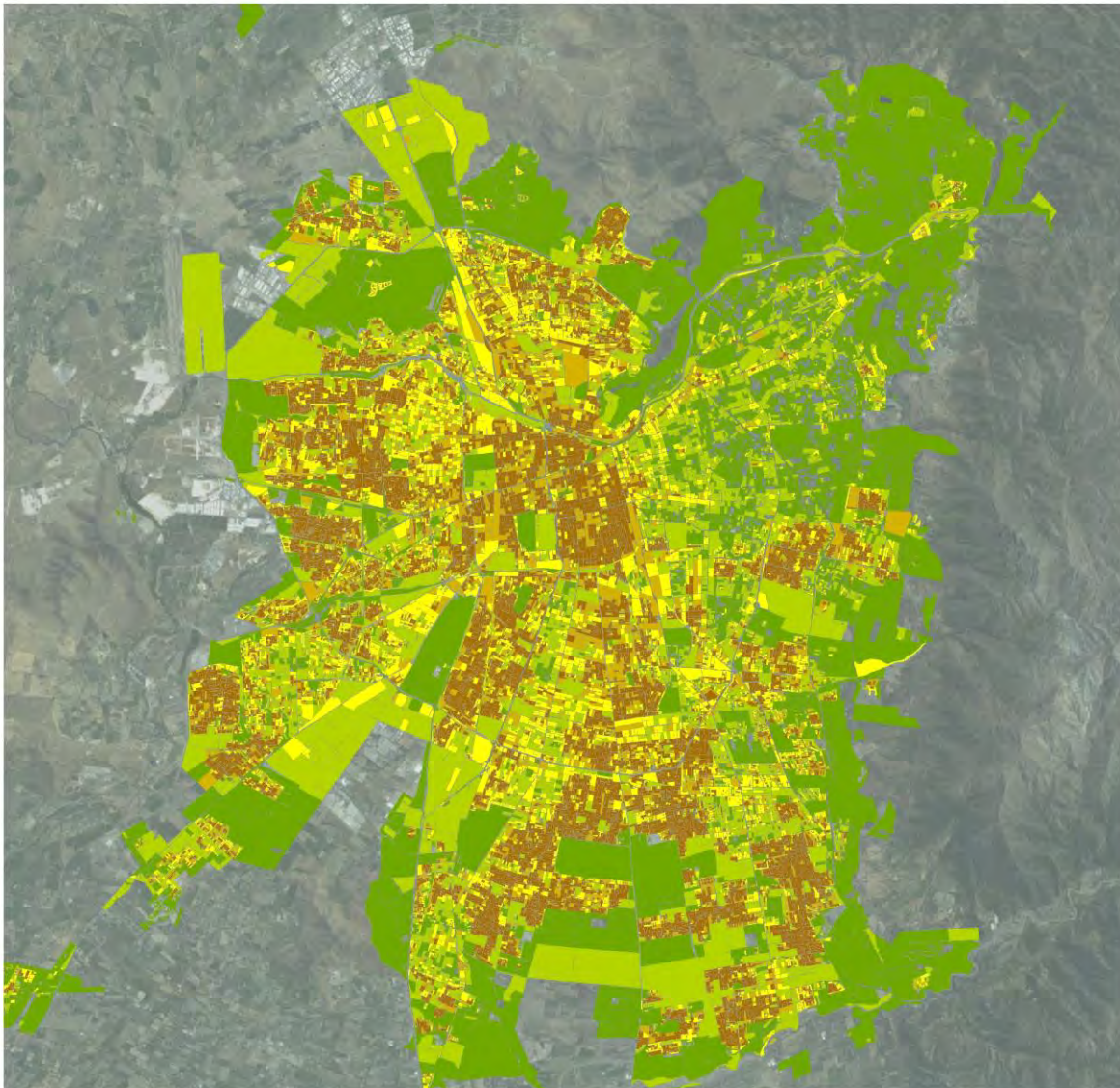
Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

| | | |
|-------------------------------------------------------------------|--------------|----------------|
| SACVMU - Superficie anual promedio cubierta con vegetación | 0,01 - 9,16 | 27,68 - 62,38 |
| Porcentaje de Vegetación por Manzana | 9,17 - 27,67 | 62,39 - 100,00 |
| | 0,00 | |



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE ANUAL CUBIERTA CON VEGETACIÓN

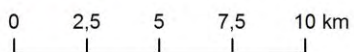
Área de Estudio: Santiago | 2000



Simbología

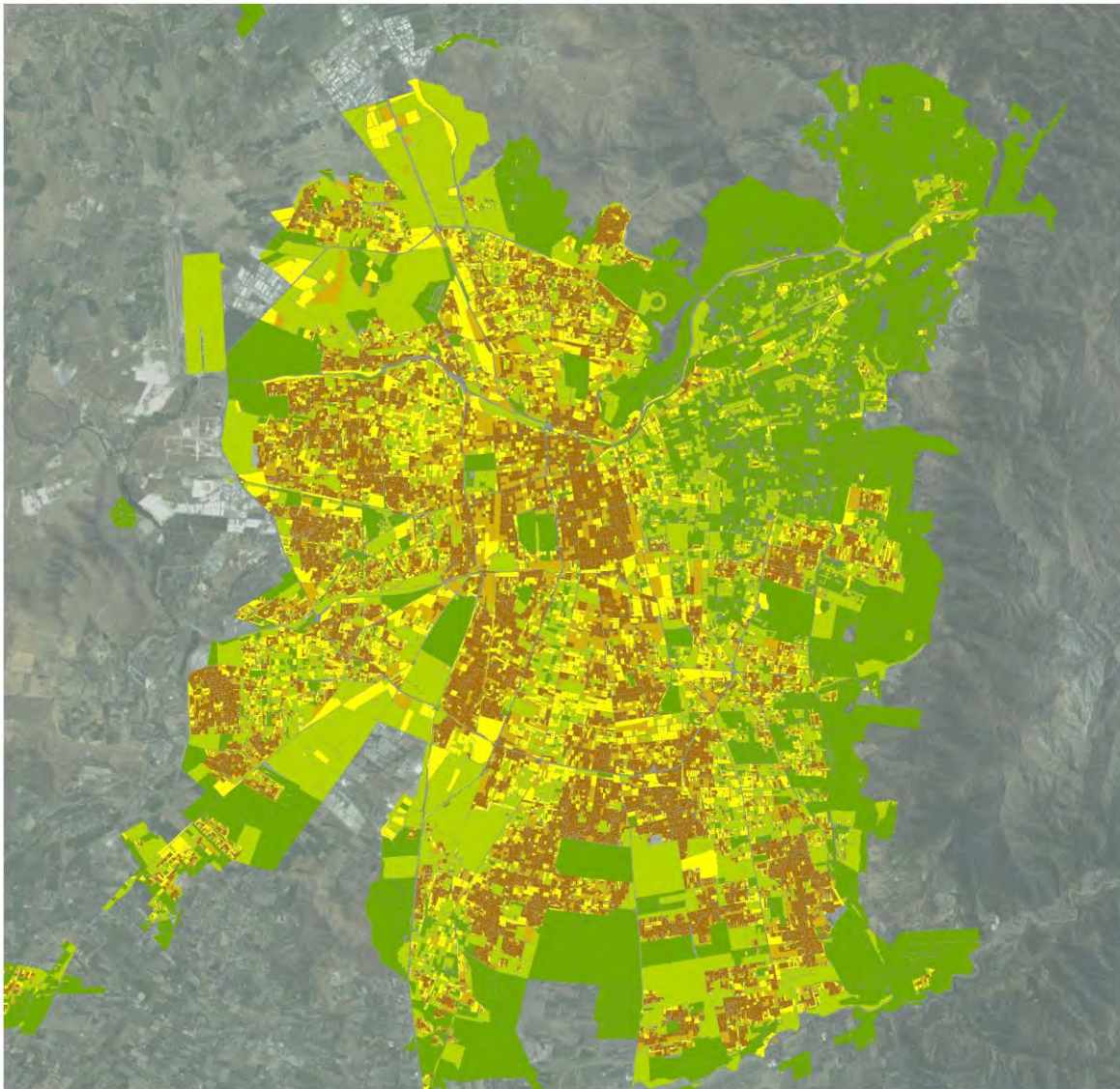
Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

| | | |
|-------------------------------------------------------------------|---------------|----------------|
| SACVMU - Superficie anual promedio cubierta con vegetación | 0,01 - 11,82 | 35,99 - 74,22 |
| Porcentaje de Vegetación por Manzana | 11,83 - 35,98 | 74,23 - 100,00 |
| 0,00 | | |



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE ANUAL CUBIERTA CON VEGETACIÓN

Área de Estudio: Santiago | 2005



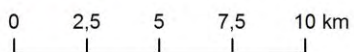
Simbología

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

| SACVMU - Superficie anual promedio cubierta con vegetación | |
|------------------------------------------------------------|----------------|
| 0,01 - 10,39 | 32,17 - 71,97 |
| 10,40 - 32,16 | 71,98 - 100,00 |

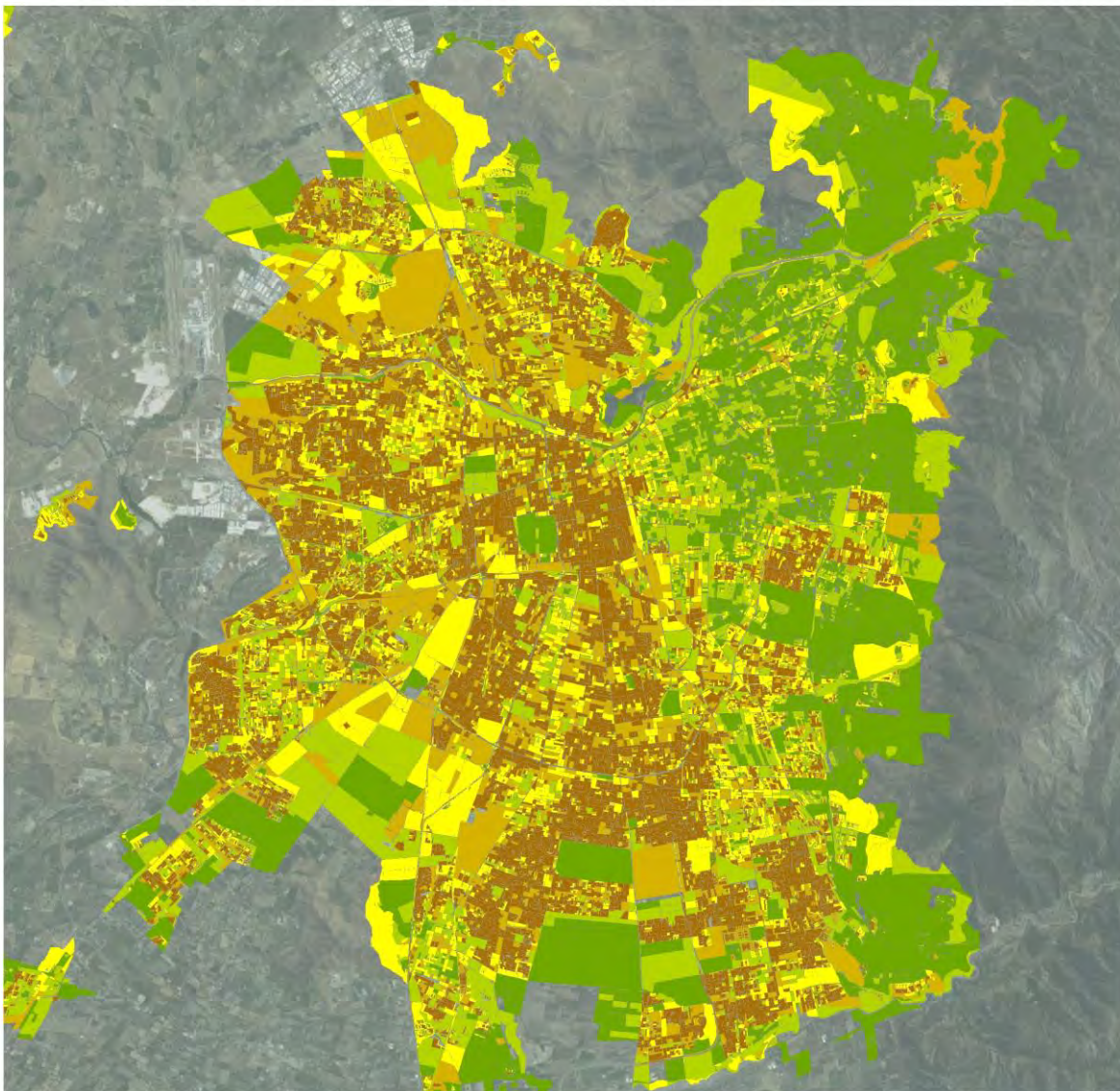
Porcentaje de Vegetación por Manzana

| |
|------|
| 0,00 |
|------|



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE ANUAL CUBIERTA CON VEGETACIÓN

