



**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL  
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN**

**PROGRAMA DE POSGRADO**

**Análisis de la dinámica de la vegetación, su relación con los servicios  
ecosistémicos hídricos y la implementación de buenas prácticas de manejo de  
cuencas, parte alta del río Ocosito, Guatemala**

**Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de  
Posgrado como requisito para optar al grado de**

**MAGISTER SCIENTIAE**

**en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas**

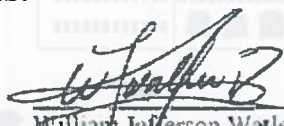
**Venez Rabin Pérez López**

**Octubre, 2021  
Turrialba, Costa Rica**

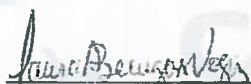
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero de la estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL  
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

**FIRMANTES:**



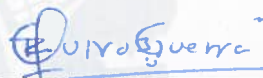
William Jefferson Watler Reyes  
William Watler Reyes, M.Sc.  
**Codirector de tesis**



Laura Benegas Negri, Ph.D.  
**Codirectora de tesis**



Vladimir Valera Mejías, Ph.D.  
**Miembro Comité Consejero**



Roberto Quiroz Guerra, Ph.D.  
**Decano, Escuela de Posgrado**



Venúz Rabin Pérez López  
**Candidata**

## **Dedicatoria**

A mis padres, Martina López y Félix Pérez, el fruto de una vida de esfuerzo generó que pudiera continuar mi vida académica. Gracias por sacrificar tanto por mí y por mis hermanos.

A mi amigo y compañero de vida, Johnny Fer, gracias por tu apoyo de subirte a éste y a muchos sueños, por abrazarlos y vivirlos juntos. ¡Eres un regalo de la vida!

A mis sobrinos, Dylan, Iker y Dechi, en muchos momentos sus rostros fueron parte de lo que me motivó a continuar, ojalá este esfuerzo les pueda afirmar que la academia es un mundo de servicio y amor a otros.

A mis hermanos, les agradezco su apoyo a la distancia, gracias por alegrarse conmigo y por el camino recorrido.

A mi nueva familia Patal Gómez, gracias por su cuidado a la distancia, por sus ánimos y oraciones.

A mis amigos, pese a la distancia los vi presentes, animándome y recordándome el valor de la oportunidad de continuar estudiando. Sus vidas en muchos sentidos retan la mía y sin duda, son una muestra tangible de quién es Dios a través de ustedes.

## **Agradecimientos**

Al maestro y diseñador de la creación, te agradezco que hayas pensado en mí para conocer y entender aquello que creaste debajo de los cielos, por tu cuidado desde niña y por los sueños hoy palpables, que me permiten ser una mujer libre de soñar. Gracias por tu inmerecido amor, que sin duda me confronta y me permite seguirte.

Al Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD), por la oportunidad de tener la experiencia de continuar mis estudios y el aporte económico que me permitió tener lo necesario durante mi estadía.

Al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), en especial, al personal administrativo, que antes de buscar el reconocimiento buscan el servicio y el bien común de los estudiantes. A los docentes, disfruté de sus experiencias, me dolí y tomé esperanza de su dedicación y sentido humano al servicio de la casa común.

Al Comité Consejero de tesis. Al profesor William Watler, por su disposición, retroalimentación y ánimo para continuar en el tema, muchas gracias. Profesora Laura Benegas, por sus aportes y disposición de ayuda, y al Profesor Vladimir Valera, por su apoyo y buena disposición siempre que lo requerí. Un especial agradecimiento a Eduardo Hernández, gracias por ser ejemplo de que el conocimiento se comparte.

Amigos CATIE, significan un regalo de Dios. Mi gratitud sincera, porque a través de ustedes me pude ver, me confronté y crecí. Gracias por permitirme disfrutar de quienes son y de la pasión que demuestran por el cuidado de los recursos naturales.

## CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2. METODOLOGÍA</b> .....	<b>3</b>
A. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	3
B. ASPECTOS BIOFÍSICOS .....	3
C. ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS .....	4
D. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO .....	5
2.1.1 <i>Análisis de la dinámica del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) a través de series temporales</i> .....	5
2.1.1.1 Obtención y corrección de imágenes satelitales .....	5
2.1.1.2 Corrección de bandeo de imágenes Landsat 7 ETM+ .....	6
2.1.1.3 Cálculo y extracción de valores de NDVI .....	6
2.1.1.4 Análisis de series temporales .....	7
2.1.1.5 Pronóstico del NDVI .....	8
2.1.2 <i>Identificación de zonas prioritarias para la implementación de buenas prácticas de manejo de cuencas, a través del portafolio de inversiones del modelo RIOS</i> .....	9
2.1.2.1 Identificación de buenas prácticas de manejo de cuencas .....	9
2.1.2.2 Selección de los objetivos a modelar .....	9
2.1.2.3 Elaboración de insumos requeridos para la corrida del modelo RIOS .....	10
2.1.2.4 Ejecución de RIOS Pre-Processing .....	15
2.1.2.5 Ejecución de RIOS Investment Portafolio Adviser .....	16
2.1.2.6 Ejecución de RIOS Portafolio Translator .....	16
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>18</b>
3.1. ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI) A TRAVÉS DE SERIES TEMPORALES .....	18
3.1.1 <i>Parques Regionales Municipales</i> .....	18
3.1.2 <i>Zona de veda de los volcanes</i> .....	20
3.1.3 <i>Reserva Natural Privada Finca Comunitaria Loma Linda</i> .....	21
3.1.4 <i>Clases de uso sin categoría de manejo</i> .....	21
3.2. PRIORIZACIÓN DE BUENAS PRÁCTICAS DE MANEJO DE CUENCAS A TRAVÉS DEL SISTEMA DE OPTIMIZACIÓN DE INVERSIONES (RIOS) .....	30
3.2.1 <i>Identificación de buenas prácticas de manejo de cuencas</i> .....	30
3.2.2 <i>Ejecución de RIOS Investment Portafolio Adviser</i> .....	31
3.2.3 <i>Ejecución de RIOS Portafolio Translator</i> .....	34
<b>4. CONCLUSIONES</b> .....	<b>38</b>
<b>5. RECOMENDACIONES</b> .....	<b>39</b>
<b>6. AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>39</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>40</b>
<b>8. ANEXOS</b> .....	<b>44</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Áreas protegidas en el área de estudio .....	4
<b>Cuadro 2.</b> Insumos requeridos para la ejecución de los portafolios (inversión y traductor) del modelo RIOS .....	10
<b>Cuadro 3.</b> Códigos de permeabilidad y estructura del suelo en función de su textura .....	13
<b>Cuadro 4.</b> Insumos requeridos para el modelo Water Yield de INVEST .....	14
<b>Cuadro 5.</b> Parámetros del modelo ARIMA, pruebas de estacionariedad y ruido blanco en los puntos de referencia para la sección alta del área de estudio.....	18
<b>Cuadro 6.</b> Actividades de inversión estratégica y buenas prácticas de manejo de cuencas	30
<b>Cuadro 7.</b> Actividades priorizadas para la generación de servicios ecosistémicos hídricos en la parte alta de la cuenca del río Ocosito .....	31
<b>Cuadro 8.</b> Áreas de actividades de transición de restauración, agricultura y protección para un horizonte de ocho años.....	35

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ubicación geográfica del área de estudio, cuenca del río Ocosito, Guatemala .....	3
<b>Figura 3.</b> Proceso para el análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) .....	5
<b>Figura 4.</b> Flujograma de la ejecución del modelo de Sistema de Optimización de Inversiones (RIOS) .....	17
<b>Figura 5.</b> Tendencia del NDVI para los usos y coberturas de la sección alta, parte alta de la cuenca del río Ocosito .....	22
<b>Figura 6.</b> Pronósticos del NDVI para los usos y coberturas de la sección alta, parte alta de la cuenca del río Ocosito .....	23
<b>Figura 7.</b> Tendencia del NDVI para los usos y coberturas, sección media, parte alta de la cuenca del río Ocosito .....	25
<b>Figura 8.</b> Pronóstico del NDVI para los usos y coberturas actuales de la sección media, parte alta de la cuenca del río Ocosito.....	26
<b>Figura 9.</b> Tendencia del NDVI de los usos y coberturas actuales de la sección baja, parte alta del río Ocosito.....	28
<b>Figura 10.</b> Pronósticos del NDVI de los usos y coberturas de la sección baja, parte alta de la cuenca del río Ocosito .....	29
<b>Figura 11.</b> Áreas prioritarias para la implementación de buenas prácticas de manejo de cuencas en la parte alta de la cuenca del río Ocosito, Quetzaltenango, Guatemala .....	32
<b>Figura 12.</b> Distribución de las actividades priorizadas en áreas y presupuesto para el área de estudio.....	33
<b>Figura 13.</b> Mapa base del uso y cobertura del año 2020 de la parte alta de la cuenca del río Ocosito .....	34
<b>Figura 14.</b> Mapa de transiciones de restauración, agricultura y de protección para un periodo de ocho años .....	37
<b>Figura 15 A.</b> Reforestaciones en el municipio el Palmar .....	55
<b>Figura 16A.</b> Cultivos permanentes de aguacate en el municipio de San Martin Sacatepéquez.....	55
<b>Figura 17A.</b> Aboneras a base de cáscara de macadamia en La Alianza S.A, El Palmar .....	56
<b>Figura 18A.</b> Sistemas agroforestales en el municipio de Colomba.....	56
<b>Figura 19A.</b> Barreras vivas en sistemas agroforestales en el municipio de Colomba .....	56
<b>Figura 20A.</b> Sistemas agroforestales (café y especies maderables) en el municipio el Palmar .....	57

## LISTA DE ACRÓNIMOS

ADF	Dickey-Fuller
ARIMA	Autoregresivos Integrados de Medias Móviles (por sus siglas en inglés)
ASAECO	Asociación de Agricultores Ecologistas
CGIAR CSI	Consortium for Spatial Information
COCODE	Consejos Comunitarios de Desarrollo
CONAP	Consejo Nacional de Áreas Protegidas
DEM	Modelo Digital de Elevación (por sus siglas en inglés)
DOS	Sustracción de Píxeles Oscuros (por sus siglas en inglés)
DT	Degradación de Tierras
ESA	Agencia Espacial Europea (por sus siglas en inglés)
ETM+	Enhanced Thematic Mapper
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (por sus siglas en inglés)
FMAM	Fondo para el Medio Ambiente Mundial
Global-PET	Evapotranspiración Potencial Global (por sus siglas en inglés)
IARNA	Instituto de Investigación y Proyección sobre Ambiente Natural y Sociedad
IDW	Inverse Distance Weighting
INE	Instituto Nacional de Estadística
INVEST	Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs
LULC	Land Use and Land Cover
MARN	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
ONU	Organización de las Naciones Unidas (por sus siglas en inglés)
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
RIOS	Sistema de Optimización de Inversiones en Recursos (por sus siglas en inglés)
SCP	Semi-automatic Classification Plugin
SEGEPLAN	Secretaría de Planificación y de Programación de la Presidencia
SOTERLAC	Soil and Terrain Database
SPAW	Soil-Plant-Air-Water
SVM	Clasificación Support Vector Machine
TIRS	Thermal Infrared Sensor
TOA	Top of Atmosphere
UNCCD	United Nations Convention to Combat Desertification
USAID	Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos (por sus siglas en inglés)
ZDV	Zona de Veda Definitiva

## **Análisis de la dinámica de la vegetación, su relación con los servicios ecosistémicos hídricos y la implementación de buenas prácticas de manejo de cuencas, parte alta del río Ocosito, Guatemala**

Venez Rabin Pérez López – venez.perez@catie.ac.cr

William Watler – wwatler@catie.ac.cr

Laura Benegas – lbenegas@catie.ac.cr

Vladimir Valera – vladimir.valera@catie.ac.cr

### **Resumen**

La degradación de las tierras (DT) es uno de los mayores problemas ambientales, tan importante como el fenómeno del cambio climático y difícil de superar para los países en desarrollo, debido a que mantiene múltiples causas de orden biofísico, económico, social, cultural y político (Pulido & Bocco 2011; UNCCD 2013). Como consecuencia de la DT existen cambios en la cobertura vegetal, y al ser la vegetación uno de los principales elementos indicadores terrestres de procesos biofísicos (Cruz Flores *et al.* 2020), resulta efectivo a través de las diferencias en los índices espectrales, evaluar los cambios históricos en las propiedades de la cobertura vegetal a gran escala (Feeley *et al.* 2005). Otras herramientas que contribuyen a hacer frente a la problemática de la DT han sido los modelos de priorización para la conservación de los recursos naturales, pues explican y predicen las áreas prioritarias, con los recursos disponibles y que a largo plazo causan los mayores beneficios (Chávez González *et al.* 2018; Pérez & Menes 2015; Zhang *et al.* 2010). La presente investigación tiene como objetivo analizar la dinámica de la vegetación en la parte alta de la cuenca del río Ocosito, Guatemala, con la potencial mejora de los servicios ecosistémicos hídricos, a partir de la priorización de buenas prácticas de manejo de cuencas hidrográficas. El análisis de la dinámica de la vegetación se realizó mediante series temporales del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés), aplicando el modelo Autorregresivo Integrado de Media Móvil (ARIMA) para diferentes usos y coberturas del año 2020, en la sección alta, media y baja del área de estudio. Se utilizaron, además, imágenes satelitales de los sensores Landsat 5, 7 ETM+ y 8, del período 1990 al 2020, procesadas desde la interfaz de Rstudio. La identificación de áreas prioritarias fue realizada a través del modelo de Sistemas de Optimización de Inversiones (RIOS, por sus siglas en inglés). El modelo RIOS se ejecutó con un presupuesto de US\$618,046 para un horizonte de cuatro años de inversión, bajo los objetivos: 1) control de erosión para la calidad de agua potable, y 2) mejora de la recarga de los acuíferos y con horizonte de cambio de uso y cobertura del suelo de 8 años para el cambio de uso y cobertura. Los resultados de la dinámica de la vegetación en la sección alta (Zona de Veda del Volcán Siete Orejas) muestra un incremento del 0.12 en la clase de uso bosque, para los próximos diez años. En la sección media, para las clases de uso de agricultura, pastizales y sistemas agroforestales se muestra una constancia del NDVI para los próximos diez años, con valores de 0.68 en agricultura como en pastizales y 0.78 para el uso de sistemas agroforestales, y en la sección baja, únicamente, para las clases de uso de pastizales y sistemas agroforestales se muestra incrementos del NDVI de 0.03. Respecto a la ejecución del modelo RIOS, el portafolio de inversiones reporta 1,688.04 ha priorizadas, equivalente al 11% del área total, con ocho líneas de inversión, y el portafolio traductor, generó el nuevo escenario de ocupación, con cambios importantes de las clases de uso de: cultivos permanentes (34%), pastizales (60%) y bosques (5.5%).