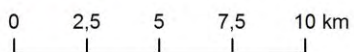
Área de Estudio: Santiago | 2010



Simbología

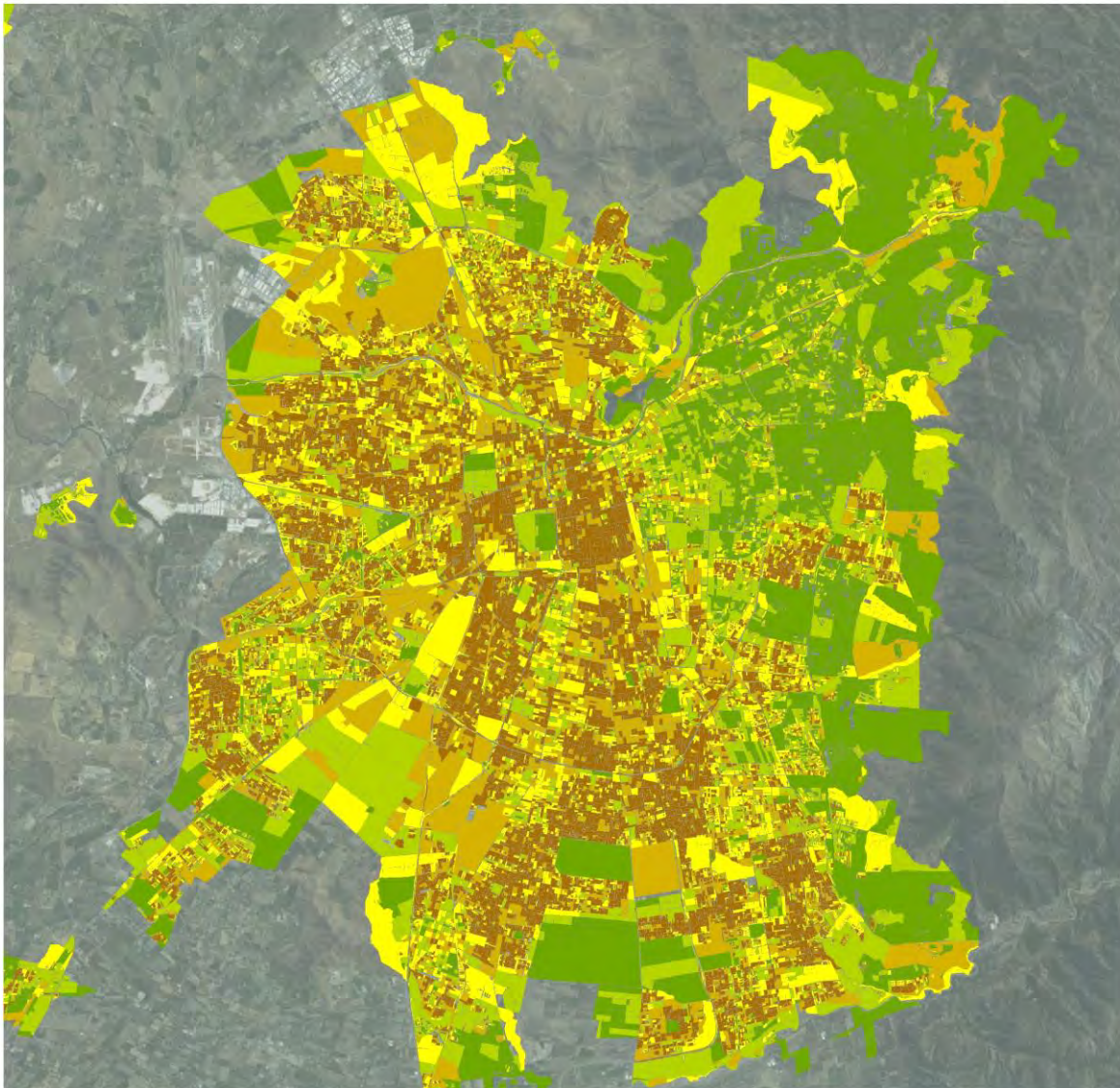
Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

| | | |
|-------------------------------------------------------------------|--------------|----------------|
| SACVMU - Superficie anual promedio cubierta con vegetación | 0,01 - 8,92 | 27,05 - 63,42 |
| Porcentaje de Vegetación por Manzana | 8,93 - 27,04 | 63,43 - 100,00 |
| | 0,00 | |



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE ANUAL CUBIERTA CON VEGETACIÓN

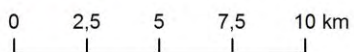
Área de Estudio: Santiago | 2015



Simbología

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

| | | |
|-------------------------------------------------------------------|--------------|----------------|
| SACVMU - Superficie anual promedio cubierta con vegetación | 0,01 - 7,92 | 23,65 - 55,43 |
| Porcentaje de Vegetación por Manzana | 7,93 - 23,64 | 55,44 - 100,00 |
| | 0,00 | |



7. Indicadores desarrollado para el ambiente humedales

7.1 Superficie anual cubierta con vegetación en el humedal (SACVH)

Las variables escogidas para la caracterización de los humedales del Alto Andino chileno se basan en dos variables, el NDVI y el NDWI. Para el caso particular de la superficie anual cubierta con vegetación, se utilizó el NDVI, caracterizando las unidades ecológicas a nivel comunal para General Lagos y Putre, ambas pertenecientes a la Región de Arica y Parinacota.

Cabe destacar que para la caracterización espacial de los humedales, dado el menor tamaño, en comparación con los otros fenómenos analizados, es que se decidió representar sólo dos de ellos, contiguos y pertenecientes a la cuenca del Río Lauca (ID_WETLAND = 1379 & 1373).

El detalle de las imágenes satelitales consideradas por humedal se exponen en la Tabla 27.

Tabla 27. Humedales caracterizados con el indicador ambiental.

| Sector | Región | Imágenes | Ángulo de elevación solar (°) | Ángulo de azimut solar (°) | Distancia al Sol (UA) | Ángulo de elevación solar (°) |
|---------------------|------------------------------|-------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| Subcuenca Río Lauca | Región de Arica y Parinacota | L5017305071 | 51,97 | 70,05 | 1,015 | 51,97 |
| | | L5017305183 | 36,73 | 39,76 | 0,989 | 36,73 |
| | | L5017310085 | 50,96 | 60,86 | 1,012 | 50,96 |
| | | L5017310229 | 44,20 | 47,91 | 1,012 | 44,20 |
| | | L5017390046 | 48,34 | 88,03 | 1,015 | 48,34 |
| | | L5017390206 | 34,14 | 48,76 | 0,988 | 34,14 |
| | | L5017395252 | 40,81 | 64,91 | 1,007 | 40,81 |
| | | L5017395348 | 49,63 | 104,03 | 0,984 | 49,63 |
| | | L7017300258 | 52,50 | 57,41 | 0,985 | 52,50 |
| | | L7017300322 | 63,16 | 95,45 | 0,999 | 63,16 |
| | | L8017315051 | 57,05 | 81,11 | 0,989 | 57,05 |
| | | L8017315131 | 43,53 | 39,57 | 1,010 | 43,53 |

Fuente: CIT-UAI, 2015.

7.1.1 SACVH: resultados y tendencias. Periodo 1990 – 2015

Respecto a los resultados, cabe destacar que si bien los humedales de ambas comunas presentan un comportamiento similar, en el caso de Putre, este es mucho más regular, con variaciones menores, mientras que en General Lagos, se experimentan importantes variaciones con un peak de superficie para el año 2005.

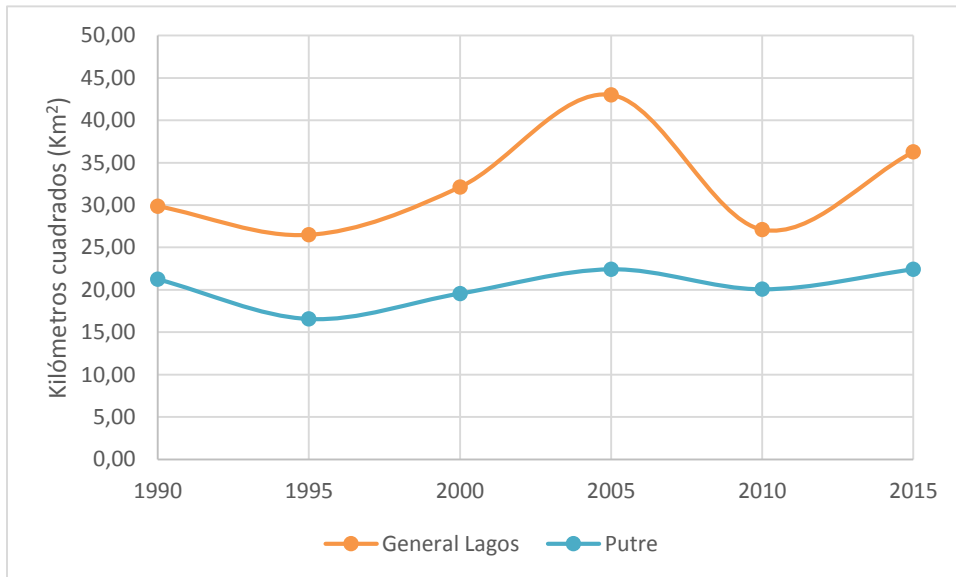
Se debe señalar, que de igual forma que con el análisis del cuerpo lacustre del Chungará, se determinaron problemas espaciales en la imagen Landsat 5 del año 2000, situación que debe ser corregida; por lo pronto en los gráficos se sigue la tendencia 1995 – 2005.

Tabla 28. Resultados obtenidos para el SACVH. Periodo 1990 – 2015.

| Comunas | SACVH | | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 | 2015 |
| General Lagos | 29,86 | 26,48 | 32,13 | 42,99 | 27,10 | 36,27 |
| Putre | 21,24 | 16,54 | 19,56 | 22,43 | 20,06 | 22,43 |

Fuente: CIT-UAI, 2015.