**Palabras clave:** Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), buenas prácticas, priorización, escenarios de ocupación, Sistema de Optimización de Inversiones (RIOS).



## **Analysis of vegetation dynamics, its relationship with water ecosystem services and the implementation of good watershed management practices, upper Ocosito River, Guatemala.**

Venuz Rabin Pérez López – venuz.perez@catie.ac.cr

William Watler – wwatler@catie.ac.cr

Laura Benegas – lbenegas@catie.ac.cr

Vladimir Valera – vladimir.valera@catie.ac.cr

### **Abstract**

Land degradation (LD) continues to be one of the greatest environmental problems, it is as important as the climate change phenomenon and difficult to overcome for developing countries, due to the fact that it has multiple biophysical, economic, social, cultural and political causes (Pulido & Bocco 2011; UNCCD 2013). As a consequence of LD there are changes in vegetation cover, and since vegetation is one of the main terrestrial indicators of biophysical processes (Cruz Flores *et al.* 2020), it is effective through differences in spectral indices to evaluate historical changes in the properties of vegetation cover at a large scale (Feeley *et al.* 2005). Other tools that contribute to address the problem of LD have been the prioritization models for the conservation of natural resources, as they explain and predict the priority areas, with the available resources and that in the long term cause the greatest benefits (Chávez González *et al.* 2018; Pérez & Menes 2015; Zhang *et al.* 2010). The research aims to analyze vegetation dynamics with the potential improvement of water ecosystem services, based on the prioritization of good watershed management practices in the upper part of the Ocosito river basin, Guatemala. The analysis of vegetation dynamics was carried out using Normalized Vegetation Index (NDVI) time series, applying the Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) model for different uses and coverages for the year 2020 in the upper, middle and lower sections of the study area. Satellite images from Landsat 5, 7 ETM+ and 8 sensors, from the period 1990 to 2020, processed from the Rstudio interface were used. The identification of priority areas was carried out through the model of the RIOS model. The RIOS model was executed with a budget of US\$618,046 for a four-year investment horizon, under the objectives: 1) erosion control for drinking water quality, and 2) improvement of aquifer recharge and with a land use and land cover change horizon of 8 years for land use and land cover change. The results of the vegetation dynamics in the upper section (Closed zone of the siete orejas volcano) show an increase of 0.12 in the forest use class for the next ten years. In the middle section, for the use classes of agriculture, pasture and agroforestry systems, there is a constant NDVI for the next ten years, with values of 0.68 in agriculture and pasture and 0.78 for the use of agroforestry systems. Regarding the execution of the RIOS model, the investment portfolio reports 1,688.04 ha prioritized, equivalent to 11% of the total area, with eight lines of investment, and the translator portfolio generated the new occupation scenario, with important changes in the use classes: permanent crops (34%), pastures (60%) and forests (5.5%).

**Key Words:** Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), best practices, prioritization, occupancy scenarios, Resource Investment Optimization System (RIOS)

## INTRODUCCIÓN

La degradación de la tierras (DT) es un proceso que provoca reducción o pérdida en el rendimiento del todo el planeta, tanto en el aspecto económico y ecológico (Baskan *et al.* 2017). Desde el punto de vista ecológico, existe un colapso de las funciones de los ecosistemas y pérdida de sus respectivos servicios ecosistémicos, mientras que las consecuencias económicas se derivan de la disminución de la productividad, fertilidad del suelo y de los valores de los servicios ecosistémicos (Pacheco *et al.* 2018). En América Latina, la mayor parte de las tierras se degradaron a causa de la deforestación (aproximadamente 100 millones de hectáreas) y el sobrepastoreo (70 millones de hectáreas), lo que ha provocado cambios en el suelo, la vegetación, en el ciclo hidrológico y la atmósfera (Torrico 2018).

Principalmente, son los sitios de las partes altas de las cuencas hidrográficas las que se encuentran relativamente vulnerables a la DT, por su morfología con pendientes pronunciadas y por albergar múltiples recursos económicamente útiles para las poblaciones aledañas (ej. agua, leña, madera para construcción, alimentos, etc.), lo que compromete los servicios ecosistémicos (Matthews *et al.*, 2000, Revenga *et al.*, 1998), citado por (Cuevas *et al.* 2009). Razón por la que el análisis de la DT se realiza a través de los componentes: suelo, aire, agua y la cobertura vegetal, ya que si alguno se altera generan efectos como la erosión hídrica laminar de los suelos, pérdida de cobertura, desequilibrio del ciclo hidrológico, entre otros (Sklenicka 2016; Castro 2013).

Guatemala tiene riqueza en biodiversidad, variación altitudinal, microclimas y posición biogeográfica, lo que genera diversas ecorregiones montañosas que se encuentran con alta prioridad de conservación a nivel regional y global, debido a la acelerada pérdida de su cobertura boscosa (MARN y PNUD 2018). Tal es el caso de la cadena volcánica central de Guatemala que se extiende desde el volcán Tacaná, frontera con México hasta el volcán Chingo, frontera con El Salvador. Es una región del país que se considera de gran importancia biológica, endémica, económica, social y cultural; alberga diversos ecosistemas que debido a las gradientes de elevación proporcionan bienes y servicios ecosistémicos a las poblaciones aledañas. No obstante, pese a su alto valor ha sido fuertemente afectada por la tala descontrolada, incendios forestales, contaminación de las aguas, avance de la frontera agrícola, tráfico de fauna y cacería ilegal, provocado problemáticas en el suelo, agua, vegetación y atmosfera (MARN, 2016).

Según la dinámica forestal nacional, en el inventario forestal del año 2006 al 2010, el país reportaba una pérdida de cobertura anual del 1%, equivalente a 1378 hectáreas por año. Sin embargo, el último inventario forestal nacional (2010 al 2016), en el año 2016 muestra una superficie de 3,574,244 hectáreas boscosa, equivalentes a un 33% del territorio nacional con pérdidas anuales de 0.5%. Aunque hubo una importante disminución en la tasa neta de deforestación anual, sigue siendo acelerada; afectando principalmente a las áreas protegidas pues hasta el año 2016 mantenía una tasa anual de pérdida de -0.9%. La escasa intervención del estado guatemalteco, así como su débil sistema de protección de los bosques y áreas protegidas en la cadena central ha provocado una fuerte degradación de las tierras de la que repercuten al país y a la región en general.

En el marco anteriormente descrito, el proyecto llamado “Promoviendo Territorios Sostenibles y Resilientes en Paisajes de la Cadena Volcánica Central en Guatemala”, financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM), y administrado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), ha buscado contribuir en la generación de múltiples beneficios ambientales, relacionados con la biodiversidad, reducción de degradación de la tierra, y el

manejo sostenible del bosque, con un enfoque participativo, que asegure la distribución equitativa de beneficios. Es así, como el proyecto priorizó la parte alta de la cuenca del río Ocosito (153.4 km<sup>2</sup>), que comprende los municipios de San Martín Sacatepéquez, Colomba y El Palmar, pertenecientes al departamento de Quetzaltenango, para realizar la presente investigación con el fin de analizar la dinámica de la vegetación con la potencial mejora de los servicios ecosistémicos hídricos, a partir de la priorización de buenas prácticas de manejo de cuencas.

La vegetación al ser uno de los principales indicadores terrestres de procesos biofísicos, resulta importante para evaluar los cambios históricos (Feeley *et al.* 2005), esto mediante técnicas como la percepción remota y los índices de vegetación que ha sido fuertemente utilizados para el análisis de los patrones de uso y cobertura del suelo, medios de evaluación y monitoreo de la DT (Bonet 2004; Cruz *et al.* 2020; Torres *et al.* 2014). El más utilizado es el índice de Diferencia Normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés) propuesto por Rouse *et al.*, (1974), siendo el resultado de la combinación de bandas espectrales (rojo e infrarrojo cercano). Según Pôças *et al.* (2020), es un índice capaz de medir los cambios en los patrones de la respuesta espectral a lo largo del crecimiento de la vegetación a diversas escalas (locales, regionales, continentales y globales) y tiempos. En este sentido, se realizó un análisis del NDVI para identificar la evolución y tendencias a través las series temporales, mediante el modelo Auto regresivo Integrado de Media Móvil (ARIMA, por sus siglas en inglés), utilizando imágenes satelitales Landsat, para el período de años 1990 al 2020.

Asimismo, como herramienta de planificación en cuencas hidrográficas para la reducción de la DT, se utilizó la modelación. Según Bremer *et al.* (2020) & Moraga (2011), los modelos ayudan a comprender y representar las problemáticas con relación al manejo de las cuencas hidrográficas, proporcionando un marco útil para evaluar e influir en decisiones del mundo real, donde la parte científica y tomadores de decisiones pueden trabajar en conjunto. Es así como se utilizó el Sistema de Optimización de Inversiones en Recursos (RIOS, por sus siglas en inglés), con el fin de conocer las inversiones más eficientes y eficaces que mediante un presupuesto específico generó los mayores beneficios ecosistémicos (control de erosión del suelo para la calidad de agua potable y la mejora de la recarga de los acuíferos) y el escenario futuro del área de estudio con nuevos usos y coberturas del suelo.

Los resultados de la investigación son un recurso importante ante los tomadores de decisiones que desean conocer el estado de la dinámica de la vegetación y las áreas prioritarias a implementar actividades de restauración y protección en la parte alta de la cuenca del río Ocosito, a fin de contribuir a la acelerada degradación actual.

La investigación se propuso los siguientes objetivos que se muestran a continuación, y que se detallan en el desarrollo de la investigación:

**Objetivo General:** analizar la dinámica de la vegetación con la potencial mejora de los servicios ecosistémicos hídricos, a partir de la priorización de buenas prácticas de manejo de cuencas hidrográficas.

**Objetivos Específicos:**

- Analizar la dinámica de la vegetación a través del Índice de Vegetación Diferencia Normalizado (NDVI) para el período 1990 al 2030.
- Identificar las zonas prioritarias para la implementación de buenas prácticas de manejo de cuenca, a través del sistema de optimización de inversiones (RIOS).
- Generar el escenario que refleje el estado futuro de parte alta de la cuenca del río Ocosito con la implementación del portafolio de inversiones (RIOS).

## METODOLOGÍA

### Ubicación y descripción del área de estudio

La presente investigación fue desarrollada en la parte alta de la cuenca del río Ocosito (153.5 km<sup>2</sup>). Río costero del suroccidente de Guatemala que nace de la Sierra Madre en el departamento de Quetzaltenango, tiene una longitud de drenaje de 107 km, comprende administrativamente los departamentos de Quetzaltenango, Retalhuleu y San Marcos, desemboca hacia el océano pacífico y colinda con las cuencas del río Naranjo al Oeste y Salamá al Este. Las coordenadas de referencia indican que la cuenca del río Ocosito se ubica entre los paralelos 14°13' y 14°50' de latitud y meridianos 91°35' y 92°12' de longitud (Figura 1).

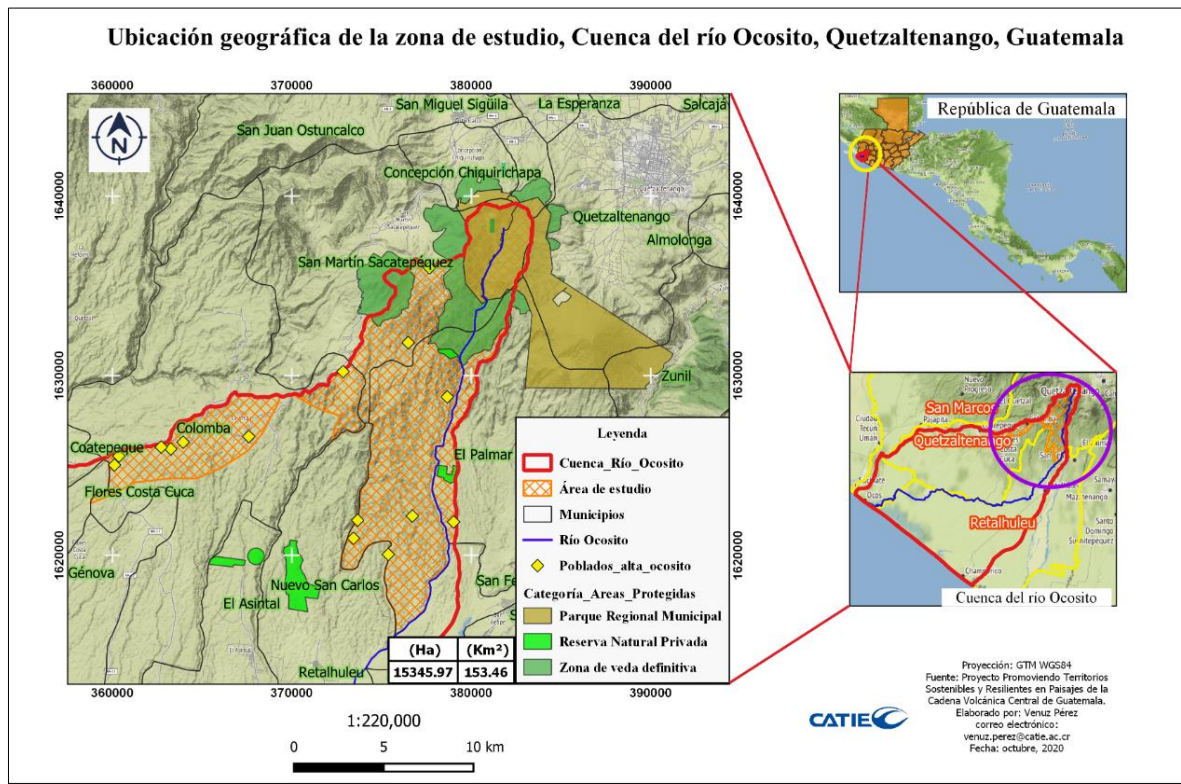


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio, cuenca del río Ocosito, Guatemala

### Aspectos biofísicos

La altitud del área de estudio oscila entre 395 a 3362 m.s.n.m., en este rango de altitud se registra el período lluvioso que va de los meses de mayo a octubre, con promedios anuales de 1,832 mm y temperaturas de 18 a 26.1°C. Los datos reportados fueron obtenidos de la plataforma *NASA's Prediction of Worldwide Energy Resources*, para un período de 30 años (1989-2019). Las condiciones climáticas mencionadas dan lugar a cinco zonas de vida, las cuales se ordenan en forma ascendente respecto al área, Bosque muy húmedo pre-montano tropical (68%); Bosque húmedo montano bajo tropical (10.8%); Bosque muy húmedo montano tropical (9.9%); Bosque muy húmedo montano bajo tropical (5.6%) y Bosque muy húmedo tropical (5.6%) (IARNA y URL 2015).

Según ASOKARST & CUNOR (2010), la formación de los suelos pertenece a la región hidrogeológica del antiplano volcánico, con geología volcánica cuaternarios, flujos y depósitos piroclásticos (Qv). Se caracterizan por presentar composición basáltica, andesítica y riolítica

procedentes de los conos activos, con potencial de aguas subterráneas relacionada al grado de fracturamiento de las lavas.

Sobre el uso y cobertura del suelo, según el mapa del año 2020 (Figura 13), las tierras se ocupan en el siguiente orden: sistemas agroforestales (café, frutales y árboles maderables) (48.3%); bosque mixto (33.6%); cultivos permanentes (8.9%); pastizales (4.9%); urbano (2.8%); agricultura anual (1.3%) y cuerpos de agua (0.2%). Es conveniente mencionar que del territorio total del área de estudio, el 22% es ocupado por áreas protegidas, equivalente a 3,362.4 ha (Cuadro 1), siendo los Parques Regionales Municipales los que ocupan una mayor superficie con 1,632 ha (IARNA *et al.* 2019).

**Cuadro 1.** Áreas protegidas en el área de estudio

Nombre	Área (Ha)	%
Parque Regional Municipal Concepción Chiquirichapa	833.7	24.8
Parque Regional Municipal Quetzaltenango - Saqbé	798.4	23.7
Reserva Natural Privada Finca Comunitaria Loma Linda	34.9	1.0
Zona de Veda Definitiva Volcán Chicabal	334.2	9.9
Zona de Veda Definitiva Volcán Siete Orejas	1361.2	40.5
<b>Total</b>	<b>3362.4</b>	<b>100.0</b>

Fuente: (IARNA *et al.* 2019)

De la hidrografía del área de estudio, se resalta la importancia de la laguna Chicabal, que se ubica en el municipio de San Martín Sacatepéquez. Es un área protegida que alimenta a otras quebradas de agua, que a su vez sirven de sitios de reproducción de las ranas arborícolas, *Plectrohyla avia* y *P. matudai* (especies endémicas y en peligro de extinción), que aprovechan las corrientes continuas como las intermitentes para el desarrollo de sus larvas (ASAECO & CONAP 2016).

### Aspectos socioeconómicos

El área de estudio se ubica entre los municipios de Colomba, El Palmar y San Martín Sacatepéquez, con una población de 104,049 habitantes, donde predominan los pueblos originarios K'iché y Mam (INE 2018). Sobre la tendencia de la tierra, según el IARNA (2008), los tres municipios tienen un valor promedio de 0.9, clasificado en una escala de entre 0 a 1, donde 0 significa igualdad y 1 desigualdad perfecta, por lo tanto, el área de estudio es un territorio con gran desigualdad por acceso a las tierras.

A continuación, se describen las principales actividades económicas de cada municipio.

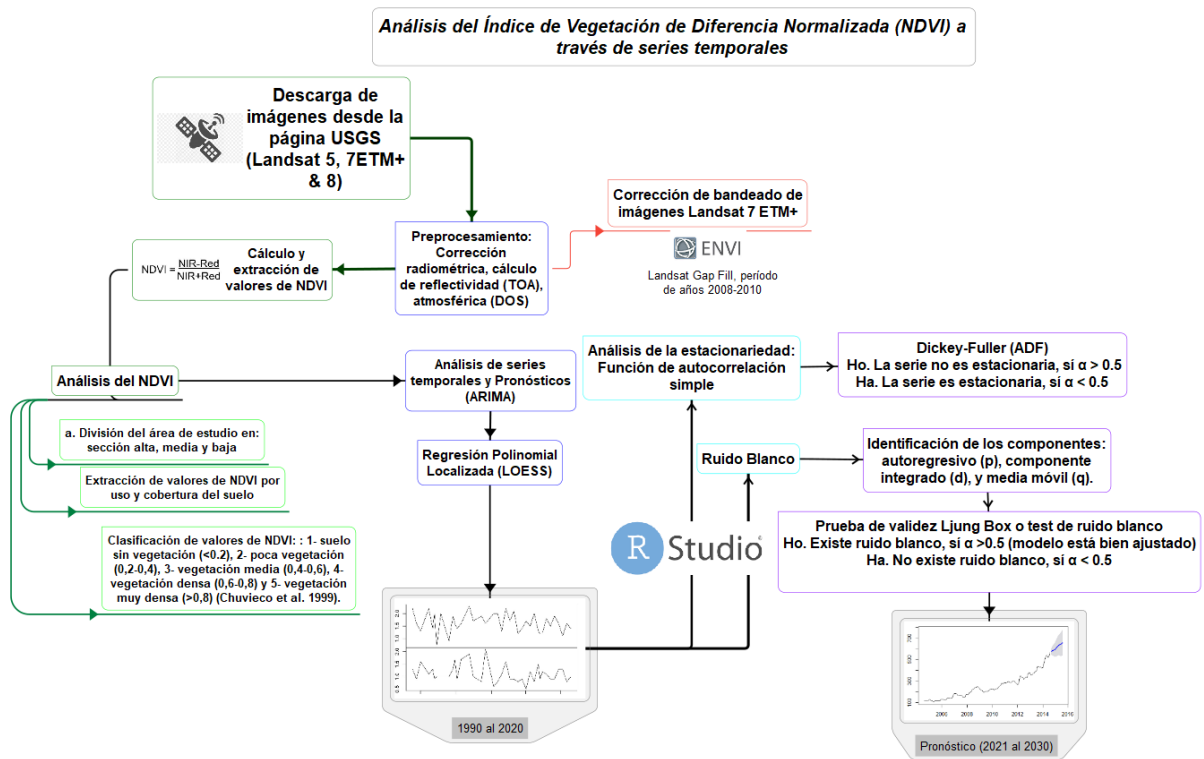
- En el municipio del Palmar, la población económicamente activa corresponde al 39.7%, de este porcentaje el 74.2% se dedica a la agricultura, caza y silvicultura. El turismo también se considera importante por su cercanía a los departamentos de Retalhuleu, Quetzaltenango, a la zona costera sur, frontera con México, y a los volcanes Santiaguito y Santa María (SEGEPLAN 2018).
- En Colomba, la población económicamente activa es del 47.9%. Las principales actividades son en un 67.5% la agricultura, caza y silvicultura; 9% al comercio (mayor y menor), restaurantes y hoteles; y un 5% a la construcción. En el sector agrícola predomina la producción de los cultivos de café, banano y macadamia (SEGEPLAN 2019).

- En San Martín Sacatepéquez, para el año 2010, se reportó un 24.4% de la población económicamente activa, en las actividades de agricultura, caza, silvicultura y pesca (83.2%); construcción (4.6%); comercio (mayor y menor), restaurantes y hoteles (4.2 %). En la agricultura, los principales cultivos son: papa, verduras, maíz, café, banano y plátano. Otra de las actividades especiales es el ecoturismo de la Laguna Chicabal, ubicada en la cima del volcán Chicabal, tiene gran importancia económica, administrada por la Asociación de Agricultores Ecológicos (ASAECO), quienes reportan aproximadamente 6000 personas (turistas) al año (SEGEPLAN 2020).

## Procedimiento metodológico

### Análisis de la dinámica del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) a través de series temporales

El esquema que se muestra a continuación describe las fases del análisis de la dinámica de la vegetación realizadas en la investigación (Figura 3).



**Figura 2.** Proceso para el análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

### Obtención y corrección de imágenes satelitales

Las imágenes satelitales se descargaron de la plataforma del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés)<sup>1</sup> en formato *GeoTIFF*, de los satélites Landsat 5 (años 1990-2000), Landsat 7 ETM+ (2000-2013) y Landsat-8 OLI/TIRS (2014-2020), con un filtro de nubosidad de menos 20%. Las imágenes de los años 2003 al 2007 no se ubicaron, no fueron descargadas por fallas del sensor Landsat 7 ETM+.

<sup>1</sup> <https://earthexplorer.usgs.gov/>

El procesamiento de las imágenes, según Sánchez *et al.* (2018), consiste en la corrección atmosférica para eliminar los gases (O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O principalmente) y aerosoles suspendidos, puesto que dispersan la luz en longitudes de onda. En concordancia a lo anterior se inició con la corrección radiométrica, convirtiendo los niveles digitales (ND) a valores de radiancia espectral con el método Rad, posteriormente se realizó el cálculo de reflectividad al techo de la atmósfera (TOA) combinando la reflectancia de la superficie y la reflectancia atmosférica, a fin de reducir variabilidad en las imágenes. Finalmente, se efectuó la corrección atmosférica a través del método DOS (sustracción de Pixeles Oscuros) con el propósito de eliminar aerosoles atmosféricos y la radiancia intrínseca.

### **Corrección de bandeo de imágenes Landsat 7 ETM+**

Debido a que las imágenes del período de años de 2008 al 2010 presentaban vacíos de información o *graps*, se procedió a corregirlas con el software ENVI 5.3, a través del complemento *Landsat Gap Fill*. Con las imágenes preprocesadas y corregidas, se realizó el corte de las bandas espectrales por cada imagen, con el uso de la capa máscara del área de estudio desde la interfaz de *RStudio*.

### **Cálculo y extracción de valores de NDVI**

El cálculo de NDVI se determinó con la ecuación de Rouse *et al.* (1974), utilizando un script previamente diseñado desde la interfaz de *RStudio*. Las bandas utilizadas para Landsat 5 y 7 ETM+ fueron la banda 3 (rojo) y banda 4 (infrarrojo cercano), y para Landsat 8 la banda 4 (rojo) y banda 5 (infrarrojo cercano). El procedimiento se realizó para los años de 1990 al 2020.

$$NDVI = \frac{IRc - R}{IRc + R}$$

Donde:

IRc= Reflectancia corregida atmosférica correspondiente al infrarrojo cercano

R= Reflectancia corregida atmosférica correspondiente al rojo

#### **a. División del área de estudio en secciones**

Para el análisis del índice de NDVI, se dividió el área de estudio en tres secciones: alta, media y baja, utilizando los criterios siguientes:

- La sección alta fue identificada como el territorio ocupado por áreas protegidas, que suman el 22% del área total. La finalidad era observar los cambios de los patrones de uso y cobertura de las áreas protegidas respecto a la sección media y baja, donde las tierras no tiene categoría de protección.
- Para la sección media y baja se consideró la diferencia de altitud de 1000 m.s.n.m. entre cada una, con la finalidad de observar cambios en los patrones de uso y cobertura.

#### **b. Extracción de valores de NDVI**

Los valores de NDVI se extrajeron por clase de uso y cobertura del suelo en cada una de las secciones del área de estudio (alta, media y baja). Previo se preparó una capa de 50

puntos aleatorios por clase (.shp), con la herramienta *Point Sampling Tool* de Qgis 3.14 se apilaron las capas desde el año 1990 al 2020 y se extrajeron los valores de NDVI.

En un archivo (.xlsx) se ordenaron los valores en orden cronológico, se realizaron gráficos de dispersión para observar el comportamiento de los puntos por uso y cobertura, se eliminaron los puntos atípicos, con los puntos restantes, se eligió un punto aleatorio para representar el uso o cobertura actual del suelo. Este procedimiento se realizó por uso y cobertura para cada sección del área de estudio.

Cabe recalcar que las imágenes satelitales de los años 2003 al 2007 no se encontraron para el área de estudio. En consecuencia, los valores para el período mencionado se calcularon a través de regresiones.

### c. Clasificación de valores de NDVI

Los valores de NDVI se clasificaron en cinco categorías: 1- suelo sin vegetación (<0,2), 2- poca vegetación (0,2-0,4), 3- vegetación media (0,4-0,6), 4- vegetación densa (0,6-0,8) y 5- vegetación muy densa (>0,8) (Chuvieco *et al.* 1999).

### Análisis de series temporales

Para reproducir el comportamiento del NDVI se utilizó el modelo de series temporales. El procedimiento se describe a continuación:

Mediante un script previamente elaborado desde la interfaz de *Rstudio*, se cargaron los valores de NDVI y se graficó la evolución en el tiempo para el período de 1990 al 2020 del NDVI para los diferentes usos y coberturas. Posteriormente, con los gráficos por uso y cobertura actual del suelo, se incluyó la regresión polinomial localizada (LOESS), propuesta por Cleveland (1979). La regresión LOESS permitió ajustar el modelo a los datos y suavizar el diagrama de puntos de la variable NDVI.

Con las series temporales previas, se procedió a aplicar el modelo ARIMA, propuesto por Box - Jenkins en 1970 y 1976. El modelo se define como un proceso estocástico que deriva de tres componentes: AR (Autoregresivo), I (Integrado) y MA (Medias Móviles), el cual se presenta con la ecuación lineal:

$$Y_t = c + \phi_1 y_{dt-1} + \phi_p y_{dt-p} + \dots + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \theta_q \epsilon_{t-q} + \epsilon_t$$

Donde  $y_d$  es  $Y$  diferenciado  $d$  veces y  $c$  es una constante

Antes de aplicar el modelo fue necesario cumplir con los supuestos de estacionariedad y ruido blanco. A continuación, se explica el proceso que se desarrolló para lograr los supuestos.

- a. Estacionariedad: se refiere a la estabilidad de la serie temporal, lo que significa que los datos no presenten cambios sistemáticos en el tiempo respecto a sus propiedades estadísticas (media y varianza). A partir de lo anterior, se determinó la estacionariedad por medio de la función de autocorrelación simple.