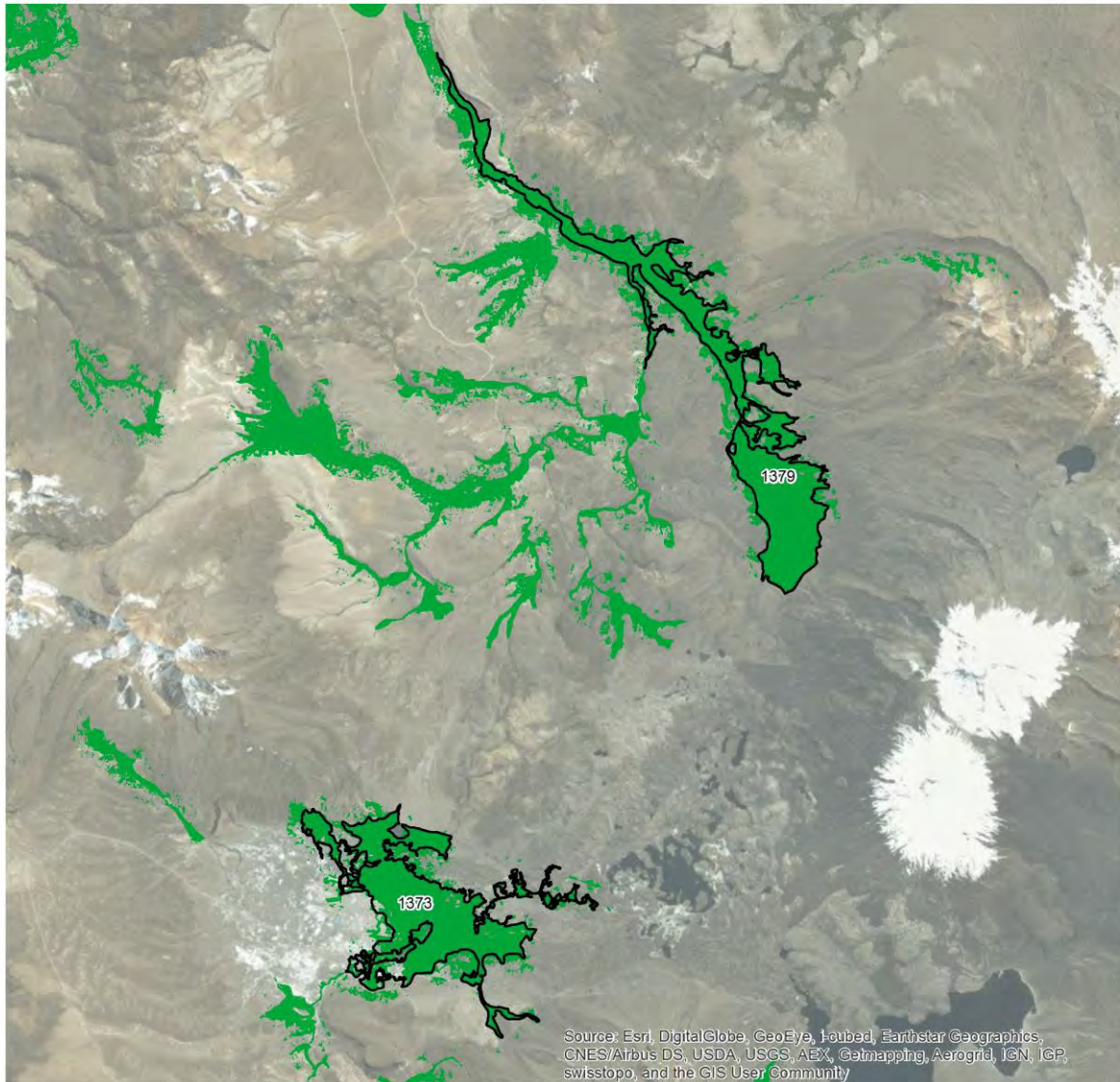
Gráfico 10. Comportamiento temporal y tendencias lineales del SACVH. Periodo 1990 – 2015.



Fuente: CIT-UAI, 2015.

INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE CUBIERTA VEGETACIÓN HUMEDAL



Área de Estudio: Subcuenca Río Lauca | 1990

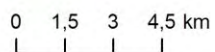


Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Ikonos, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

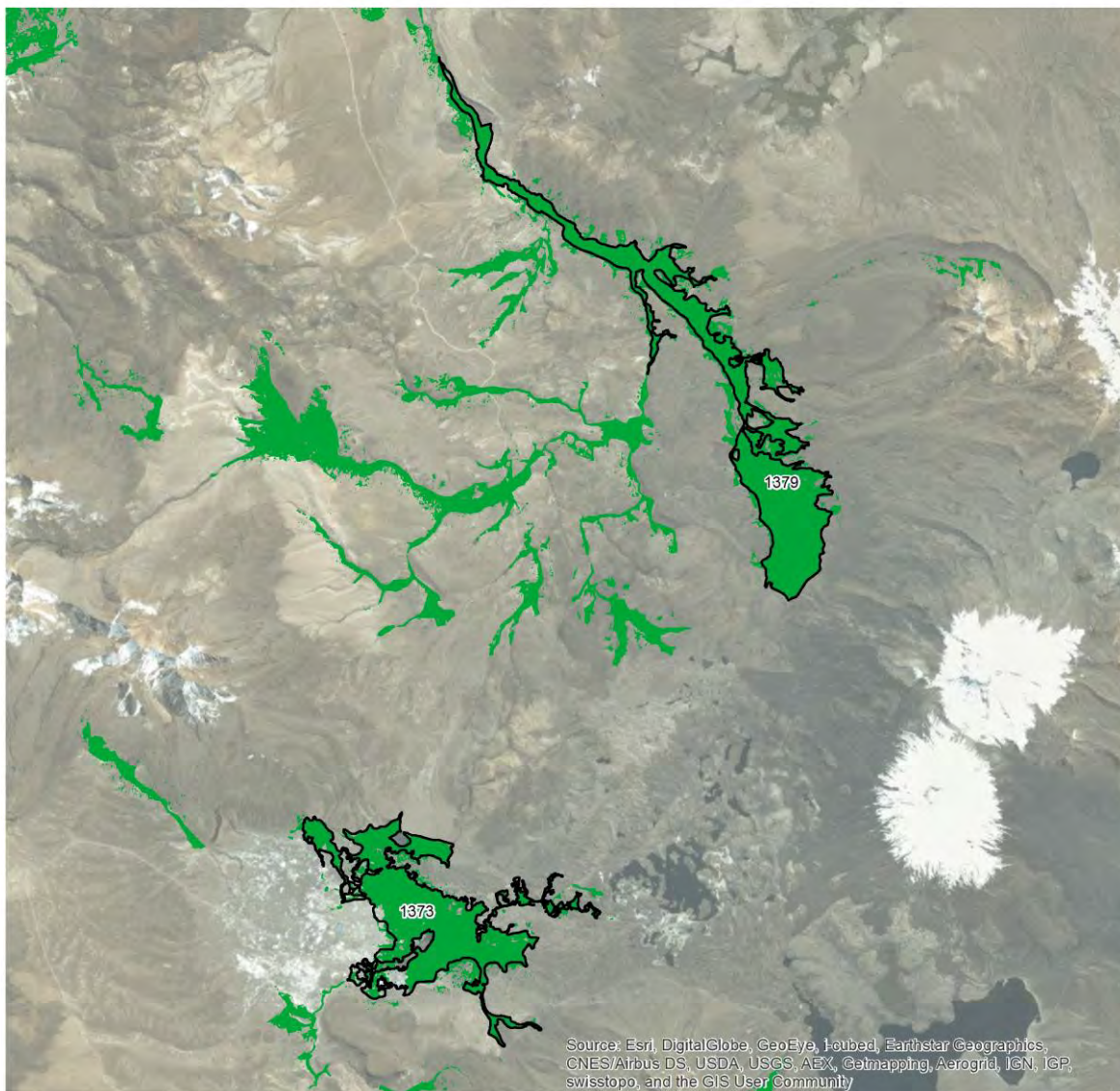
Simbología

-  Humedales Seleccionados
-  Superficie anual cubierta con vegetación en el humedal (SACVH)



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE CUBIERTA VEGETACIÓN HUMEDAL


Área de Estudio: Subcuenca Río Lauca | 1995



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Ikonos, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

Simbología

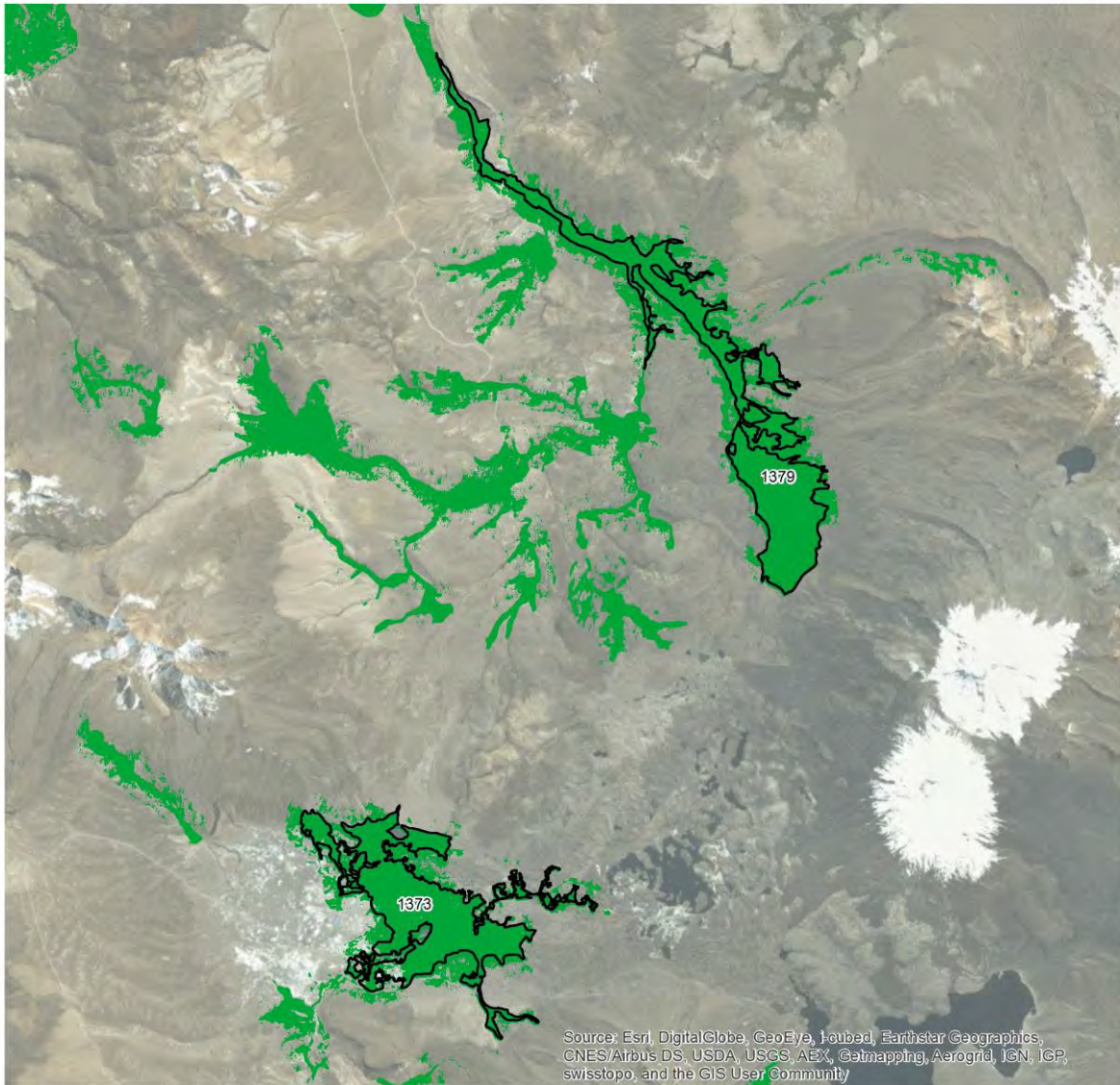
-  Humedales Seleccionados
-  Superficie anual cubierta con vegetación en el humedal (SACVH)

0 1,5 3 4,5 km

CENTRO DE INTELIGENCIA TERRITORIAL
DESIGN.LAB
UAI 

INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE CUBIERTA VEGETACIÓN HUMEDAL



Área de Estudio: Subcuenca Río Lauca | 2005

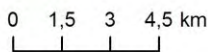


Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Ikonos, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