- Función de autorrelación simple

Para obtener estacionariedad por autorrelación simple, se procedió a obtener diferencias entre los mismos valores de la serie. El objetivo era remover patrones de



tendencia, no obstante, en ocasiones, fue necesario aplicar más de una diferencia para generar series de tiempo estacionarias. Seguidamente, se realizaron gráficos de estacionariedad donde visualmente se observó la estabilidad de la serie y se corroboró que los valores mantenían comportamientos entre una media constante, sin variaciones altas y bajas. Para conocer si existía significancia en la estacionariedad de las series temporales se procedió aplicar el estadístico de *Dickey-Fuller (ADF)* Dickey y Fuller (1979). Las hipótesis corroboradas se presentan a continuación:

- ✓ Ho. La serie no es estacionaria, sí  $\alpha > 0.5$
- ✓ Ha. La serie es estacionaria, sí  $\alpha < 0.5$

- b.** Ruido blanco: el supuesto de ruido blanco permitió corroborar que los residuos no tuvieran una estructura de dependencia. Para ello se realizó una prueba de Ljung Box o test de ruido blanco, el cual se detalla a continuación:

Previo a aplicar la prueba Ljung Box, se identificaron los parámetros del modelo ARIMA, los cuales son autorregresivo (p), componente integrado (d), y media móvil (q).

- ✓ Componente autorregresivo (p): se refiere al número de retardos utilizados en el modelo ARIMA. Para determinar el número de autorregresivos de cada una de las series temporales, se aplicó la función de autocorrelación parcial por medio de un script desarrollado en la interfaz de *RStudio*, se graficaron los valores autorregresivos y se contabilizó el número de rezagos que sobresalían de los límites del parámetro.
- ✓ Media móvil (q): se refiere al error del modelo como una combinación de los términos del error anteriores (et). El número de medias móviles se obtuvo al aplicar la función de autocorrelación, contabilizando los rezagos que superaban los límites del parámetro.
- ✓ Componente integrado (d): representa el grado de diferenciación del modelo. El parámetro se obtuvo del número de diferencias necesarias para lograr estacionariedad en la serie temporal.

Con los parámetros identificados del modelo ARIMA, por uso y cobertura del suelo se verificó la existencia de ruido blanco con la prueba de Ljung Box, considerando las hipótesis siguientes:

- ✓ Ho. Existe ruido blanco, sí  $\alpha > 0.5$  (modelo está bien ajustado)
- ✓ Ha. No existe ruido blanco, sí  $\alpha < 0.5$

### **Pronóstico del NDVI**

Con los parámetros del Modelo ARIMA identificados, se procedió a realizar el pronóstico de los valores futuros del NDVI para los próximos diez años (2021-2030). El procedimiento se realizó con la función *forecast* del paquete de *Rstudio* con un nivel de confianza del 95% y 85%.

## **Identificación de zonas prioritarias para la implementación de buenas prácticas de manejo de cuencas, a través del portafolio de inversiones del modelo RIOS**

### **Identificación de buenas prácticas de manejo de cuencas**

La identificación de buenas prácticas de manejo de cuencas se realizó reconociendo las actividades o costumbres que se han adoptado en el área de estudio, principalmente aquellas que contribuyen en controlar la erosión del suelo y el mantenimiento de la recarga de los acuíferos. Se contactó vía telefónica a los actores clave que realizan y dirigen inversiones en el área de estudio, tales como: técnicos de las oficinas de ambiente, gestión de riegos; miembros de los Consejos de Desarrollo Urbano y Rural (COCODES); organizaciones no gubernamentales, miembros de fincas privadas y asociaciones comunitarias. Luego de presentarles los objetivos de la investigación, se les solicitó realizar una lluvia de ideas de las prácticas, ubicación y el contacto de las personas que la realizan. Se identificaron 17 buenas prácticas de manejo de cuencas, clasificadas en ocho líneas de inversión. Se detalló el costo de implementación de cada una (insumos, herramientas, transporte, instalación, construcción, mantenimiento, mano de obra, entre otros), por hectárea por año mediante el formulario que se observa en el anexo 2. La información, en su mayoría, se recolectó vía telefónica a causa de las restricciones establecidas por la pandemia (Covid-19), que impidió el ingreso a las diferentes comunidades, fincas y asociaciones.

Cabe mencionar que el formulario se aplicó a un mínimo de tres actores por práctica, además se consideró el valor de la depreciación en herramientas y equipos, considerando la vida útil, ciclo de producción y costo actual del equipo (ver anexo 3). Para determinar el costo de las inversiones estratégicas, se procedió agrupar las 17 prácticas en categorías, se promediaron por categoría y se determinó el costo por hectárea por año.

### **Selección de los objetivos a modelar**

Los objetivos a modelar fueron seleccionados de acuerdo con los objetivos de intervención del proyecto de la cadena volcánica de Guatemala. Según MARN & PNUD (2018), quienes ejecutan el proyecto, buscan generar múltiples beneficios ambientales relacionados a la conservación de biodiversidad, reducción de degradación de la tierra y manejo sostenible del bosque en la cadena volcánica central, la cual ha sufrido fuerte presión a causa de la expansión de agricultura y ganadería; industrias mineras y forestales; caza y tala ilegal, resultando en cambios de uso de la tierra, contaminación del recurso hídrico, suelos, y la atmósfera. De acuerdo con el contexto se seleccionaron los objetivos siguientes:

- ✓ Control de la erosión para la calidad del agua potable: la finalidad es aportar a la calidad del agua río abajo, reducir costos de mantenimiento de agua potable y por ende en la salud de la población. Las prácticas identificadas regulan la erosión laminar, surcos, cárcavas y riberas.
- ✓ Mejora de la recarga de los acuíferos: la finalidad es mejorar la captación e intercepción de las precipitaciones, reducir caudales superficiales y aumentar la infiltración en el suelo hacia los acuíferos. Las prácticas identificadas aumentan, mantienen y mejoran los niveles freáticos, seguridad hídrica y costos de extracción.

## Elaboración de insumos requeridos para la corrida del modelo RIOS

El cuadro 2 describe los insumos para ejecutar los portafolios de inversión y traductor del modelo RIOS.

**Cuadro 2.** Insumos requeridos para la ejecución de los portafolios (inversión y traductor) del modelo RIOS

Insumo	Fuente	Características de la capa
Uso del suelo: <b>Landuse.tif</b>	Actualización del mapa de uso y cobertura a través de Imágenes satelitales Sentinel 2 <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formato: ráster (.tif)</li> <li>• Resolución espacial: 30*30 m</li> <li>• Extensión 639190.00,1615339.99: 652450.00,1639429.99</li> <li>• Tipo de dato: entero</li> <li>• Proyección: EPSG:32615-WGS 84 / UTM zona 15N</li> </ul>
Modelo Digital de Elevación (DEM): <b>DEM.tif</b>	Google Engine <sup>3</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DEM corregido por depresiones o sumideros</li> <li>• Resolución espacial: 30*30 m</li> </ul>
RIOS biophysical coefficient table: <b>rios_default_lulc_coef_ficient.csv</b>	<i>Natural Capital Project</i> . “Guía de uso RIOS, paso a paso” (Vogl <i>et al.</i> 2016)	• Tabla en formato .csv (rios_default_lulc_coefficients.csv) con usos del suelo y coeficientes biofísicos por clase LULC
Profundidad efectiva del suelo: <b>Depth.tif</b>	Plataforma SOTERLAC versión 2.0 <sup>4</sup> .	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formato ráster (.tif)</li> <li>• Resolución espacial: 30*30m</li> </ul>
Textura del suelo: <b>Texture.tif</b>	Plataforma SOTERLAC versión 2.0.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formato ráster (.tif)</li> <li>• Resolución espacial: 30*30m</li> </ul>
Precipitación del mes más lluvioso Precipitation for wettest month: <b>Prec_month.tif</b>	CHIRPS <sup>5</sup> de <i>Hazards Group</i> , y script desde la interfaz de R.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formato ráster (.tif)</li> <li>• Resolución espacial 30*30m</li> <li>• Unidad: milímetros (mm)</li> </ul>
Precipitación Media anual: <b>Prec_annual.tif</b>		
Erodabilidad del suelo (Factor K) <b>Erodibilityk.tif</b>	Los insumos se obtuvieron desde la plataforma SOTERLAC versión 2.0.	<p>Factor K de la ecuación del Grupo Tragsa (1998):  <math display="block">K = [10^{-4} * 2,71 * M^{1,14} * (12 - mo) + 4,20 (s^2) + 3,23 (p-3)] / 100</math>           Donde:            K= Factor de erodabilidad del suelo, expresado [t*m<sup>2</sup>*hr/ha*J*cm]            MO = Materia orgánica [%]            s = Código de la estructura del suelo            p = Código de permeabilidad            M = Producto de las fracciones del tamaño de las partículas</p>

<sup>2</sup> <https://www.usgs.gov/>

<sup>3</sup> <https://code.earthengine.google.com/#>

<sup>4</sup> <https://data.isric.org/geonetwork/srv/api/records/436bd4b0-7ffc-4272-be57-686b7d7eea7d>

<sup>5</sup> <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>

Insumo	Fuente	Características de la capa
		primarias o (%limo+%arena) *(100-%arcilla)
Erosividad por la lluvia (Factor R): <b>Erosivity.tif</b>	CHIRPS de <i>Hazards Group</i> .	Índice de erosión pluvial que representa la energía cinética de la lluvia se calculó de la ecuación: $R = 2.56 * IMF^{1.065}$ $IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P}$ Donde: IFM= Índice de Fournier modificado en mm R= Factor de Erosividad Pi= Precipitación del mes i en mm P= Precipitación total anual, en mm
Evapotranspiración <b>Actual: ETO.tif</b>	Plataforma global CGIAR CSI <sup>6</sup> a resolución de 1 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formato ráster (.tif)</li> <li>• Resolución espacial= 30*30 m</li> <li>• Unidad: mm/año</li> </ul>
Área de estudio: <b>U_hidrog.shp</b>	Área priorizada por el proyecto (área de estudio, parte alta de la cuenca Ocosito) “Promoviendo Territorios Sostenibles y Resilientes en Paisajes de la Cadena Volcánica Central en Guatemala”	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formato shapefile (.shp)</li> <li>Proyección: EPSG:32615-WGS 84 / UTM zona 15N</li> </ul>
Recarga Hídrica: <b>Recargah.tif</b>	Modelo <i>Water Yield</i> de INVEST. Insumos:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formato ráster (.tif)</li> <li>• Resolución espacial: 30*30 m</li> <li>• Unidad: milímetros (mm)</li> </ul>
Beneficiarios	Mapa de la división político-administrativa de los municipios con la población	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formato shapefile (.shp)</li> </ul>
Índice de Retención Aguas Abajo ( <b>Downslope retention index</b> )	<i>Geoprocessing</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formato ráster (.tif)</li> <li>Cálculo de distancia a la corriente, pendiente corriente abajo y retención de sedimentos</li> </ul>
Índice de Fuente Aguas Arriba ( <b>Upslope source index</b> )	<i>Geoprocessing</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formato ráster (.tif)</li> <li>Promedio de píxeles y factores de retención, flujo y de acumulación de corriente arriba del píxel</li> </ul>
Continuidad riparia ( <b>Riparian continuity</b> )	<i>Geoprocessing</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formato ráster (.tif)</li> <li>Cálculo de factores de retención en un búfer lineal lo largo de las corrientes</li> </ul>
Retención de sedimentos ( <b>Sediment retention</b> )	<i>Geoprocessing</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formato ráster (.tif)</li> <li>Capacidad de retención de sedimentos por las parcelas de</li> </ul>

<sup>6</sup> <https://cgiarcsi.community/>

Insumo	Fuente	Características de la capa
		tierra que se evitan transportar aguas abajo.
Índice de pendiente ( <i>Slope index</i> )	<i>Geoprocessing</i>	Formato ráster (.tif) Potencial que tiene la precipitación para correr sobre el suelo durante un evento de lluvia.

### a. Elaboración del mapa de uso y cobertura del suelo

Para la elaboración del mapa de uso y cobertura del suelo, se inició tomando puntos de control en campo, toma de coordenadas con GPS y fotografías en dirección a los puntos cardinales. Asimismo, se identificaron los usos y coberturas mediante transectos con imágenes de Google Earth desde Qgis 2.18. Seguidamente, de la plataforma de Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA<sup>7</sup>, por sus siglas en inglés), se descargó y seleccionó una imagen del sensor Sentinel 2 del año 2020, con filtro de nubosidad menor al 20% y nivel de preprocesamiento 2. Se cortó la imagen al área de estudio y con un script desarrollado desde la interfaz de *Rstudio* se realizó la clasificación supervisada con el modelo *Clasificación Support Vector Machine (SVM)*, el cual se entrenó con un 80% de las firmas espectrales extraídas de los puntos de control. Finalmente, se evaluó la concordancia entre los puntos mediante la matriz de confusión y la predicción del modelo a través del índice *Kappa*.

El resultado de la clasificación se convirtió a formato *shapefile (.shp)*, donde se realizaron ajustes por nubosidad y sombras y se reclasificaron los usos y coberturas a los códigos de los coeficientes biofísicos del modelo RIOS.

### b. Textura del suelo

La capa de textura del suelo se elaboró con capas de arena y arcilla (%), resolución 250 m, descargadas desde la página SOTERLAC (*Soil and Terrain Database*) versión 2.0. Las capas de arena y arcilla se reproyectaron al sistema UTM / datum WGS 84, zona 15N y mediante el complemento *Soil Texture* de Qgis 2.18, se obtuvieron las clases texturales según la clasificación de FAO.

### c. Erodabilidad (K)

Para la determinación de la erodabilidad del suelo se aplicó la ecuación del Grupo Tragsa (1998).

$$K = [10^{-4} * 2,71 * M^{1,14} * (12-mo) + 4,20 (s^2) + 3,23 (p-3)] / 100$$

Donde:

K= Factor de erodabilidad del suelo, expresado [ $t^*m^2*hr/ha^*J^*cm$ ]

MO = Materia orgánica [%]

s = Código de la estructura del suelo

p = Código de permeabilidad

M = Producto de las fracciones del tamaño de las partículas primarias o (%limo+%arena) \*(100-%arcilla)

<sup>7</sup> <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

Las capas de arcilla, limo, arena y materia orgánica (%) se descargaron de la página SOTERLAC. Los valores se extrajeron mediante una capa de puntos en formato *shapefile* (.shp) y el complemento *Point Sampling Tool* de Qgis 2.18. Los valores de permeabilidad y estructura del suelo fueron asignados según el cuadro 3.