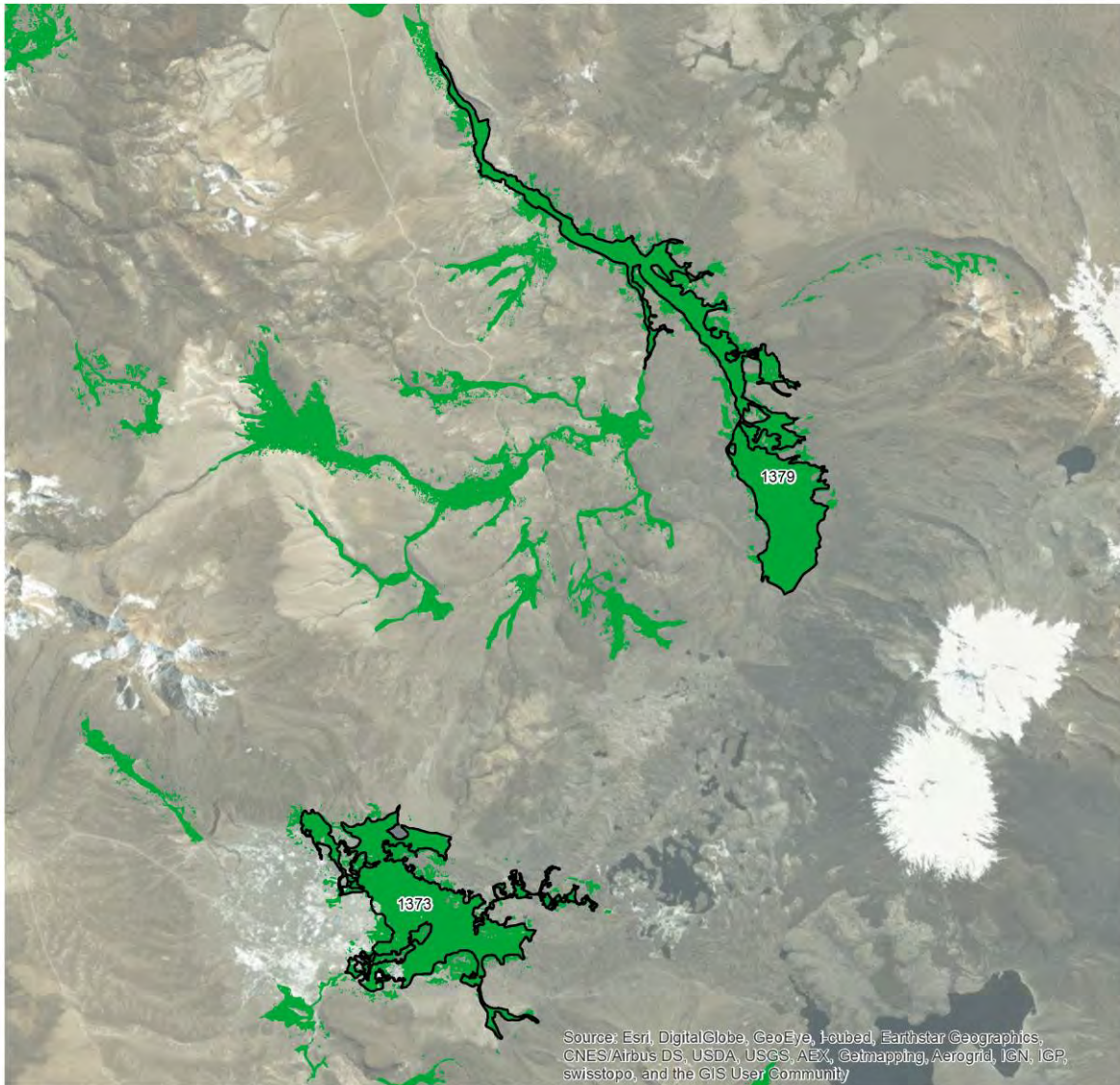
Simbología

-  Humedales Seleccionados
-  Superficie anual cubierta con vegetación en el humedal (SACVH)



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE CUBIERTA VEGETACIÓN HUMEDAL



Área de Estudio: Subcuenca Río Lauca | 2010



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Ikonos, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

Simbología

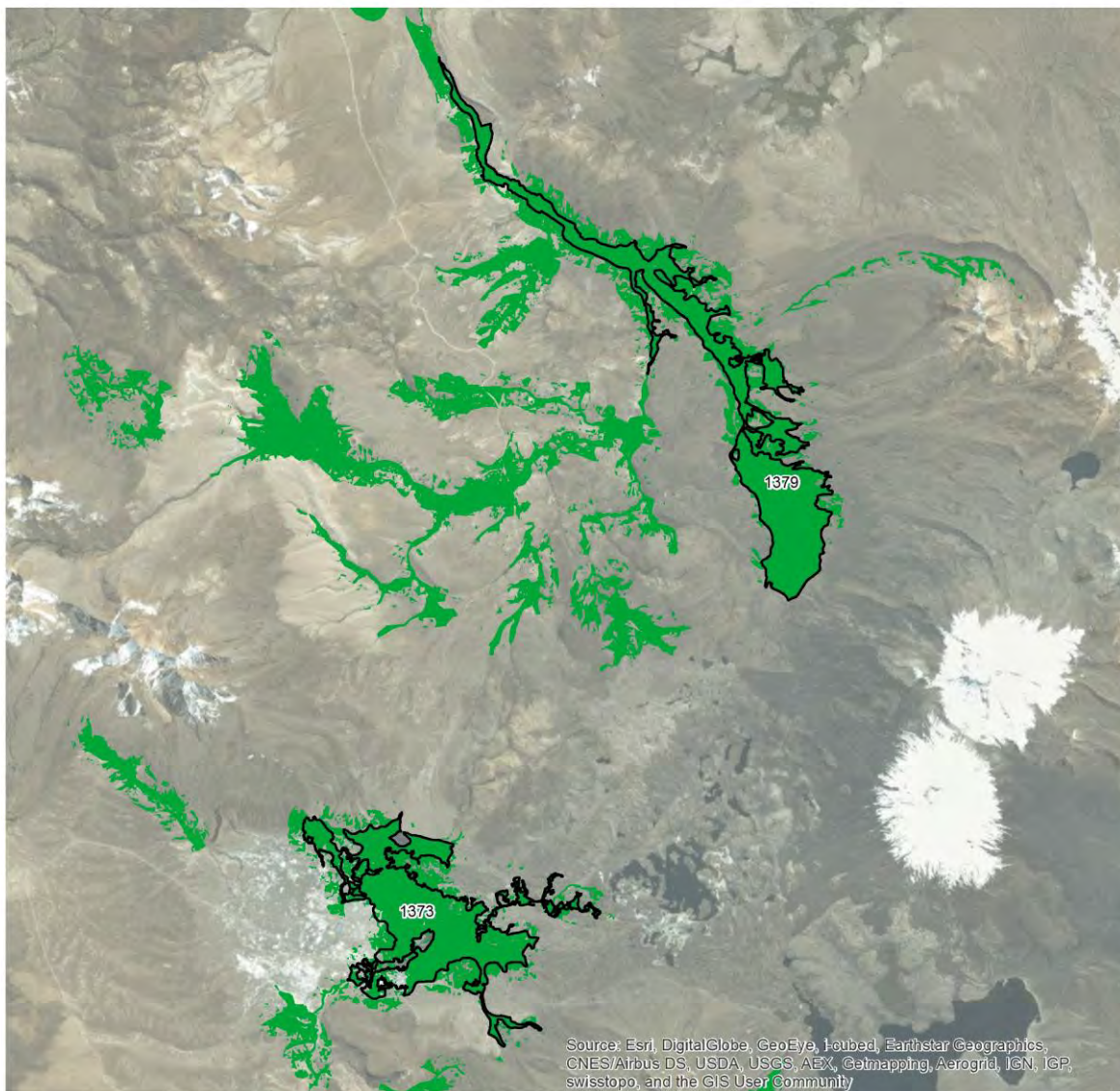
-  Humedales Seleccionados
-  Superficie anual cubierta con vegetación en el humedal (SACVH)

0 1,5 3 4,5 km

CENTRO DE INTELIGENCIA TERRITORIAL
DESIGN.LAB
UAI 

INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE CUBIERTA VEGETACIÓN HUMEDAL



Área de Estudio: Subcuenca Río Lauca | 2015

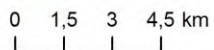


Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Ikonos, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

Simbología

-  Humedales Seleccionados
-  Superficie anual cubierta con vegetación en el humedal (SACVH)



7.2 Superficie anual inundada en el humedal (SAIH)

La superficie anual inundada para los humedales altos andinos, fueron caracterizadas a través del uso de la variable NDWI; con ella se detectaron los pixeles inundados, obteniendo la superficie inundada componente de los mismos cuerpos. Cabe destacar la utilización de imágenes satelitales de los meses de otoño o primavera para la caracterización de los humedales, lo que se explica por el comportamiento más acentuado de crecidas en las otras estaciones del año.

7.2.1 SAIH: resultados y tendencias. Periodo 1990 – 2015

A diferencia de la vegetación, mucha más extendida territorialmente, las zonas inundadas aparecen muy acotadas, por lo general confinadas a los sectores más consolidados de los humedales; la excepción aparece en la zona de Putre en dónde durante los años 2005 y sobre todo en 2015, existe una zona inundada mucha mayor; En General Lagos se da la misma tendencia, pero dada la menor superficie es difícil identificar dicha situación de forma gráfica (se recomienda analizar los datos de la Tabla 29)

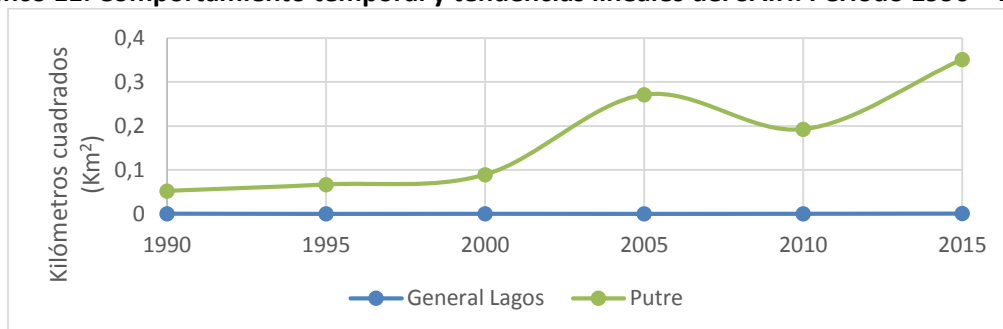
Finalmente se denota una correspondencia entre los comportamientos de la vegetación (para el caso del indicador anterior) y las zonas inundadas – al menos desde la perspectiva cuantitativa -. No obstante, paradójicamente, esta situación, es menos clara al revisar los mapas, dado lo confinado y acotado de las zonas inundadas para los dos humedales analizados.

Tabla 29. Resultados obtenidos para el SAIH. Periodo 1990 – 2015.

| Comunas | SAIH | | | | | |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 | 2015 |
| General Lagos | 0,0006 | 0,0000 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0003 | 0,0008 |
| Putre | 0,0523 | 0,0669 | 0,0894 | 0,2712 | 0,1927 | 0,3515 |

Fuente: CIT-UAI, 2015.

Gráfico 11. Comportamiento temporal y tendencias lineales del SAIH. Periodo 1990 – 2015.



Fuente: CIT-UAI, 2015

INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE ANUAL INUNDADA HUMEDAL



Área de Estudio: Subcuenca Río Lauca | 1990




Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Heubel, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

Simbología

-  Humedales Seleccionados
-  Superficie anual inundada en el humedal (SAIH)

0 1,5 3 4,5 km





INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE ANUAL INUNDADA HUMEDAL

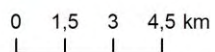
Área de Estudio: Subcuenca Río Lauca | 1995



Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

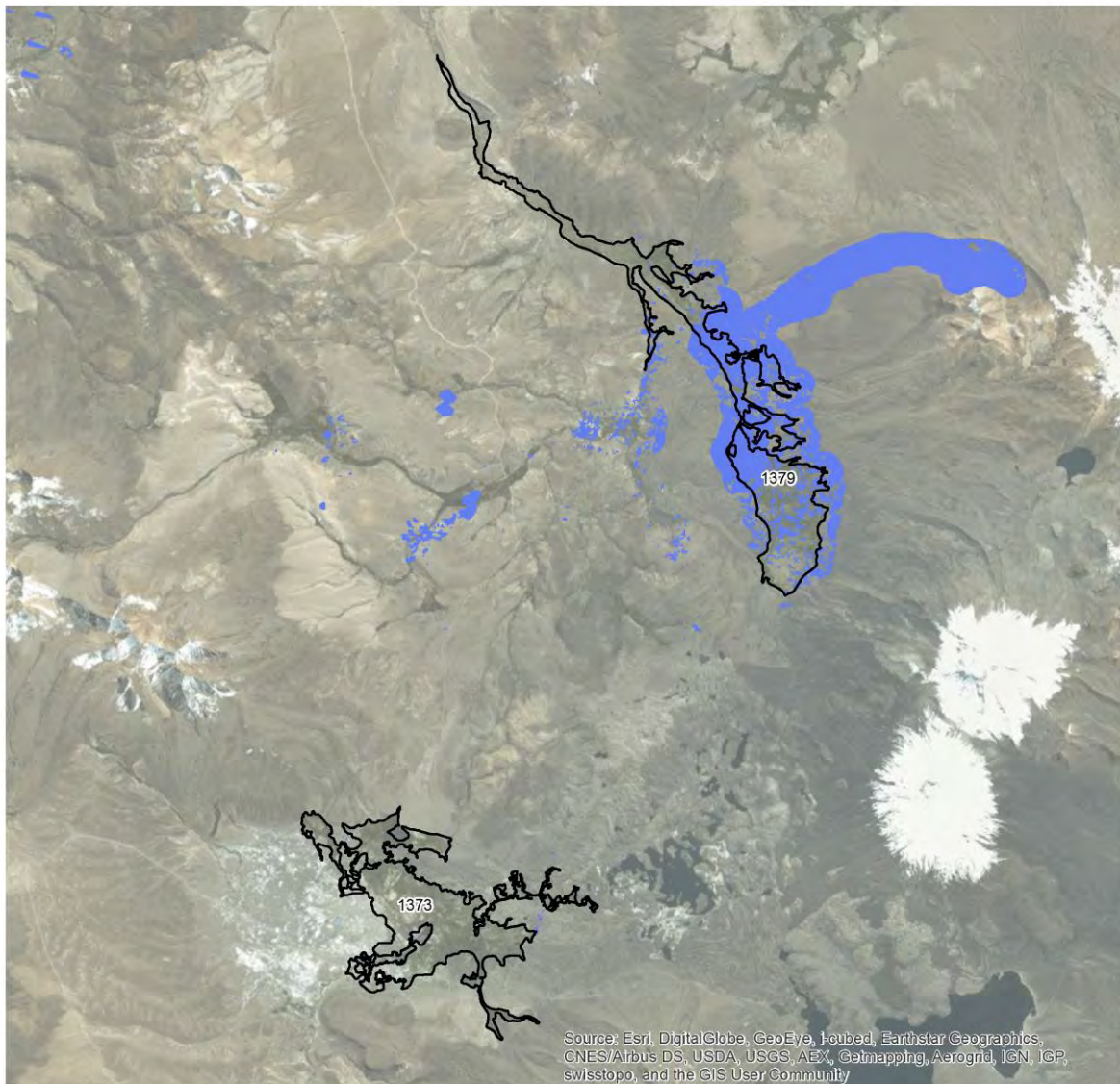
Simbología

-  Humedales Seleccionados
-  Superficie anual inundada en el humedal (SAIH)



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE ANUAL INUNDADA HUMEDAL



Área de Estudio: Subcuenca Río Lauca | 2000

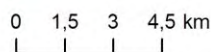


Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Heubel, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

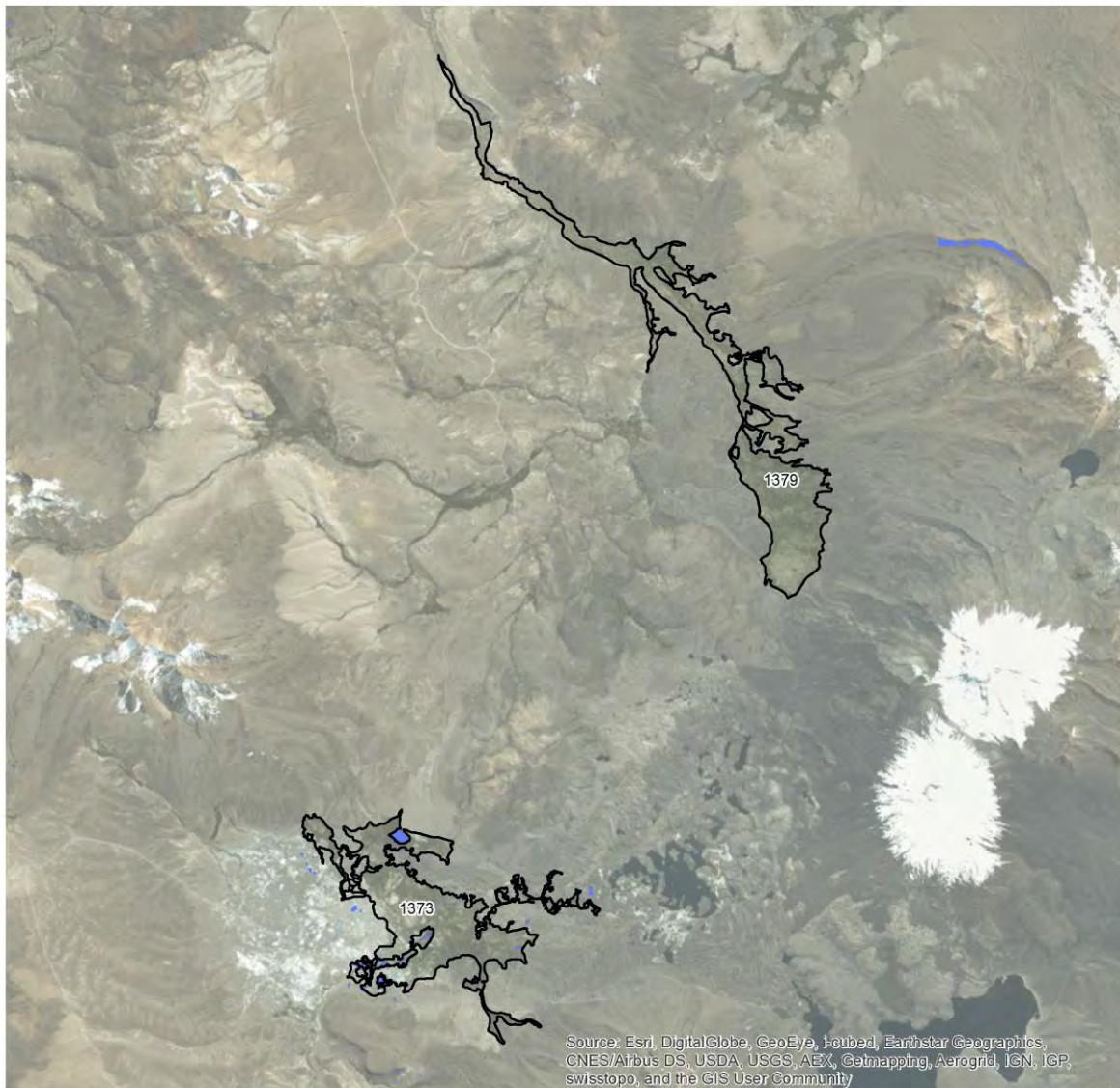
Simbología

-  Humedales Seleccionados
-  Superficie anual inundada en el humedal (SAIH)



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE ANUAL INUNDADA HUMEDAL



Área de Estudio: Subcuenca Río Lauca | 2005




Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Ikonos, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

Simbología

-  Humedales Seleccionados
-  Superficie anual inundada en el humedal (SAIH)

0 1,5 3 4,5 km



INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE ANUAL INUNDADA HUMEDAL



Área de Estudio: Subcuenca Río Lauca | 2010




Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Heubel, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

Simbología

-  Humedales Seleccionados
-  Superficie anual inundada en el humedal (SAIH)

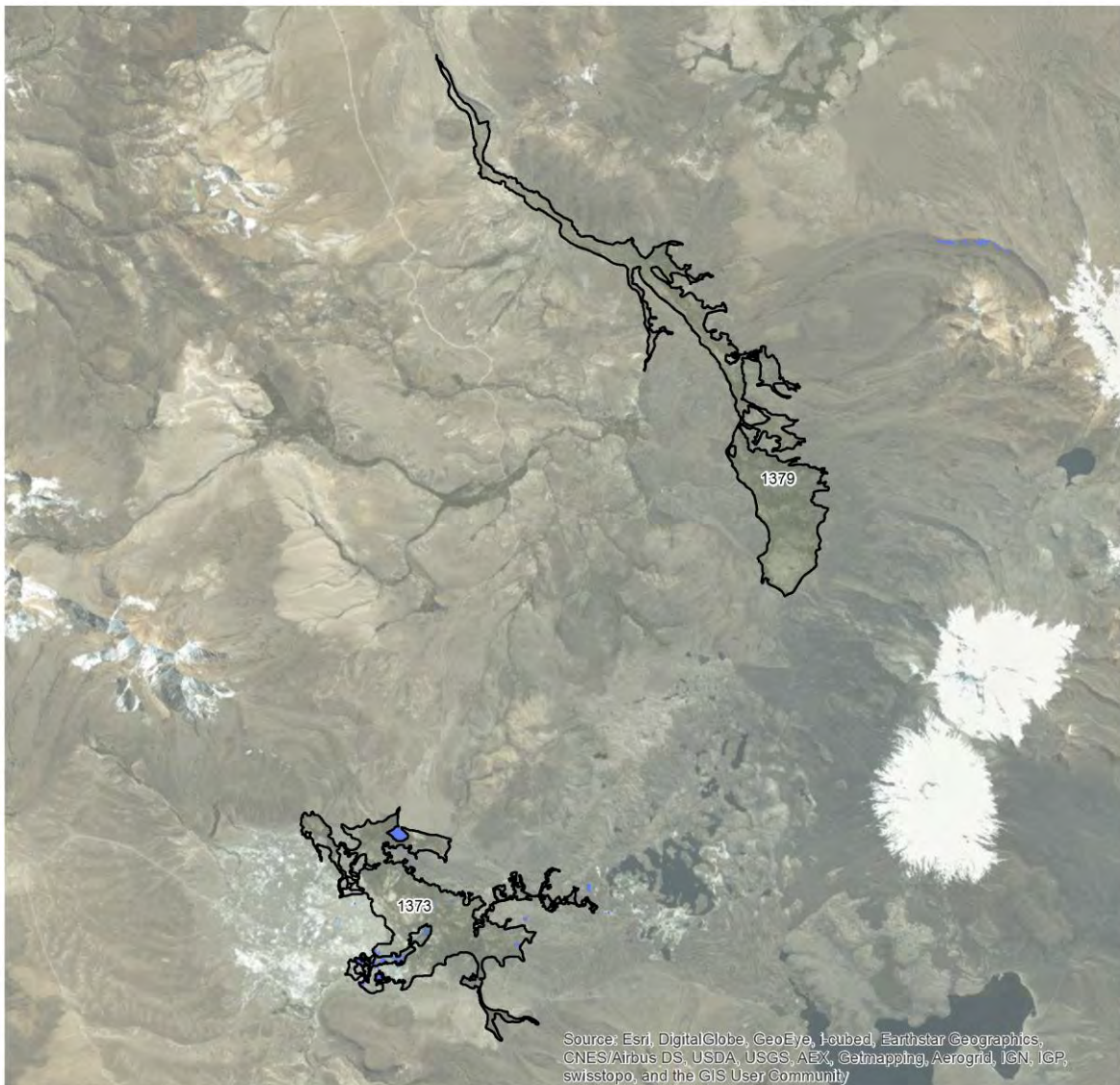
0 1,5 3 4,5 km



CENTRO DE
INTELIGENCIA TERRITORIAL
DESIGN.LAB
UAI 

INDICADORES AMBIENTALES - SUPERFICIE ANUAL INUNDADA HUMEDAL



Área de Estudio: Subcuenca Río Lauca | 2015




Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Heubel, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA y Landsat

Simbología

-  Humedales Seleccionados
-  Superficie anual inundada en el humedal (SAIH)