**Cuadro 3.** Códigos de permeabilidad y estructura del suelo en función de su textura

Clase de textura	Permeabilidad (código P)	Conductividad hidráulica saturada (mm/hr)	SCS grupo hidrológico del suelo
Arcilla, franco arcilloso	6	<1	D
Arcillo arenoso, franco arcilloso limoso	5	1-2	C-D
Franco arcillo arenoso, franco arcilloso	4	2-5	C
Franco limoso, franco	3	5-10	B
Areno franco, franco arenoso	2	10-60	A
Arena	1	>60	A

Fuente: Mannaerts (1999) citado por Velásquez (2013)

#### d. Erosividad (R)

El cálculo de erosividad del suelo se realizó a partir de capas ráster de precipitación infrarroja diaria del período 1990 al 2020, obtenidas de la estación CHIRPS, elaborada por científicos del Centro de Observación y Ciencias de los Recursos de la Tierra del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS EROS) con estrecha colaboración el Grupo de Riesgos Climáticos de Santa Bárbara de la Universidad de California y descargadas con script desarrollado en Rstudio. Posteriormente, se elaboraron 12 capas de precipitación promedio mensual anual.

Con las capas raster de precipitación mensual y anual se procedió aplicar la ecuación de Fournier modificado (Fournier, 1960) y seguidamente, el cálculo el factor R.

$$IFM = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P}$$

$$R = 2.56 * IMF^{1.065}$$

Donde:

IFM= Índice de Fournier modificado, en mm

R= Factor de Erosividad

Pi= Precipitación del mes i, en mm

P= Precipitación total anual, en mm

#### e. Evapotranspiración actual

La capa de evapotranspiración se obtuvo del mapa global de evapotranspiración potencial (Global-PET), basado en el método de Hargreaves. Se descargó de la plataforma de CGIAR CSI en formato ráster (.tif), se reproyectó al sistema UTM / datum WGS 84, zona 15N con resolución espacial de 30 m.

## f. Beneficiarios

La capa se realizó basada en la división político-administrativa de los municipios. Desde Qgis se asignó la población por municipios (beneficiarios) y se convirtió a formato ráster (.tif).

## g. Recarga hídrica

Se aplicó el modelo de producción de agua (*Water Yield*) del software INVEST (*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs*). La aplicación del modelo requirió de los insumos que se detallan en el cuadro 4.

**Cuadro 4.** Insumos requeridos para el modelo *Water Yield* de INVEST

Datos requeridos	Fuente de información	Característica del dato
Precipitación	Estación de precipitación Infrarroja (CHIRPS), elaborada por USGS EROS) y el Grupo de Riesgos Climáticos de Santa Bárbara de la Universidad de California	12 rásteres de precipitación mensual por cada píxel Precip_1...12.tif Formato: ráster (.tif)
ETO	Plataforma del CGIAR CSI	12 rásteres de evapotranspiración de referencia mensual para cada píxel Proyección: EPSG:32615- WGS 84 / UTM zona 15N
Profundidad del suelo	SOTERLAC versión 2.0	Un dataset ráster GIS con valor de profundidad de suelos que concierne a la capa de restricción de raíz promedio para cada celda Formato: ráster (.tif)
Contenido de agua disponible de la planta (requerido)	Mediante el uso del software SPAW <sup>8</sup> y con datos de suelo se calculó el dato de contenido de agua disponible para la planta	Capa ráster GIS con valor de contenido de agua disponible para cada celda
Mapa de uso y cobertura del suelo/(requerido)	El proceso metodológico se describió en el punto 2.4.2.3.1	Formato: ráster (.tif)
Polígono del área de estudio	Área priorizada por el proyecto de la cadena volcánica de Guatemala.	Formato: <i>shapefile (.shp)</i>
Subcuencas (requerido)	Modelo SWAT ( <i>Soil and Water Assessment Tool</i> )	Polígono por subcuenca dentro de las cuencas hidrográficas principales
Tabla de coeficiente biofísica	Modelo RIOS	Archivo formato .csv que contiene información de cada una de las clases de uso del suelo/LULC
Parámetro Z	Consulta a expertos	Valor de punto flotante del orden de 1 a 30 correspondiente a la distribución estacional de la precipitación

<sup>8</sup> <https://www.ars.usda.gov/research/software/download/?softwareid=492>

## **h. Contenido de agua disponible en la planta**

De la plataforma SOTERLAC se descargaron las capas de arena, limo, arcilla y materia orgánica (%) a las profundidades de 0-5, 5-15 y 15-30 cm. Las capas se apilaron desde el complemento *Sampling Point Tools* y con una capa de puntos se extrajeron los valores. Se ordenaron en un archivo .xlsx, se ingresaron al software *SPAW (Soil-Plant-Air-Water)* y se obtuvo el contenido de agua (cm/cm).

## **i. Profundidad del suelo**

De la plataforma SOTERLAC se descargó la capa de profundidad, a una profundidad absoluta (hasta la roca madre) en centímetros y resolución espacial de 250 m. Se extrajeron los valores de las tres profundidades con capa de puntos en formato .shp, para luego realizar una interpolación por el método IDW (*Inverse Distance Weighting*). El resultado de la interpolación se convirtió a milímetros y se convirtió a la resolución espacial de 30m.

## **j. Tabla de coeficientes biofísicos**

Se construyó a partir de la tabla base que ofrece el software INVEST en formato .csv (Sharp *et al.* 2018). Las columnas que se consideraron para el modelo de producción de agua se detallan a continuación:

- **Lucode:** número entero único para cada clase de LULC.
- **LULC\_desc:** nombre descriptivo a la clase de uso o cobertura del suelo.
- **LULC\_veg (requerido):** valores de 1 a 0, donde 1 es para usos de la tierra con vegetación, y 0 para usos como: humedales, centros urbanos, cuerpos de agua, etc.
- **Root\_depth:** profundidad máxima de la raíz para las clases de uso del suelo con vegetación, dada en milímetros enteros.
- **Kc:** es el coeficiente de la evapotranspiración de las plantas para cada clase LULC, el coeficiente varía en un rango de 0 a 1.5.

El resultado del modelo fue la estimación de la producción de agua por píxel para el área de estudio.

## **Ejecución de RIOS Pre-Processing**

Antes de ejecutar el modelo RIOS, se preprocesaron los insumos previamente elaborados desde software *preprocessing RIOS*, versión 1.1.16, el cual se habilitó desde la caja de herramientas de Arcgis 10.5. Al abrirse la ventana, se seleccionaron los objetivos a modelar, la tabla biofísica, DEM, erosividad, erodabilidad, profundidad del suelo, precipitación del mes más lluvioso, textura del suelo, precipitación anual, distanciamiento de la zona riparia y el polígono de la cuenca. El resultado del *Pre-processing* generó dos carpetas; *“Intermediate”* y *“Output”*. Ambas carpetas con datos intermedios de la salida de RIOS *preprocessing* con relación a los objetivos por modelar.



## Ejecución de RIOS Investment Portafolio Adviser<sup>9</sup>

La ejecución del portafolio requirió información biofísica y social, presupuesto disponible a invertir, años de transición y los costos de implementación de buenas prácticas. Al instalar el portafolio se seleccionaron los objetivos: control de erosión para la calidad de agua potable y mejora de la recarga de los acuíferos. Seguidamente se cargaron las capas de uso y cobertura del suelo del año 2020, coeficientes biofísicos (.csv) y peso de las buenas prácticas respecto los objetivos (.csv).

En la siguiente ventana llamada: “editar pesos de factores”, se seleccionaron las subpestañas de los objetivos a modelar y se introdujo la siguiente información por objetivo:

- Control de erosión para la calidad de agua potable: erosividad, erodabilidad, profundidad del suelo, beneficiarios, y capas del preprocesamiento (*downslope retention index, erosion upslope source y erosion riparian index*).
- Mejora de la recarga de los acuíferos: evapotranspiración, textura, profundidad del suelo, áreas de recarga hídrica, beneficiarios y capas del preprocesamiento (*downslope retention index, upslope source, slope index*).

En las siguientes ventanas llamadas “pesos de los objetivos-transición” y “potencial de transición”, se analizaron, a través de la consulta de expertos y revisión de literatura, el grado entre sí de las transiciones hacia los objetivos y viceversa, y el grado de la transición y la actividad entre sí. Para ello se asignaron valores de 0 a 1, donde cero indica baja relación entre las variables.

Finalmente, se habilita la pestaña “presupuesto” donde se asignó un valor de \$618,046.00 para implementar las líneas de inversión en un período de cuatro años. El monto se determinó del presupuesto total del proyecto para las once áreas priorizadas que trabaja actualmente el proyecto de la cadena volcánica de Guatemala, distribuyendo en base al territorio ocupado. Es importante indicar que el monto puede estar sujeto a cambios o ajustes.

El resultado de la ejecución del portafolio brindó un informe del presupuesto y áreas priorizadas en hectáreas, visualizadas en una capa *ráster* (.tif).

## Escenario que refleje el estado futuro del uso u cobertura de área de estudio con la implementación del portafolio de inversiones (RIOS).

### Ejecución de RIOS Portafolio Translator<sup>10</sup>

Se ejecutó con los resultados del portafolio de inversión, la asignación de un horizonte de transición de ocho años y el análisis de las transiciones de restauración y agricultura. El resultado generó un mapa de transición de protección, restauración y agricultura, en el que se visualiza el escenario futuro de cambio de uso y cobertura a ocho años, si se implementan de las líneas de inversión.

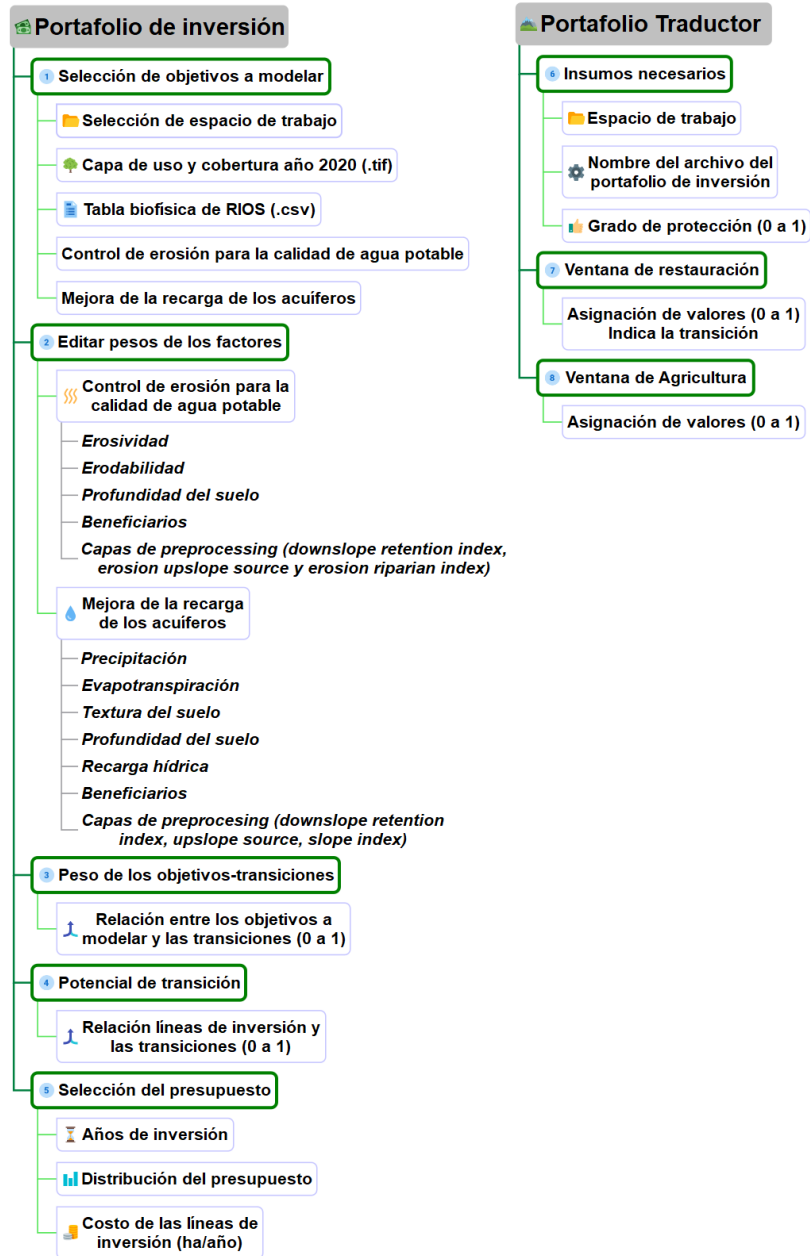
A continuación, se muestra el flujograma para la ejecución del modelo RIOS (Figura 4).

---

<sup>9</sup> El portafolio de inversión (*adviser*) muestra las inversiones más eficiente y eficaz que se pueden realizar con un presupuesto específico. El resultado es un mapa de actividades que indican las inversiones en cada actividad que darán los mejores resultados de acuerdo con los objetivos seleccionados (Volgl *et al.* 2016).

<sup>10</sup> El portafolio traductor (*translator*) muestra un escenario futuro del área de estudio si se implementa el portafolio de inversión. El resultado es un mapa de uso y cobertura actual del suelo y transición, restauración y agricultura para un período de tiempo determinado (Volgl *et al.* 2016).

## Ejecución Modelo RIOS



**Figura 3.** Flujoograma de la ejecución del modelo de Sistema de Optimización de Inversiones (RIOS)

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Análisis de la dinámica del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) a través de series temporales

El análisis de las series temporales se basó en los diferentes usos y coberturas (Figura 13) dentro del área de estudio, para el período de 1990 al 2020. Los resultados de los pronósticos de NDVI para los próximos diez años (2021 al 2030) se reportan con un nivel de confianza del 85% (anexo 2).

En la sección alta del área de estudio, se analizaron las series temporales de nueve puntos de referencia, correspondientes a usos y coberturas dentro y fuera de las áreas de protección (Figura 5 y 6). Los resultados del cuadro 5 indican que los puntos de referencia cumplen con los supuestos de estacionariedad (*Dickey Fuller*,  $p\text{-value} < 0.05$ ) y ruido blando (*Ljung-Box*,  $p\text{-value} > 0.05$ ) del modelo ARIMA.

**Cuadro 5.** Parámetros del modelo ARIMA, pruebas de estacionariedad y ruido blanco en los puntos de referencia para la sección alta del área de estudio

No.	Uso y cobertura	Autorregresivo	Diferencia	Media móvil	Dickey Fuller	Ljung-Box
					(p-value)	(p-value)
1	Bosque (PRM Concepción Chiquirichapa)	1	3	2	0.01	0.45
2	Agricultura (PRM Chiquirichapa)	2	3	2	0.01	0.69
3	Bosque (PRM Saqbé)	2	1	2	0.01	0.75
4	Agricultura (PRM Saqbé)	2	2	2	0.01	0.93
5	Bosque (ZDV del volcán Chicabal)	3	2	3	0.01	0.67
6	Bosque (ZDV Volcán Siete orejas)	2	2	2	0.03	0.99
7	Bosque (Finca Loma Linda)	2	1	2	0.03	0.9
8	Agricultura anual (No protección)	2	3	2	0.01	0.95
9	Bosque (No protección)	2	2	2	0.01	0.51

### Parques Regionales Municipales

En la sección alta del área de estudio, se ubican los Parques Regionales Municipales Concepción Chiquirichapa y Saqbé, declarados bajo el tipo de categoría IV según la Ley de áreas Protegidas, emitida por el decreto No. 4-89 y artículo 8 (CONAP 1989).

#### a. Parque Regional Municipal Concepción Chiquirichapa

Según el mapa de uso y cobertura actual del suelo del año 2020, se identificó dentro del parque las clases de uso: agricultura y bosques. Los resultados para la clase de agricultura según la serie temporal, existe una disminución del NDVI en los años 1994 a 1996 con valores de 0.75 a 0.49 (reducción de 0.26); equivalente a pérdida en la calidad, cantidad y desarrollo de la vegetación. Sobre la clase de uso de bosque, se observa una disminución leve en los años 1995 a 1997 con un valor de 0.84 a 0.76 (reducción de 0.08). Para el año 2020, la clase de uso agricultura y bosque reportaban valores de NDVI de 0.68 y 0.72, lo que se traduce a

un índice alto, equivalente a vegetación densa en ambas clases de uso. El pronóstico para los próximos diez años reporta en la clase de agricultura valores de 0.60 a 0.64 (aumento 0.03). No obstante, para el bosque el NDVI se mantendrá constante con un valor de 0.69 durante los próximos diez años.

#### b. Parque Regional Municipal Saqbé

El Parque Regional Municipal Saqbé ubicado en el municipio de Quetzaltenango, departamento de Quetzaltenango, según resolución SE-CONAP 22-98 & resolución 106-2017, fue declarado área protegida, en el año 1998. Tiene un área total de 5,615.43 hectáreas y no cuenta con plan maestro. Se identifican dentro del parque áreas dedicadas a la agricultura y bosque. Según las series temporales, la clase de uso agricultura presentó una disminución de NDVI con valores de 0.81 a 0.53 (reducción 0.28) en los años 1998 al 2002, lo que representó una disminución de la calidad y cantidad y desarrollo, en cuanto a la clase de uso bosque, se observó una disminución importante de 0.90 a 0.49 (reducción 0.41) en los años 1995 al 2002. Para el año 2020, la clase agricultura y bosque mantenían los valores de NDVI de 0.73 y 0.62, respectivamente, lo que representaba un índice alto o vegetación densa. El pronóstico para los próximos diez años en la clase agricultura son valores de 0.69 a 0.76 (aumento 0.07), y un valor de 0.61, constante para la clase de uso bosque.

Al analizar los resultados, según CONAP (2021), en ambos parques regionales no se reportan convenios de co-administración y únicamente, el parque regional Concepción Chiquirichapa cuenta con plan maestro (resolución SE-CONAP 457/2008), sin embargo, se encuentra desactualizado desde el año 2012. Resulta lógico, de acuerdo con lo anterior, que al comparar las series temporales de ambos parques regionales existan decrecimientos desde los años noventa a falta de la gestión del estado y la escasa vigilancia de los parques. No obstante, como se observa en la tendencia de la figura 5 del parque Concepción Chiquirichapa para la clase de uso bosque, desde los años 2006 hasta el 2020 se ha mantenido estable y de alguna forma, puede asociarse a la intervención de proyectos, como el caso del proyecto Helvetas Pro-Bosques, quienes, en conjunto con el CONAP, elaboraron el plan maestro y ejecutaron actividades de protección y conservación, principalmente, en los años 2008 al 2012.

La tendencia negativa en ambos parques para la clase de uso bosque, también se puede relacionar a la pérdida de cobertura forestal que ha sufrido el país, específicamente, en la cadena volcánica de Guatemala. Según el mapa de Cobertura Forestal de Guatemala y Dinámica de la Cobertura Forestal para el período 2006-2010, se reportó una tasa neta anual de -3% en el Parque Regional Municipal Saqbé. Para ese mismo período en el municipio de Concepción Chiquirichapa se reportó una tasa neta anual de +0.79% y un +2.75 para el período 2010-2016. Estos datos revelan que el parque regional Saqbé respecto al parque Concepción C., sufre una mayor presión.

Es importante recalcar que, si bien, el NDVI está influenciado por diversos factores tales como altitud, distribución de las precipitaciones (Abad y Mosquera 2020), temperatura (Zhao *et al.* 2018; Dagnachew *et al.* 2020), etapa fenológica (Millano & Paredes 2016), incendios forestales (Gaitán *et al.* 2015), entre otros, estos factores se deben corroborar con un análisis específico, que para este estudio se sale de sus alcances. Sin embargo, de acuerdo con los datos de pérdida boscosa reportados, sí se pueden relacionar las tasas de pérdida boscosa y las serie temporales de NDVI en ambos parques. Según autores como Cargua *et al.* (2018); Pineda *et al.* (2016); Gaitán *et al.* (2015), concuerdan en la relación entre el índice de NDVI y las pérdidas de la cobertura vegetal, sujetas especialmente a deforestaciones intensas. Además, resaltan la importancia de analizar este tipo de patrones de distribución espacial y temporal de la cobertura y utilizarlos como un instrumento de

monitoreo, identificación de áreas de intervención prioritarias con programas de vigilancia, protección y restauración.

### **Zona de veda de los volcanes**

Las zonas de veda se declararon áreas en las que se prohíben los descombro para fines agropecuario o explotación forestal. Son áreas que van desde el cráter hasta desniveles de 30%, sin embargo, las zonas de veda hasta la fecha no cuentan con tipo de categoría, lo que limita su manejo (CONAP 1989).

#### **a. Zona de veda volcán Chicabal**

La zona de veda del volcán Chicabal, según el acuerdo gubernativo 21-06-56 & resolución HCONAP 01-08-2014, se ubica en el municipio de San Martín Sacatepéquez, departamento de Quetzaltenango, cuenta con un área de 934.52 hectáreas manejadas según el plan maestro (resolución 502/2016). De acuerdo con el mapa de uso y cobertura esta zona de veda cuenta con cobertura boscosa, que según la serie temporal indicó un decrecimiento del NDVI de 0.87 a 0.67, en los años 1999 al 2002, lo que representó un decrecimiento de la calidad, cantidad y desarrollo del bosque. Sin embargo, para el año 2020 se observa un NDVI de 0.76, equivalente a un índice con vegetación densa. El pronóstico para los próximos diez años muestra un leve aumento de 0.73 a 0.74 (aumento 0.01) (ver figuras 5 y 6).

La estabilidad del NDVI en la serie temporal del bosque con valores de 0.77 a 0.78 desde los años 1990 al 2020 se ha de relacionar a la gestión del área por el CONAP y la co-administración de la ASAECO, dueños de la mayor cantidad de las tierras (154.03 hectáreas), y quienes desde el año 1999 se han dedicado a la protección, conservación natural y cultural del lugar (ASAECO y CONAP 2016). La importancia de la gestión de la ASAECO en la zona de veda ha sido vital, aunque esta no cuenta con un presupuesto anual para el manejo. CONAP cubre los salarios de tres guardarecursos y hasta el 2015, ASAECO percibía ingresos de Q40,000 anuales a razón de incentivos forestales PINFOR y Q10,000 por turismo. Lo que ha impactado directamente en la gestión del área protegida (CONAP 2021; ASAECO & CONAP 2016).

#### **b. Zona de veda del volcán Siete Orejas**

La zona de veda del volcán Siete Orejas se ubica en los municipios de Concepción Chiquirichapa, La Esperanza, Quetzaltenango, San Juan Ostuncalco y San Martín Sacatepéquez del departamento de Quetzaltenango, fue declarada en el año 1956 según acuerdo gubernativo 21-06-56 & resolución HCONAP 01-08-2014. Tiene un área de 5266.2 hectáreas y no cuenta actualmente con plan maestro. Según el mapa de uso y cobertura se identificó la clase de uso bosques, donde la serie temporal muestra dos momentos importantes. El primer momento indica un decrecimiento de 0.83 a 0.51 (reducción 0.32) en los años 1991 a 1993; equivalente a una pérdida de la calidad, cantidad y desarrollo de muy alta a moderada, y el segundo momento muestra un aumento con valores de 0.53 a 0.73 (aumento de 0.2) en los años 2009 al 2013. Para el año 2020 se reporta un valor alto de NDVI de 0.78. El pronóstico reporta para los próximos diez años un aumento de 0.81 a 0.93 (aumento 0.12), equivalente a una vegetación muy densa.

No se ubicaron factores o intervenciones en la zona a los cuales se les pueda relacionar tales aumentos del NDVI de los últimos años. Únicamente en el año 2019 se elaboró un estudio técnico para el proceso de categorización de la zona de veda definitiva, con el fin de evaluar su potencial y viabilidad actual (CONAP 2020). Este documento aún no

se encuentra disponible, pero se espera contribuya con el mantenimiento de los servicios que actualmente brinda la zona de veda.

### **Reserva Natural Privada Finca Comunitaria Loma Linda**

La reserva natural privada finca Loma Linda pertenece a la categoría de manejo Reserva Natural Privada (tipo V), según resolución SE-CONAP 023/2012. Se ubica en el municipio del Palmar con área total de 34.86 hectáreas, no cuenta con plan maestro y actualmente es administrada por la Cooperativa Agrícola Integral "Loma Linda" R.L. Se identificó en esta la clase de uso bosques, donde se muestran dos momentos importantes de disminución del NDVI, el primer momento, con valores de 0.80 a 0.64 (reducción 0.16) en los años 1991 a 1993, y el segundo de 0.71 a 0.61 (reducción 0.1) en los años 1995 a 1999. Para el año 2020, el valor de NDVI se reportó en 0.76, equivalente a un índice alto en calidad, cantidad y desarrollo del bosque. El pronóstico para los próximos diez años será un comportamiento constante con un valor de 0.75.

Por la cercanía de la reserva natural al volcán Santiaguito, es conveniente asociar las reducciones del NDVI con las erupciones del volcán Santiaguito, que, según los registros en el año 1997, generó flujos de lodo y escombros que viajaron por el cauce del río Nimá I del municipio del Palmar. En el año 1998, nuevamente, provocó una fuerte erupción que ocasionó la segunda destrucción del municipio del Palmar, dejando una densa nube de ceniza que cubrió la parte oriental de Quetzaltenango (municipios de San Felipe y El Palmar). En el año 1999, se registró la erupción del Domo "El Caliente", generando lava al suroeste de Quetzaltenango. Según los autores Gaitán *et al.* 2015; las capas de cenizas depositadas en la vegetación son capaces de provocar un efecto de sombreado que reduce el área foliar para fotosíntesis, provocando baja en la productividad y en la reflectancia (luz emitida hacia los sensores).

Es de igual importancia mencionar que la Cooperativa Agrícola Integral "Loma Linda", ha contribuido a la conservación y protección de la reserva, promoviendo actividades como: caminatas al mirador de los volcanes Santiaguito y Santa María, ecoturismo y avistamiento de aves exóticas como el Quetzal. Los recursos generados son utilizados para la gestión de la reserva natural.

### **Clases de uso sin categoría de manejo**

En la sección alta también se analizaron dos puntos sin categoría de protección. El primero punto correspondiente a la clase de uso agricultura, la serie temporal mostró una reducción de 0.87 a 0.25 (reducción 0.62) para los años 1995 al 2000. No obstante, en el año 2020 el valor incrementó a 0.53, equivalente a una vegetación moderada en calidad, cantidad y desarrollo. El pronóstico, para los próximos diez años, muestra valores de 0.48 a 0.61 (incremento 0.13) en los años 2021 al 2030. El segundo punto tomado de la clase de uso bosque, muestra una disminución del NDVI en dos momentos, el primero, con valores de 0.83 a 0.64 (reducción 0.19) para los años 1991 al 1992, y el segundo de 0.84 a 0.75 (reducción 0.09) para los años 1999 al 2003. Para el año 2020 el valor de NDVI se mantuvo en 0.74, equivalente a un NDVI alto, equivalente a una alta cantidad, calidad y desarrollo. El pronóstico para los próximos diez años muestra valores de 0.75 a 0.73 (incremento 0.02).

Al comparar el bosque sin protección versus los bosques dentro de las áreas protegidas se observa que el comportamiento es similar, ya que, aunque existen entidades que gestionan los parques regionales municipales, zonas de veda y reserva natural privada, no existe un presupuesto asignado, lo que provoca que las áreas protegidas pierdan cobertura, similar a las zonas sin categoría de manejo.