0 1,5 3 4,5 km

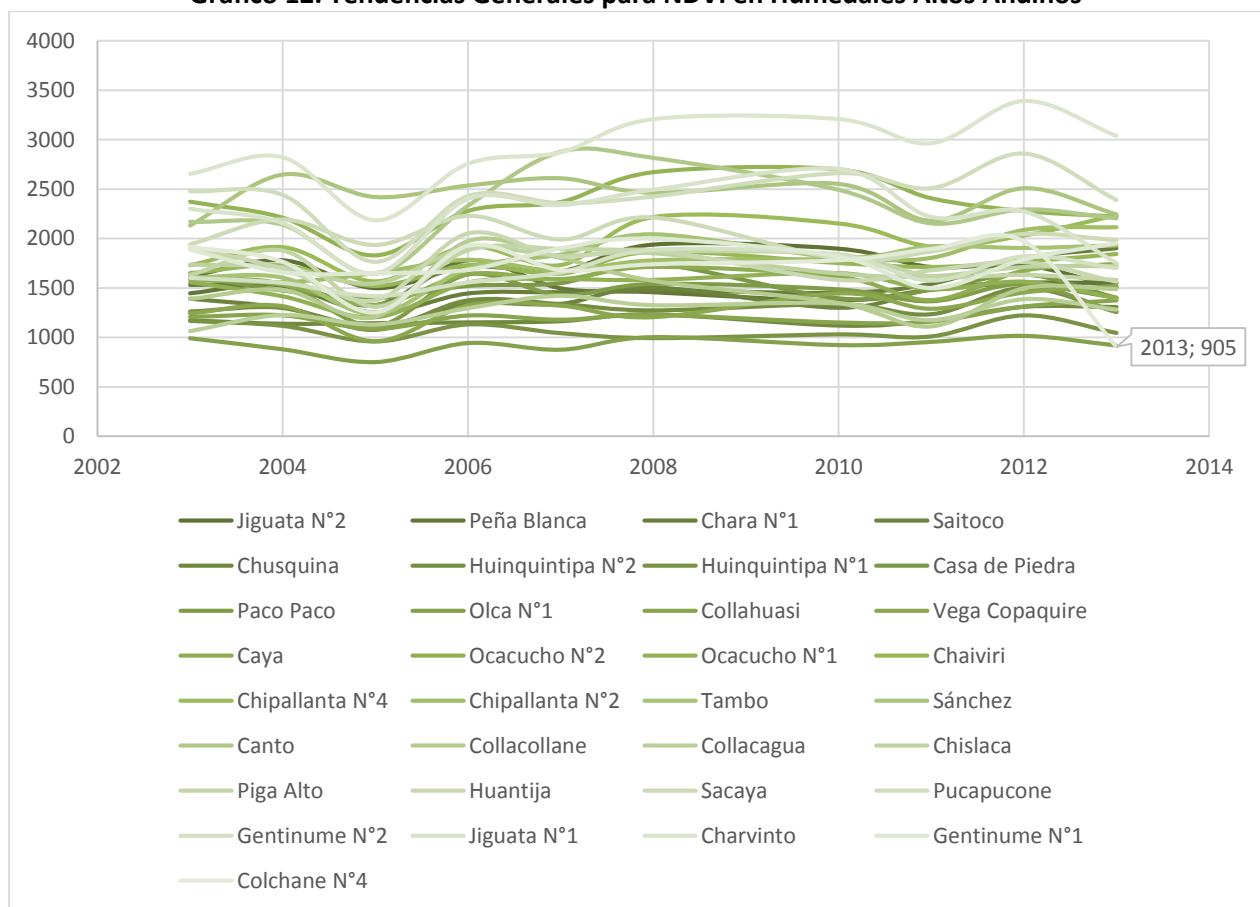


7.3 Tendencias Anuales de NDVI para Humedales altos andinos (MODIS)

Adicionalmente al cálculo de indicadores presentado anteriormente, se realizó un análisis de las tendencias de los humedales altos andinos, a través de la extracción del componente NDVI del sensor Modis. La utilización de este sensor no permite realizar el cálculo específico de los indicadores antes presentados debido a la escala del mismo, no obstante entrega un primer acercamiento a la situación de los humedales en términos más generales.

Para efectos de presentación de los resultados se hace un barrido a la totalidad de los humedales, como una forma de ver anomalías en las curvas de distribución de valores de NDVI (sin corrección)

Gráfico 12. Tendencias Generales para NDVI en Humedales Altos Andinos



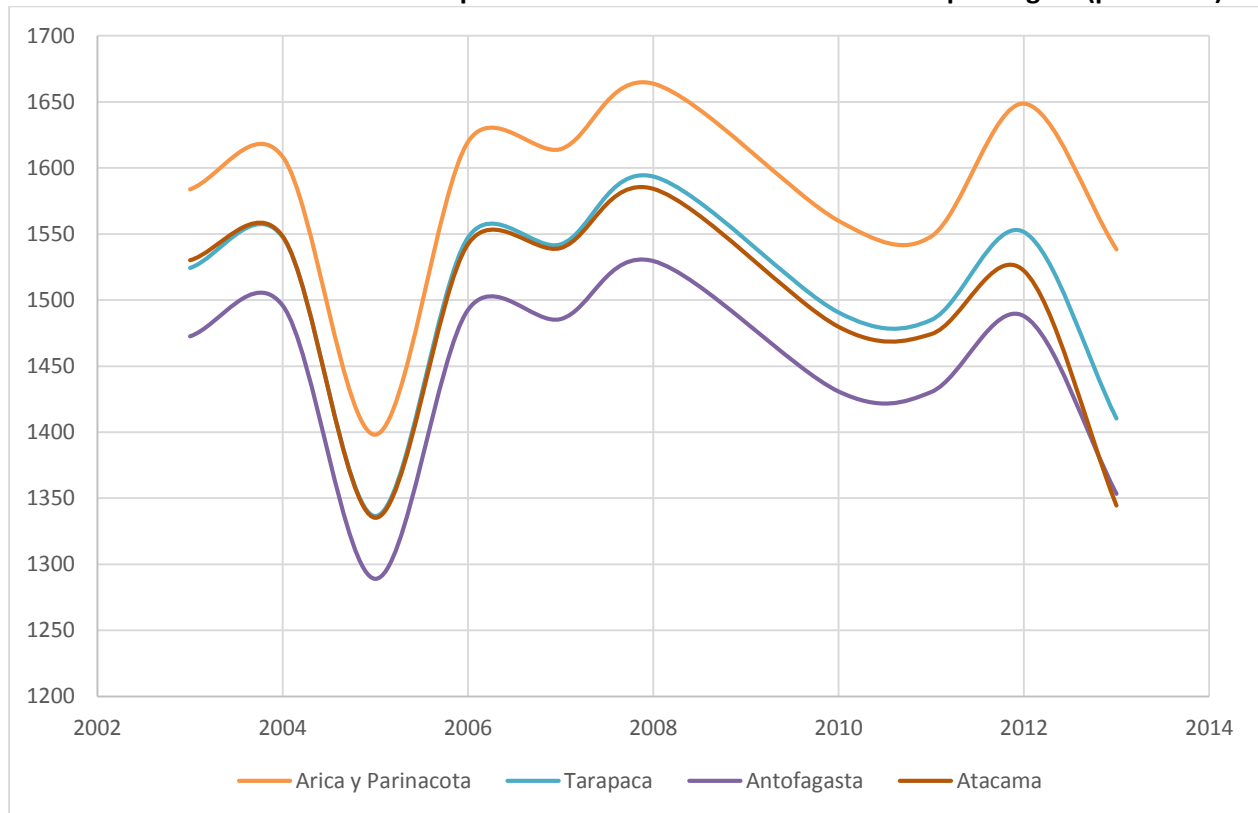
Fuente: CIT-UAI, 2015.

Como se observa en el gráfico las tendencias de los humedales son bastante coherentes entre sí, lo que se explica principalmente por la heterogeneidad del sistema natural en dónde se encuentran emplazados (a pesar de la variabilidad latitudinal). Al respecto destacan algunos casos especiales, como la caída del Valor del NDVI para el Humedal Colchane N°4 (2013; 905); el comportamiento del humedal Sánchez, también se presenta irregular en su tendencia.

Para mayor detalle en el análisis se recomienda analizar la tabla de resultados de forma individualizada para cada caso.

Si se generaliza la información a nivel regional se obtiene un comportamiento sumamente regular, lo que confirma la observación antes planteada, destacando el mayor índice de la Región de Arica y Parinacota, y con tendencias levemente más marcada; un segundo fenómeno destacable es la importante caída de los humedales de Atacama entre los años 2012 y 2013, los que generalmente tenían un promedio de NDVI más parecido a Tarapacá, pero que terminan para este último año bajo el indicador de Antofagasta (el más bajo en las tendencias generales)

Gráfico 13. Tendencias Generales para NDVI en Humedales Altos Andinos por Región (promedio)



Fuente: CIT-UAI, 2015

VI. GLOSARIO DE TÉRMINOS

ASTER: sensor que surge de la colaboración entre la NASA y el Ministerio Japonés de Economía Comercial e Industria (METI). Fue lanzado en Diciembre de 1999 con una órbita síncrona solar de 705 km de altitud. La periodicidad de repetición de su órbita es de 16 días. Toma datos en 14 bandas, del visible a la longitud de onda del infrarrojo, y proporciona visión estereoscópica para la creación de modelos digitales del terreno. Cada imagen cubre una zona de 61.5 km x 63 km (sensor VNIR) (*ASTER, 2014*).

Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR): cámara de detección de la radiación que se utiliza para determinar de forma remota la cobertura nubosa y la temperatura superficial. La superficie puede ser la superficie de la tierra, la superficie superior de las nubes, o la superficie de los cuerpos de agua. Este radiómetro de exploración utiliza 6 detectores que recogen diferentes bandas de longitudes de onda de radiación (*NOAA, 2011*).

Banda espectral: selección de longitudes de onda con comportamientos electromagnéticos similares (*Grau et al, 2005*).

Calibración de radiancia y reflectividad: calibración empírica de los sensores satelitales mediante la medición de la radiancia (*NASA Landsat Glossary, 2015*).

Calibración: ajuste o normalización sistemática de la salida de un instrumento de medición cuantitativa o sensor (*NASA Landsat Glossary, 2015*).

Clasificación no supervisada: clasificación que busca clases espectrales (o clústeres) en una imagen multibanda sin la intervención del analista (*NASA Landsat Glossary, 2015*).

Clasificación supervisada: clasificación que utiliza firmas espectrales obtenidas de las muestras de capacitación para clasificar una imagen (*NASA Landsat Glossary, 2015*).

Clorofila a:

Corrección atmosférica: corrección relacionada a las interferencias atmosféricas (vapor de agua) (*Fuente: CIT-UAI, 2015*).

Corrección geométrica: corrección relacionada a las alteraciones en los movimientos de los satélites generan distorsiones en las imágenes (*Fuente: CIT-UAI, 2015*).

Corrección radiométrica: corrección relacionada a los fallos en los sensores (*Fuente: CIT-UAI, 2015*).

Corrección topográfica: corrección relacionada al efecto topográfico que provoca una variación de la respuesta radiométrica de la superficie inclinada frente a la de una horizontal (efecto sombra) (*Fuente: CIT-UAI, 2015*).

Datos de calibración: mediciones pertenecientes a las características espectrales o geométricas de un sensor o fuente de radiación. Los datos de calibración son obtenidos a través del uso de una fuente de energía fija tales como una lámpara de calibración, una placa de temperatura, o patrón de prueba geométrica. La aplicación de datos de calibración para restaurar mediciones a sus valores reales se denomina rectificación (*NASA Landsat Glossary, 2015*).

Escena: cada imagen Landsat se denomina escena. Cada escena Landsat es dimensionalmente 185 x 170 km. La tierra es dividida en 57.784 escenas, y cada escena de Landsat 7 tiene cerca de 3 billones de bytes de información (*NASA Landsat Glossary, 2015*).

Espectro electromagnético: (1) Sistema que clasifica, según la longitud de onda, toda la energía que se mueve, harmónicamente, a la velocidad constante de la luz. (2) Un continuo que es convencionalmente fraccionado en segmentos arbitrarios. Es el rango completo de la radiación electromagnética. El espectro es usualmente dividido en siete secciones. Desde la longitud de onda mayor a la menor: radio, microonda, infrarojo, visible, ultravioleta, rayos x, y rayos gama (*Grau et al, 2005*).

Estadística: es la medida, valor o resultado específico que toman las variables en un momento del tiempo y del espacio; y que ha sido sujeta a validación, estructuración y descripción estadística. Dado que los procesos estadísticos se orientan a generar conjuntos de estadísticas sobre determinadas variables en forma sistemática, en general más que hablar de una estadística se habla de series estadísticas o de series estadísticas básicas (para diferenciarlas de los indicadores). Las estadísticas básicas se elaboran a partir de los datos, mediante un conjunto predefinido y normado de procedimientos estadísticos que se derivan de normativas estadísticas nacionales y recomendaciones estadísticas internacionales (*CEPAL, 2009*).

Firma espectral: es la forma peculiar de reflejar o emitir energía de un determinado objeto o cubierta. Depende de las características físicas o químicas del objeto que interacciona con la energía electromagnética, y varía según las longitudes de onda (*Grau et al, 2005*).

Geographic Tagged Image File Format (GEOTIFF): Formato de archivo informático para imágenes georreferenciadas. (*Fuente: CIT-UAI, 2015*).

GRID, de ESRI: formato de almacenamiento de datos raster nativo de ESRI. Hay dos tipos de grids: entero y punto flotante. Se utiliza enteros para representar tablas de datos y de punto flotante discretos para representar los datos continuos (*ESRI, s.f*).

Hierarchical Data Format (HDF): formato de datos estándar de todos los productos de información de los sistemas de observación terrestre de la NASA (EOS). HDF es un formato de archivo múltiple desarrollado por el grupo HDF-EOS (*NASA, 2012*).

Indicadores ambientales: se ocupan de describir y mostrar los estados y las principales dinámicas ambientales, por ejemplo: la biota y biodiversidad, la cantidad y calidad de agua, la calidad del aire respirable, la carga contaminante y renovabilidad de la oferta energética, la disponibilidad y extracción de algunos recursos naturales (bosques, pesca, agricultura), la contaminación urbana, la producción de desechos sólidos, el uso de agrotóxicos, la frecuencia e intensidad de los desastres naturales, etc. (*CEPAL, 2009*).

Indicadores: los indicadores son estadísticas seleccionadas por su capacidad de mostrar un fenómeno importante. Los indicadores, a menudo resultan de procesar series estadísticas en formas de agregación, proporción, tasas de crecimiento (entre otras), para poder mostrar el estado, la evolución y las tendencias de un fenómeno que interesa monitorear. Los indicadores se diseñan y producen con el propósito de seguir y monitorear algunos fenómenos o conjuntos de dinámicas que requieren algún tipo de intervención o programa. Por lo tanto, los indicadores se intencionan desde su origen, y requieren de un cuidadoso proceso de producción en el que se calibran varios criterios como la disponibilidad y calidad de

información, la relevancia del indicador, el aporte del indicador al Sistema de Indicadores, entre otros (CEPAL, 2009).

Índices: expresión numérica de la relación entre dos o más variables que han sido conmensuradas y agregadas hasta convertirlas en un solo meganumerario. Por ejemplo: Índice de precios al consumidor, Índice de Sostenibilidad Ambiental, Índice de Desarrollo Humano (CEPAL, 2009).

Índice de Agua del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, España (CEDEX): utilizado por el CEDEX para cartografiar aguas continentales. Este índice se calcula a partir de las bandas roja (B3, 630-690 nm), infrarrojo cercano (B4, 760-900 nm) e infrarrojo medio (B5, 1550-1750 nm) (Bustamante et al, 2005).

Infrarrojo cercano (NIR): término referido a la longitud de onda corta en la región del infrarrojo. La longitud de onda larga termina en el infrarrojo medio, a veces llamado infrarrojo solar, solamente disponible durante las horas del día (Grau et al, 2005).

Intervalo espectral: el ancho, expresado ya sea en longitud de onda o frecuencia, de una porción particular del espectro electromagnético. Un sensor determinado, puede estar diseñado para medir o ser sensible a la energía de un intervalo espectral particular. También denominada banda espectral (NASA Landsat Glossary, 2015).

Long-Wave Infrared (LWIR): Bandas infrarrojas de longitud de onda larga (Grau et al, 2005).

Metadatos: descripción de la información estadística, incluyendo su definición, fuentes, métodos de cálculo, periodicidad. Los metadatos se presentan en hojas metodológicas o fichas técnicas (CEPAL, 2009).

Modelo Digital de Elevación (MDE): representación digital de la topografía de la Tierra. Los MDE permiten que la altura sea adicionada a una imagen, ofrece imágenes con efecto tridimensional (Grau et al, 2005).

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): instrumento de Teledetección a bordo de los satélites Terra y Aqua. Dispone de 36 bandas espectrales y recoge imágenes de toda la Tierra cada 1-2 días (Grau et al, 2005).

Medium-Wave Infrared (MWIR): Bandas infrarrojas de longitud de onda media (Grau et al, 2005).

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA): Agencia Meteorológica de los Estados Unidos. Da también nombre a una serie de satélites meteorológicos de órbita polar (Grau et al, 2005).

Normalized Burn Ratio (NBR): índice que ha sido aceptado como el índice espectral estándar para evaluar la veracidad de los incendios. El NBR señala el contenido de humedad de la vegetación mediante la combinación del infrarrojo cercano y el infrarrojo de onda corta (Harris et al, 2011).

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): Índice de vegetación de diferencia normalizada. Es un índice usado para medir la diferencia normalizada entre las reflectancias del rojo y del infrarrojo cercano, proporcionando una medida sobre la cantidad, calidad y desarrollo de la cobertura vegetal y vigorosidad en áreas extensas (Fuente: CIT-UAI, 2015).

Normalized Difference Water Index (NDWI): índice de diferencia normalizada de agua. Método desarrollado para delinear las características de los cuerpos de agua y mejorar su identificación en las imágenes satelitales. El NDWI hace uso de la radiación reflectada en el infrarrojo cercano y en la luz verde visible para mejorar la presencia de tales características mediante la eliminación de suelo y vegetación. El

NDWI también puede proporcionar estimaciones de turbidez de las masas de agua a partir de los datos detectados (*McFeeters, 1996*).

Normalized-Difference Snow Index (NDSI): Diferencia normalizada de dos bandas (una en el visible y otra en la onda del infrarrojo cercano o infrarrojo de onda corta) utilizado para mostrar la nieve. La nieve es altamente reflectante en la parte visible del espectro EM y altamente absorbente en la parte infrarroja del espectro, infrarrojos cercanos o de onda corta, mientras que la reflectancia de la mayoría de las nubes sigue siendo alta en esas mismas partes del espectro, lo que permite una buena separación de la mayoría de las nubes y la nieve (*Hall et al, 2014*).

Operational Land Imager (OLI): las bandas espectrales de este sensor, incluye mejoras a los anteriores instrumentos Landsat, con la adición de dos nuevas bandas espectrales, de resolución de 15 metros en pancromático y 30 metros en multiespectral: un canal visible de azul profundo (banda 1) diseñado específicamente para los recursos hídricos e investigaciones de zonas costeras, y un nuevo canal infrarrojo (banda 9) para la detección de nubes cirrus. También se incluye una nueva banda de garantía de calidad junto con cada producto de datos. Esta provee información sobre la presencia de elementos como nubes, agua, y nieve (*USGS, s.f*).

Path: la línea central longitudinal de una escena Landsat, correspondiente al centro de la trayectoria orbital. Números secuenciales de este a oeste son asignados a 233 trayectorias satelitales nominales de Landsat 4, 5 y 7. Los números de las trayectorias pueden ser usados con los números de las filas para designar puntos centrales nominales de la escena (*NASA Landsat Glossary, 2015*).

Principios de normalidad: distribución normal o gaussiana (*Fuente: CIT-UAI, 2015*).

Programa Copernicus: Anteriormente conocido como GMES (Global Monitoring for Environment and Security), es el programa europeo para el establecimiento de las capacidades de observación terrestre. El objetivo es usar información de múltiples fuentes para obtener información oportuna y de calidad, servicios y conocimiento, y para proveer acceso autónomo e independiente a información en relación al medio ambiente y seguridad a nivel global (*ESA, 2015*).

Quickbird: satélite que circunda la tierra en órbita polar a 450 kilómetros de altura. Es un satélite único en su tipo permitiendo obtener imágenes con una resolución (comparable a una fotografía aérea 1:4.000) de 70 cm, pancromático (blanco/negro)-la más alta del mundo- y 2.8 m multiespectral (color), colocando a disposición de la comunidad mundial abundante información acerca de las siempre cambiantes características naturales de la Tierra; siendo una gran contribución para la consolidación final de la industria (de satélites operacionales) de alta resolución (*Grau et al, 2005*).

Radar: Sensor electromagnético que se caracteriza por la detección y la localización por radio (radio detection and ranging). Los principales componentes en la estructura del radar son: el transmisor, la antena (normalmente usada para la transmisión y recepción), el receptor y el equipo de manejo de datos. Un sistema de radar de abertura sintética incluye un procesador de imagen, a pesar de que éste puede tener una ubicación lejana de la electrónica del radar, tanto en tiempo como en espacio (*Grau et al, 2005*).

Radiación atmosférica: Las radiaciones atmosféricas, que están en casi su totalidad dentro del intervalo de longitud de onda de 3 a 80 micrones, proveen uno de los mecanismos más importantes por el cual se mantiene el balance de calor del sistema tierra-atmósfera. La radiación infrarroja emitida por la superficie de la tierra (radiación terrestre) es parcialmente absorbida por el vapor de agua de la atmósfera, que a su

vez la reemite, parte hacia el espacio, parte hacia de nuevo hacia la Tierra. Esta radiación emitida secundariamente, es de forma general, repetidas veces absorbida y reemitida. El flujo descendente, o contra-radiación es de importancia básica en el efecto invernadero; el flujo ascendente es esencial para el balance de radiación del planeta (Grau et al, 2005).

Radiancia: Medida de la energía radiada por un objeto. En general, radiancia es una función del ángulo de observación y de la longitud de onda espectral, y es expresada como energía por ángulo sólido (NASA Landsat Glossary, 2015).

Reflectancia o reflectividad: varía según la longitud de onda que incide sobre ellos, normalmente la reflectividad aumenta a medida que la longitud de onda disminuye, no obstante existen cuerpos donde esta relación es inversa (nieve) o irregular (vegetación). También la reflectividad está influenciada por la textura del cuerpo, para una misma longitud de onda, la reflectividad más baja se encuentra en el agua, aumenta para el suelo, vegetación enferma, vegetación sana y es máxima para la nieve (Grau et al, 2005).

Resolución: La resolución de un sensor es su habilidad para registrar información en detalle de las distintas cubiertas. La resolución depende de la capacidad de los sensores para distinguir variaciones de la energía electromagnética, del detalle espacial que captura y del número y ancho de las bandas que alberga (Grau et al, 2005).

Resolución espacial: la capacidad de un sistema de imágenes de distinguir objetos estrechamente espaciados en el área. Puede ser expresado como la distancia, en línea pares por unidad de distancia, de las líneas más estrechamente espaciadas que se pueden distinguir. En otras palabras corresponde al tamaño del pixel o celda del raster que contiene a la banda espectral (Landsat: 30m x 30m). (Fuente: CIT-UAI, 2015).

Resolución espectral: Número y rango de las regiones del espectro electromagnético para los que capta información el sensor (Fuente: CIT-UAI, 2015).

Resolución radiométrica: Indica el número de intervalos de intensidad que puede captar el sensor (escala de grises) (Landsat 5 y 7: 256) (Fuente: CIT-UAI, 2015).

Resolución temporal: Tiempo entre imágenes sucesivas (Landsat 16 días) (Fuente: CIT-UAI, 2015).

Respuesta Espectral: Cada tipo de material radia una combinación de frecuencias característica (respuesta espectral) como consecuencia de su composición, estructura y actividad (Grau et al, 2005).

Row: Línea central latitudinal (nominal) de una escena Landsat. Row 60 corresponde a Lat. 0° (Ecuador), row 1 es lat. 80°47'N, y row 122 es lat. 81°51'S. Existen 248 rows, en conjunto, para Landsat 4, 5, y 7, las mismas que para las primeras Landsats 1, 2 y 3 (NASA Landsat Glossary, 2015).