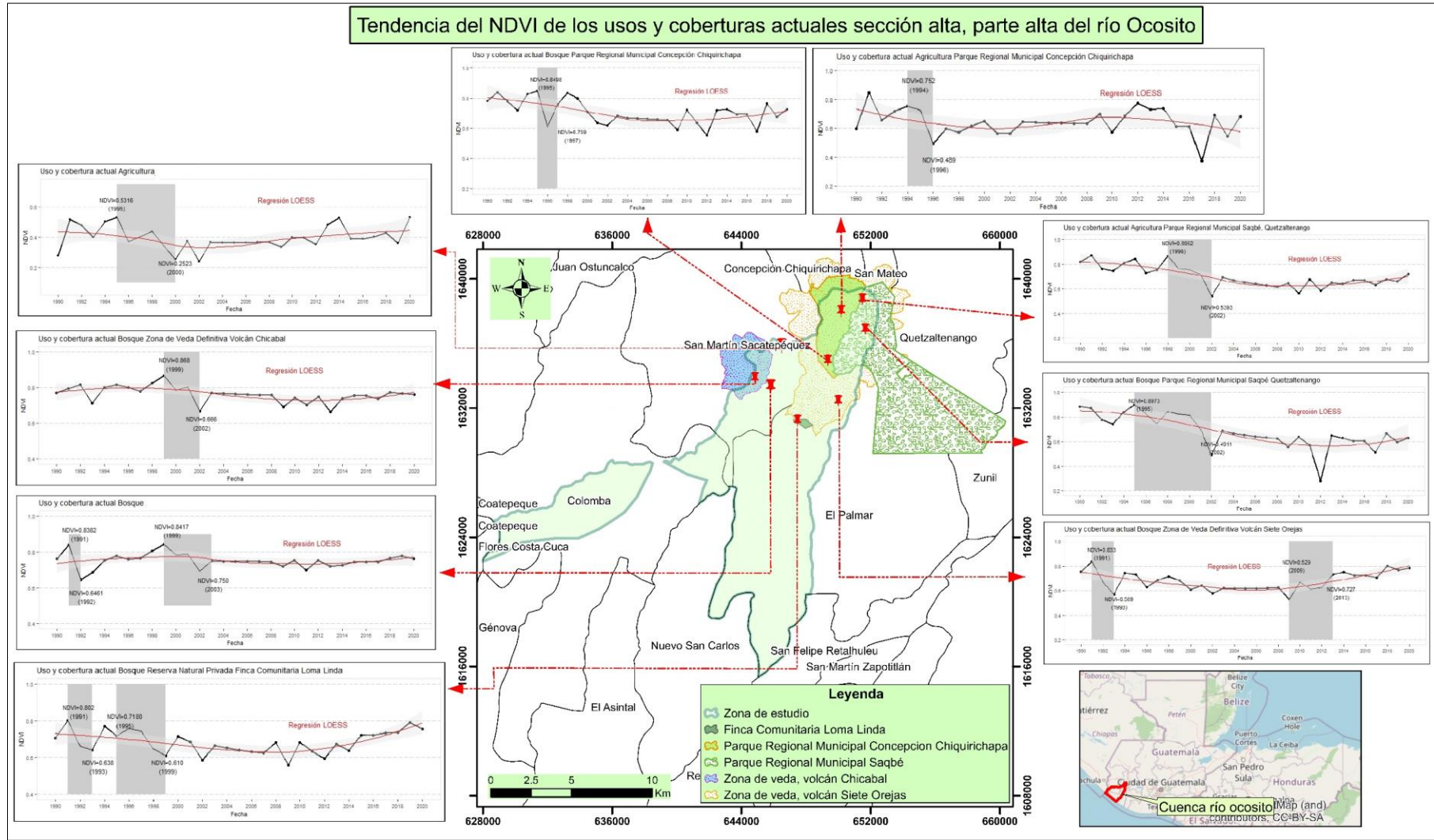
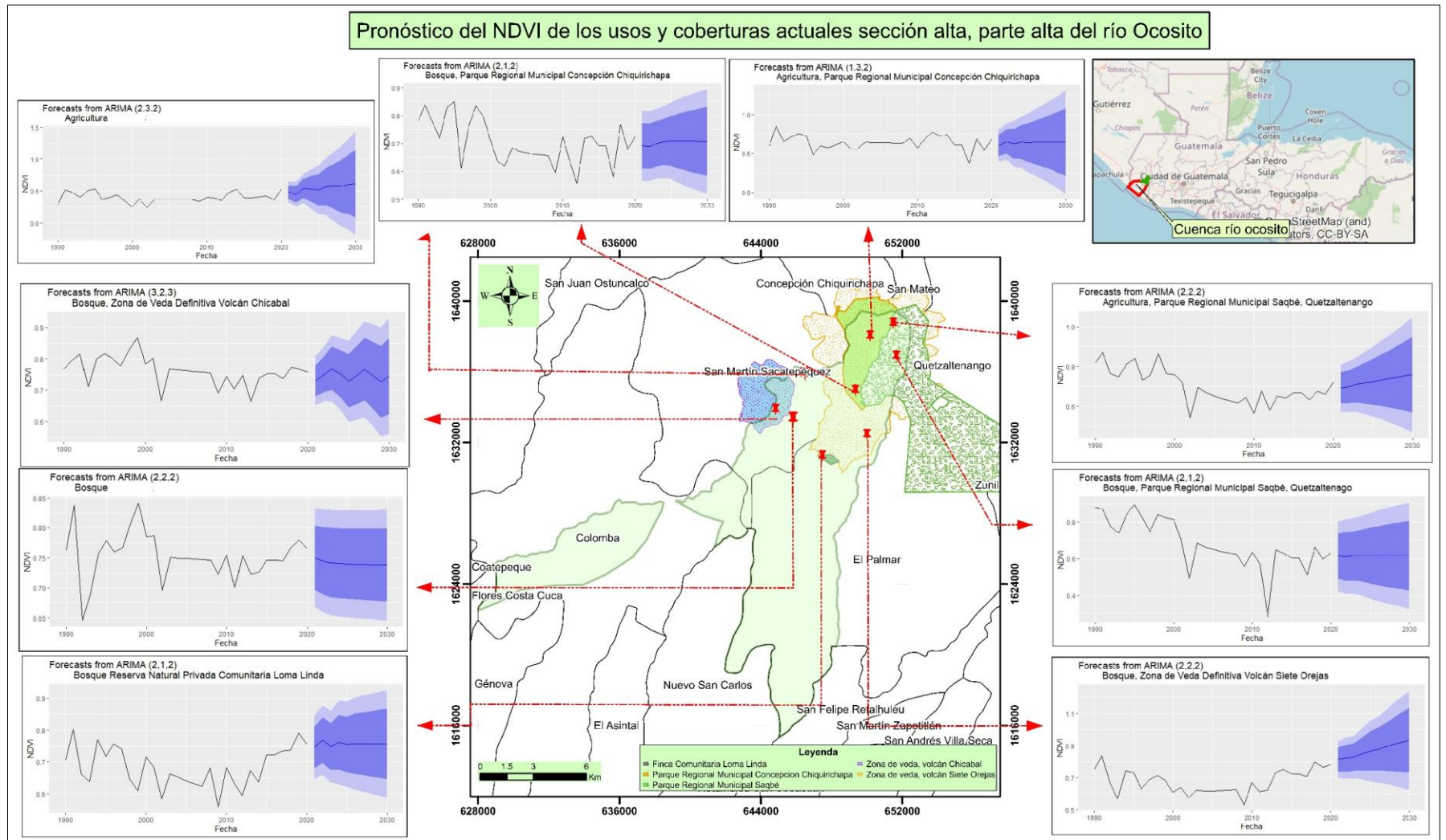


Figura 4. Tendencia del NDVI para los usos y coberturas de la sección alta, parte alta de la cuenca del río Ocosito



**Figura 5.** Pronósticos del NDVI para los usos y coberturas de la sección alta, parte alta de la cuenca del río Ocosito



En la sección media del área de estudio se analizaron tres puntos de referencia que se detallan en las figuras 7 y 8. Además en el cuadro 6 se observa que los puntos de referencia cumplen con los supuestos de estacionariedad (*Dickey Fuller*,  $p\text{-value} < 0.05$ ) y ruido blando (*Ljung-Box*,  $p\text{-value} > 0.05$ ) del modelo ARIMA.

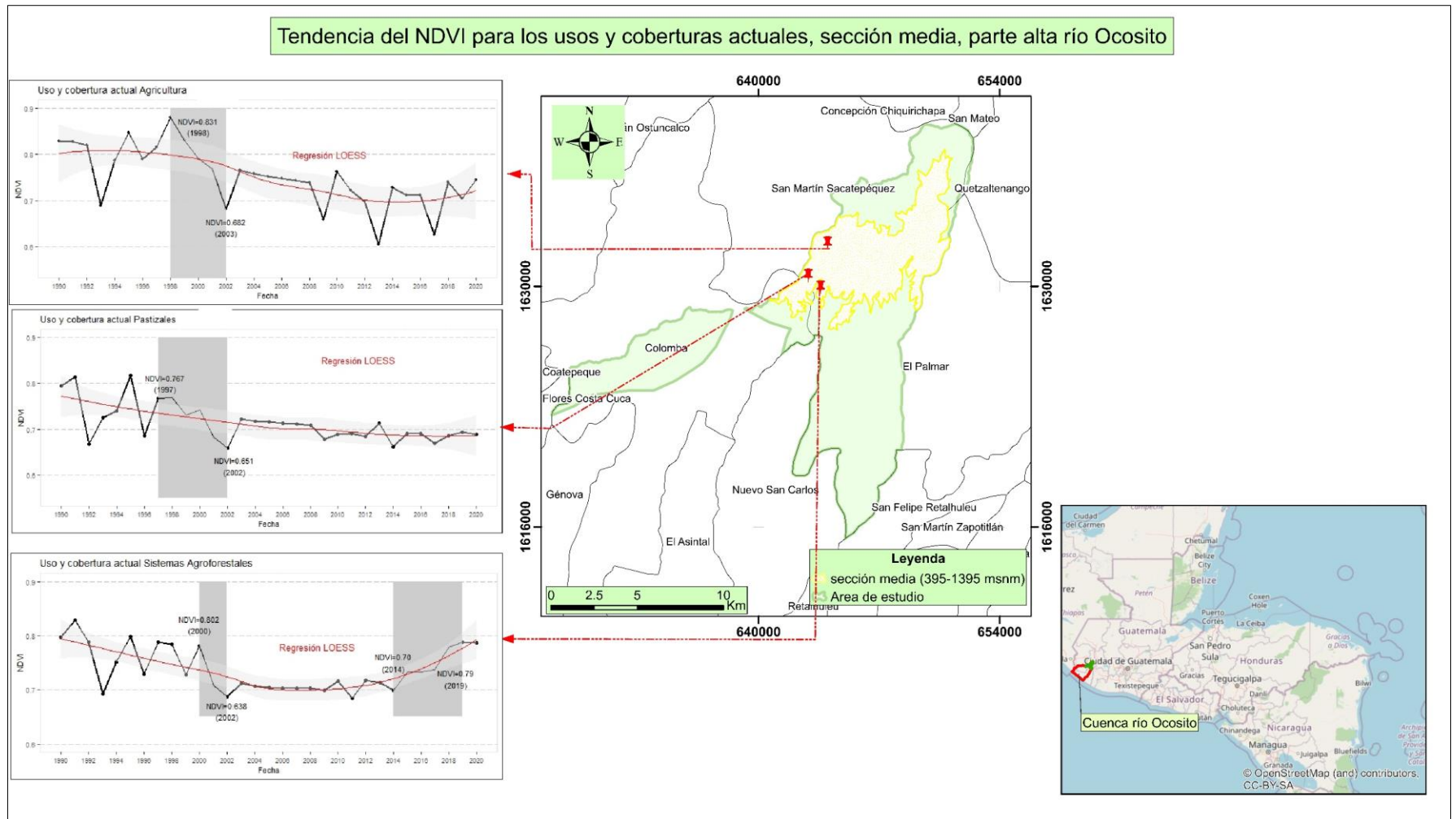
**Cuadro 6.** Parámetros del modelo ARIMA, pruebas de estacionariedad y ruido blanco en los puntos de referencia para la sección media del área de estudio.

No.	Uso y cobertura	Autorregresivo	Diferencia	Media móvil	Dickey Fuller (p-value)	Ljung-Box (p-value)
1	Agricultura anual	3	2	2	0.01	0.8
2	Pastizales	2	1	2	0.01	0.9
3	Sistemas agroforestales	2	1	2	0.1	0.96

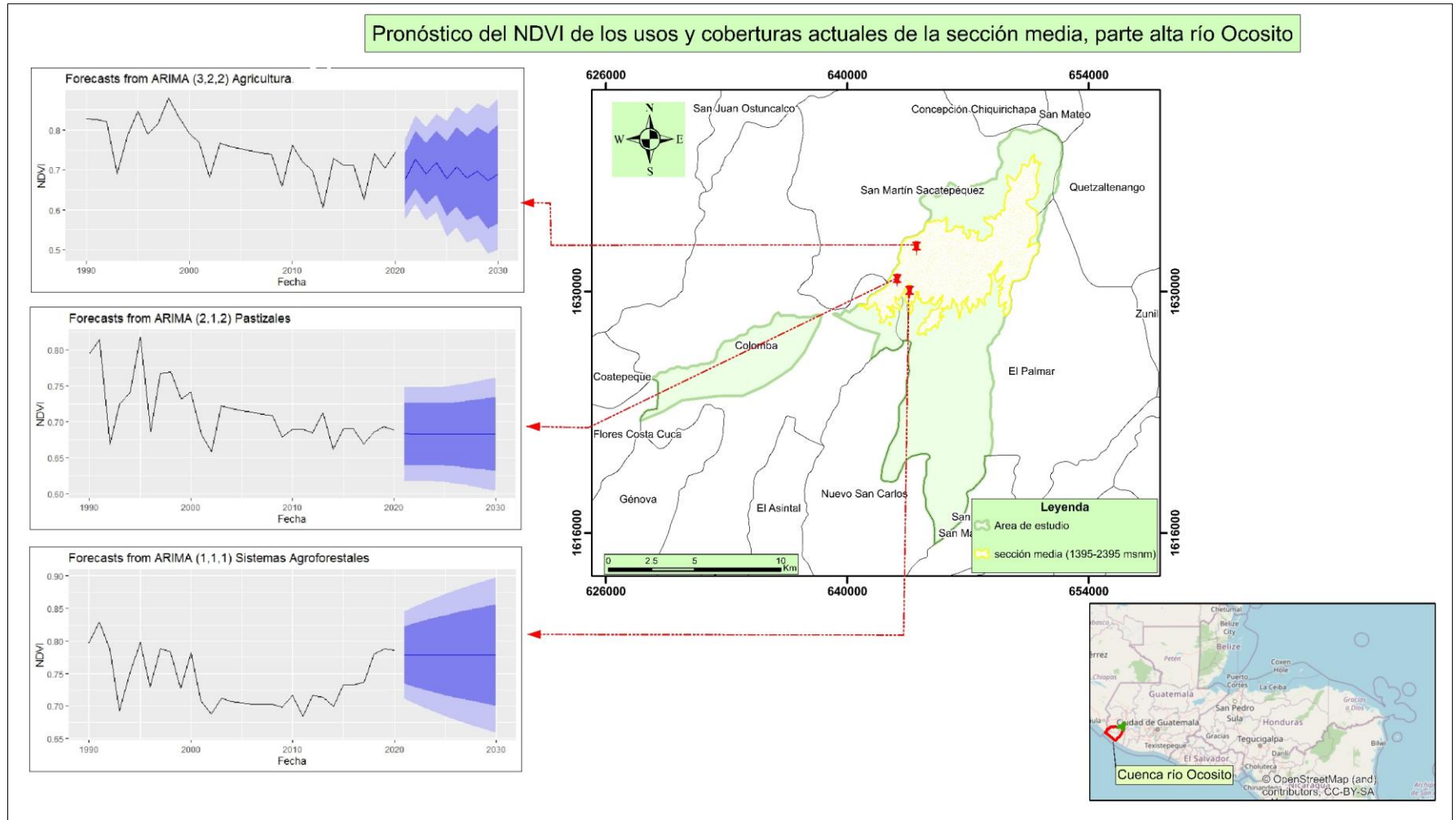
Los resultados muestran que, para la clase de agricultura, existe una disminución del NDVI de 0.83 a 0.69 (reducción 0.14) para los años 1998 al 2003. Sin embargo, se observa un aumento para el año 2020 con un valor de 0.74, lo que se traduce en una buena calidad, cantidad y desarrollo de la vegetación. El pronóstico de los próximos diez años muestra un NDVI constante con valor de 0.68.