Satélite Aqua: misión satelital de la NASA denominado Aqua por la gran cantidad de información que la misión recopila acerca del ciclo hidrológico, incluyendo la evaporación del océano, vapor de agua en la atmósfera, nubes, precipitación, humedad del suelo, hielo marino, hielo terrestre, y cobertura de nieve y hielo sobre la superficie. Otras variables medidas por Aqua son flujos de energía de radiación, aerosoles, cobertura vegetal, fitoplancton y materia orgánica disuelta en los océanos, y temperatura del aire, tierra y agua (NASA Aqua, 2015).

Satélite Terra (EOS AM-1): es la primera plataforma EOS (Earth Observing System) y provee información global sobre el estado de la atmósfera, tierra, y océanos, así como de sus interacciones con la radiación

solar y viceversa. Este sensor lleva a bordo cinco instrumentos: ASTER, CERES, MODIS, MISR, MOPITT (*NASA Terra, 2015*).

Sensor: Cualquier dispositivo que recoge energía y la presenta en forma adecuada para obtener información acerca del medio ambiente. Sensores pasivos, como los de ETM+, TM y MSS, utilizan la radiación electromagnética producida por la superficie u objetos. Sensores activos como radar, suministra su propia fuente de energía (*NASA Landsat Glossary, 2015*).

Serie multitemporal: La comparación de imágenes satélite obtenidas a determinados intervalos de tiempo, permite estudiar fenómenos que implican una variación temporal (*Grau et al, 2005*).

Short Wave Infrared (SWIR): Bandas infrarrojas de longitud de onda corta (*Grau et al, 2005*).

Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI): índice desarrollado para minimizar la influencia del suelo sobre el espectro del dosel de los árboles, mediante la incorporación el factor de ajuste de suelo L en el denominador de la ecuación de NDVI (*Qi et al, 1994*).

Temperatura de brillo (TB): en el sensor corresponde a la temperatura observada de la superficie terrestre, sin considerar alguna corrección atmosférica. En términos locales, es un buen producto para realizar un sondeo para la espacialización de la temperatura de emisión superficial. La TB es estimada a partir de la radiancia espectral, corregida topográficamente, de las bandas térmicas de los diversos sensores (*Fuente: CIT-UAI, 2015*).

Thematic Mapper (TM): Sensor que equipaba los satélites Landsat del 1 al 5 (*NASA Landsat Glossary, 2015*).

Thermal Infrared Sensor (TIRS): sensor que mide la temperatura de la tierra en dos bandas termales, con una nueva tecnología que aplica física cuántica para detectar calor. En las bandas termales de TIRS, los píxeles oscuros representan temperaturas frías; píxeles claros representan temperaturas altas. Las bandas termales proveen información importante sobre irrigación de agua en zonas áridas, así como unidades de calor en áreas urbanas (*NASA TIRS, 2015*).

Variables: Fenómeno que se estudia, cuyo valor en el tiempo y/o en el espacio, varía. Variables ambientales usuales son: la calidad del aire en una ciudad, la cantidad de lluvia anual en una provincia, la carga de contaminante X que lleva un curso de agua superficial (río, por ejemplo), o la calidad de los suelos en un territorio determinado. Al ser variables, su valor varía en el tiempo y entre los diversos territorios, permitiéndonos acceder a información respecto de su estado, evolución y tendencia (*CEPAL, 2009*).

Vigor vegetacional: estado de salud de la vegetación, de acuerdo a su porcentaje de absorción de radiancia en el RED y NIR. En otras palabras, mayor respuesta espectral de la clorofila (*Van der Grier & Owe, 1995*).

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). 2014. En Red. <http://asterweb.jpl.nasa.gov/>. Fecha última visita: 26-06-2015.
- Alonso, C; Moreno, V. 1996. Análisis multitemporal de imágenes LANDSAT TM en la cartografía de las masas de hielo y nieve aplicadas a la modelización hidrológica. *Revista de Teledetección*, 1996.
- Benger, S.N. 1997. Remote sensing of the effects of irrigation activities on vegetation health in ephemeral wetlands of semi arid Australia. *Geoscience and Remote Sensing*, 1997. IGARSS '97. Remote Sensing - A Scientific Vision for Sustainable Development, 1997 IEEE International (Volume: 1).
- Bustamante, J; Díaz-Delgado, R; Aragonés, D. 2005. Determinación de las características de masas de aguas someras en las marismas de Doñana mediante Teledetección. *Revista de Teledetección*. 2005. 24: 107-111.
- Carvacho Bart, L. y Sánchez Martínez, M. 2010. Comparación de índices de vegetación a partir de imágenes MODIS en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile, en el período 2001-2005. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 728-737. ISBN 978-84-472-1294-1.
- CEPAL, 2009. Guía metodológica para desarrollar indicadores ambientales y de desarrollo sostenible en países de América Latina y el Caribe.
- Chander, G., Markham, B., Helder, D. 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment* 113. 893–903.
- Chena, G; Metz, M; Rizzoc, D; Meentemeyer, R. 2015. Mapping burn severity in a disease-impacted forest landscape using Landsat and MASTER imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 40 (2015) 91–99.
- Doña, C; Dominguez, J.A; Caselles, V. 2009. Hacia una relación única para el estudio del estado trófico de lagos y embalses con Thematic Mapper. *Revista de Teledetección*. ISSN: 1988-8740. 2009. 32: 25-39.
- ESA. Copernicus Program. En Red. <http://www.copernicus.eu/> Fecha última visita: 26-06-2015.
- ESRI. ArcGis 9.2 desktop help. En red. <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>. Fecha última visita: 26-06-2015.
- Fernández-Palacios, A; Moreira, J.M. 1997. Metodología para el seguimiento multitemporal de la calidad de las aguas costeras en Andalucía a través del tratamiento de imágenes Landsat-TM. *Comunicación en congreso. Teledetección. Usos y Aplicaciones*. Valladolid. 1997. *Teledetección. Usos y Aplicaciones*. 203. 215.

- Fu, B.L; Li, Y; Zhang, B; Yin, B.S; Zhu H.L; Xin, Z.F. 2014. Study on method for assessment of the physical structure integrity in Chagan lake in China based on remote sensing. *Water Science & Technology*, 70.9, 2014.
- Fuller, L.M; Minnerick, R.J. 2007. Predicting Water Quality by Relating Secchi-Disk Transparency and Chlorophyll a Measurements to Landsat Satellite Imagery for Michigan Inland Lakes, 2001–2006. U.S. Geological Survey Fact Sheet 2007-3022.
- Grau, M; Llastarri, A; Vivancos, D; Vivancos, J. 2005. La tierra a vista de satélite, introducción a la Teledetección. Glosario de Teledetección. En red. <http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad3/glosario.htm#n>. Fecha última visita: 21-09-2015.
- Guo, G; Wu, Z; Xiao, R; Chen, Y; Liu, X; Zhang, X. 2015. Impacts of urban biophysical composition on land surface temperature in urban heat island clusters. *Landscape and Urban Planning* 135 (2015) 1–10.
- Hall, D; Crawford, C.J; Digirolamo, N.E; Riggs, G.A; Foster, J.L. 2015. Detection of earlier snowmelt in the Wind River Range, Wyoming, using Landsat imagery, 1972–2013. *Remote Sensing of Environment* 162 (2015) 45–54.
- Hall, D; Riggs, G. 2014. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. pp 779-780. Disponible en: http://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-90-481-2642-2_376.
- Harris, S; Veraverbeke, S; Hook, S. 2011. Evaluating Spectral Indices for Assessing Fire Severity in Chaparral Ecosystems (Southern California) Using MODIS/ASTER (MASTER) Airborne Simulator Data. *Remote Sensing*. 2011, 3, 2403-2419; ISSN 2072-4292.
- Houborg, R; McCabe, M; Cescatti, A; Gao, F; Schull, M; Gitelson, A. 2015. Joint leaf chlorophyll content and leaf area index retrieval from Landsat data using a regularized model inversion system (REGFLEC). *Remote Sensing of Environment* 159 (2015) 203–221.
- Huang, C; Peng, Y; Lang, M; Yeo, I.Y; McCarty, G. 2014. Wetland inundation mapping and change monitoring using Landsat and airborne LiDAR data. *Remote Sensing of Environment* 141 (2014) 231–242.
- Lange, H; Solberg, S. 2008. Leaf area index estimation using LIDAR and forest reflectance modelling of airborne Hyperspectral data. Norwegian Forest and Landscape Institute, N-1431 Ås, Norway.
- Lu, Xia. 2010. Sea Surface Temperature Extraction by MODIS Remote Sensing Data in Lianyungang Sea Area. 2010 Second IITA International Conference on Geoscience and Remote Sensing.
- McFeeters S.K. 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, Volume 17, Issue 7.
- Mindali, O.R; Michael, Y; Helman, D; Lensky, I.M. 2015. The role of local land-use on the urban heat island effect of Tel Aviv as assessed from satellite remote sensing. *Applied Geography* 56 (2015) 145e153.
- Ministerio del Medio Ambiente (MMA), 2013: “Primer Reporte del Estado de Medio Ambiente”.

- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). En Red. <http://modis.gsfc.nasa.gov/> Fecha última visita: 26-06-2015.
- NASA. 2012. Atmospheric Science Data Center. En red. <https://eosweb.larc.nasa.gov/HBDOCS/hdf.html>. Fecha última visita: 9-09-2015.
- NASA. 2015. Aqua Project Science. En red. <http://aqua.nasa.gov/>. Fecha última visita: 21-09-2015.
- NASA. 2015. Landsat Science. Glossary. En red. http://landsat.gsfc.nasa.gov/?page_id=2401. Fecha última visita: 21-09-2015.
- NASA. 2015. Landsat Science. TIRS Requirements. En red. <http://landsat.gsfc.nasa.gov/?p=5689>. Fecha última visita: 21-09-2015.
- NASA. 2015. TERRA the EOS Flagship. En red. <http://terra.nasa.gov/>. Fecha última visita: 21-09-2015.
- NOAA Satellite Information System. 2011. En red. <http://noaasis.noaa.gov/>. Fecha última visita: 9-09-2015.
- Nurdiana, A; Risdiyanto, I. 2015. Indicator determination of forest and land fires vulnerability using Landsat-5 TM data (case study: Jambi Province). *Procedia Environmental Sciences* 24 (2015) 141 – 151.
- OCDE-CEPAL, 2005: “Evaluaciones de Desempeño Ambiental: Chile”.
- PNUMA, 2009: “Manual de Capacitación para Evaluación Ambiental integral y Elaboración de Informes. Módulo de capacitación 4”.
- Qi, J; Chehbouni, A; Huete, A. R; Kerr, Y.H; Sorooshian, S. 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote sens. Environ.* 48: 119-126.
- Rock, B.N; Vogelmann, J.E; Williams, D.L; Vogelmann, A.F; Hoshizaki, T. 1986. Remote Detection of Forest Damage. *BioScience* Vol. 36, No. 7, *Ecology from Space* (Jul. - Aug., 1986), pp. 439-445.
- Smith, P; Romero, H. 2009. Efectos del crecimiento urbano del Área Metropolitana de Concepción sobre los humedales de Rocuant-Andalién, Los Batros y Lenga1. *Revista de Geografía Norte Grande*, 43: 81-93 (2009).
- SPOT-VEGETATION Programme. En Red. <http://www.vgt.vito.be/> Fecha última visita: 26-06-2015.
- Treimun, J. 2014. Zonificación climático-ambiental urbana mediante la integración de técnicas de teledetección satelital, geoestadística y sig. *Selper*.
- Triñanes, J.A; Cotos, J.M; Torres, J; Arias, J. 1993. Mapas SST de alta resolución mediante combinación de datos TM-AVHRR. *Revista de Teledetección* 1993.
- United Nations, 1997: “Glossary of Environment Statistics, Studies in Methods”. Series F, No. 67, New York.
- USGS. Land Remote Sensing Program. En Red. <http://remotesensing.usgs.gov/index.php>. Fecha última visita: 26-06-2015.

- USGS. Landsat Missions. En Red. <http://landsat.usgs.gov/index.php>_Fecha última visita: 26-06-2015.
- USGS. Long Term Archive, Landsat 8 OLI (Operational Land Imager) and TIRS (Thermal Infrared Sensor). En red. <https://lta.cr.usgs.gov/L8>. Fecha última visita: 2-09-2015.
- Van der Griend, A; Owe, M. 1993. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. International Journal of Remote Sensing.