Al comparar los resultados con la clase de agricultura de la sección alta y media, no se observa la misma tendencia, aunque los valores de NDVI en ambos casos disminuyen, la agricultura en la sección alta para el año 2020, mantenía un valor de 0.53, comparado con la sección media con un valor de 0.68, para el mismo año. El valor en la sección alta se puede relacionar a una agricultura intensiva, pues son tierras dedicadas a la producción de maíz (45); la papa (30%); y los cultivos de hortalizas como: repollo, zanahoria y cebolla en un 25% (ASAECO y CONAP 2016). Respecto a la agricultura en la sección media se reportan áreas dedicadas a producción de maíz y huertos en asocio con cultivos permanentes, principalmente (SEGEPLAN 2019).

En cuanto a la clase de pastizales, la serie temporal muestra una reducción del NDVI con valores de 0.77 a 0.65 (reducción 0.12) para los años 1997 al 2002. Para el año 2020 se observó un valor de 0.74, equivalente a un índice alto, con buena calidad, cantidad y desarrollo de la vegetación. Sobre la clase de uso sistemas agroforestales, se muestran dos cambios importantes en la tendencia del NDVI. El primer momento, con valores de 0.80 a 0.64 (reducción 0.16) en los años 2000 al 2002, y el segundo, con valores de 0.70 a 0.79 (aumento 0.08) en los años 2014 al 2019. Para el año 2020, el valor era 0.78. El pronóstico para ambas clases se mantiene constante para los próximos diez años, con valores de 0.68 para la clase de uso pastizales y 0.78 para la clase de uso sistemas agroforestales.



**Figura 6.** Tendencia del NDVI para los usos y coberturas, sección media, parte alta de la cuenca del río Ocosito



**Figura 7.** Pronóstico del NDVI para los usos y coberturas actuales de la sección media, parte alta de la cuenca del río Ocosito

Los resultados de la sección baja del área de estudio corresponden a cinco puntos de referencia que se detallan en las figuras 7 y 8. Asimismo, en el cuadro 7 se observa que los puntos de referencia cumplen con los supuestos de estacionariedad (Dickey Fuller, p-value < 0.05) y ruido blando (Ljung-Box, p-value >0.05) del modelo ARIMA.

**Cuadro 7.** Parámetros del modelo ARIMA, pruebas de estacionariedad y ruido blanco en los puntos de referencia para la sección baja del área de estudio.

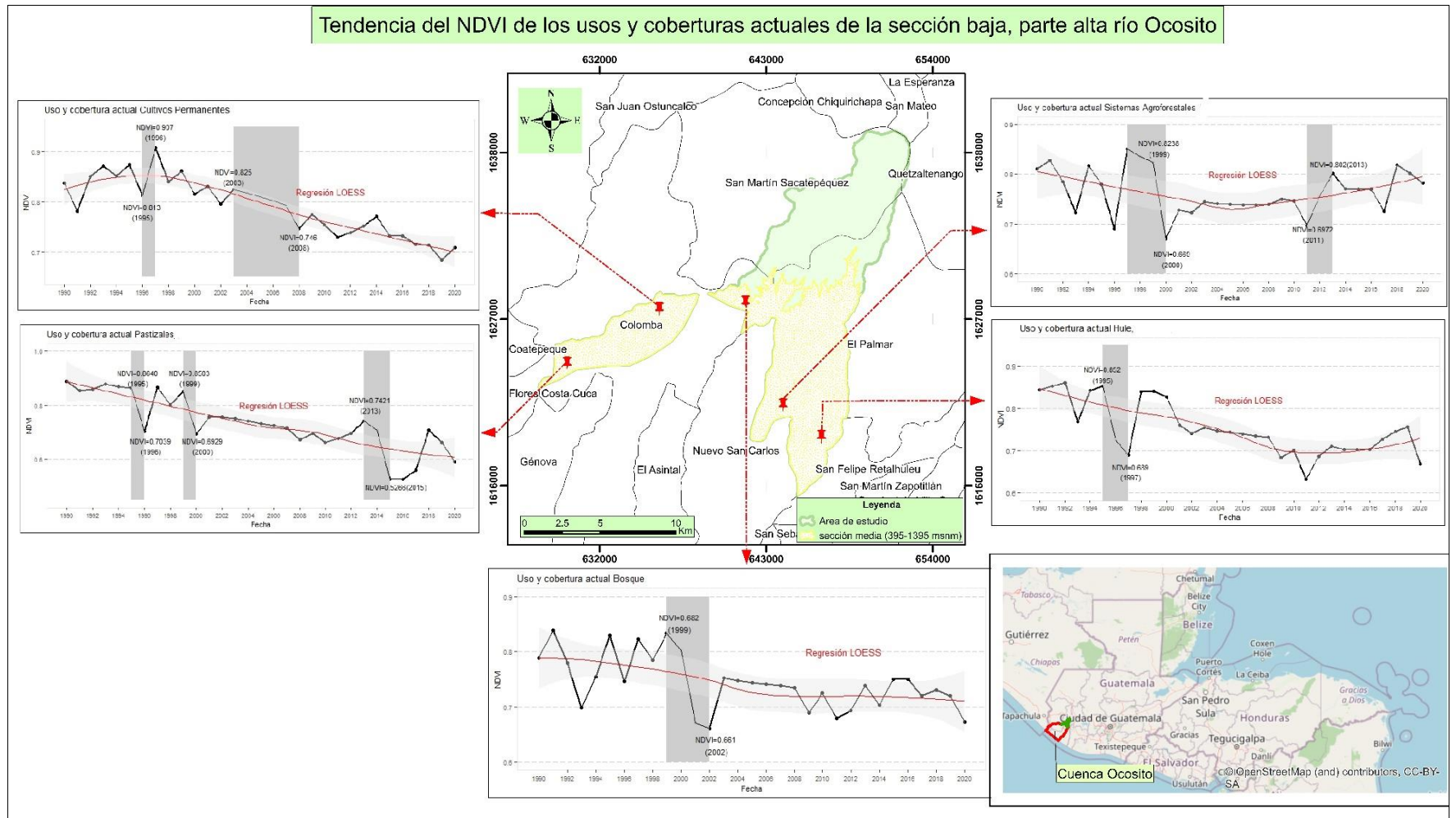
No.	Uso y cobertura	Autorregresivo	Diferencia	Media móvil	Dickey Fuller (p-value)	Ljung-Box (p-value)
1	Cultivos permanentes	2	1	2	0.01	0.65
2	Pastizales	1	1	2	0.01	0.77
3	Sistemas agroforestales	2	1	2	0.02	0.88
4	Hule	1	1	2	0.03	0.62
5	Bosque	2	1	1	0.04	0.74

El análisis de las series temporales muestra en la sección baja una disminución del NDVI en casi todas las clases de uso y cobertura. A diferencia de la clase de uso sistemas agroforestales, donde se observan dos momentos. El primer momento con valores de 0.82 a 0.66 (reducción 0.17) en los años 1997 al 2000 y el segundo, con valores de 0.70 a 0.80 (aumento 0.10) en los años 2011 al 2013. Sobre el pronóstico, se estima un valor constante de 0.78 para los próximos diez años. Muy similar se observa la tendencia de la clase de uso cultivos permanentes, con una disminución de 0.83 a 0.75 (reducción 0.08) para los años 2003 al 2008, sin embargo, se observa que para los próximos diez años los valores serán de 0.70 a 0.73 (aumento 0.03).

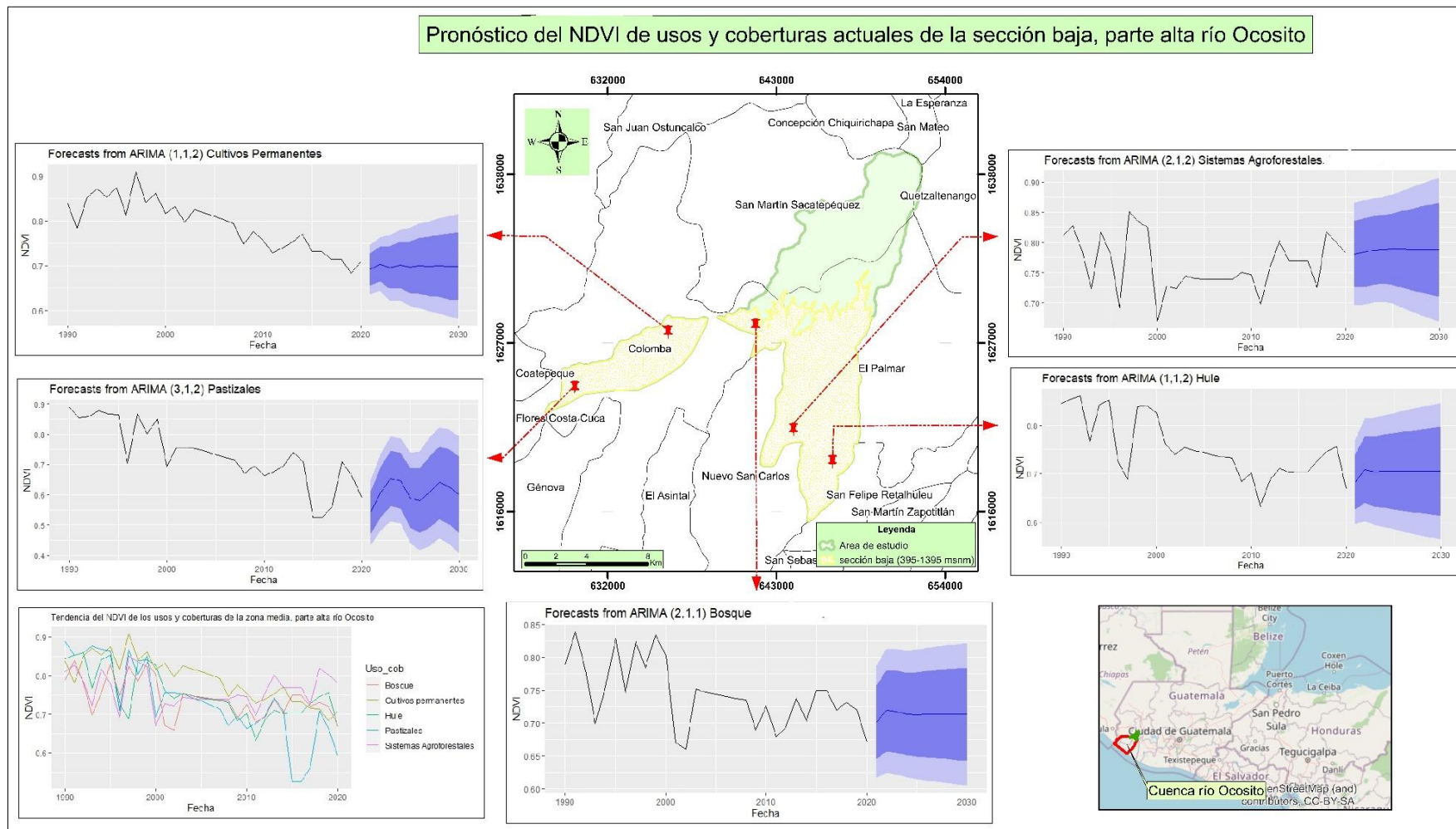
En cuanto a las clases de uso pastizales, hule y bosque, se observa una disminución del NDVI desde los años noventa. En la clase de uso pastizales, la tendencia muestra un primer momento con valores de 0.86 a 0.71 (reducción 0.15) en los años 1995 a 1996, y un segundo momento, con valores de 0.74 a 0.53 (reducción 0.21) en los años 2013 al 2015. Para el año 2020, el valor es de 0.60, lo que se traduce en una buena calidad, cantidad y desarrollo de la vegetación. En la clase de uso hule se observó una disminución importante con valores de 0.85 a 0.64 (reducción 0.21) en los años 1995 a 1997. Para el año 2020 el valor se reportó en 0.67.

En lo que respecta a la clase de uso bosque, se observa una disminución del NDVI de 0.68 a 0.66 (reducción 0.02) en los años 1999 al 2002. Para el año 2020 valor de NDVI correspondió a 0.67, equivalente a una cobertura medianamente densa. Cabe mencionar que al comparar las series de tiempo de las clases de uso bosque en la sección baja contra la sección alta, se observa una similitud en las series temporales, pues para el año 2020, el bosque en la parte baja reportó un valor de NDVI de 0.67 comparado con valores entre 0.7 a 0.75 en la sección alta.

Sobre el pronóstico para los próximos diez años en las clases de uso pastizales, hule y bosque de la sección baja, se observan comportamientos constantes, es decir, sin cambios de aumento o disminución del NDVI. Los resultados muestran que el valor de NDVI para la clase de uso pastizales será de 0.76 y 0.71 para hule y bosque.



**Figura 8.** Tendencia del NDVI de los usos y coberturas actuales de la sección baja, parte alta del río Ocosito



**Figura 9.** Pronósticos del NDVI de los usos y coberturas de la sección baja, parte alta de la cuenca del río Ocosito

### 3.2. Priorización de buenas prácticas de manejo de cuencas a través del sistema de optimización de inversiones (RIOS)

#### 3.2.1. Identificación de buenas prácticas de manejo de cuencas

Se identificaron 17 buenas prácticas de manejo de cuencas, distribuidas en ocho actividades de inversión estratégica. A continuación, se detallan las prácticas y los costos por hectárea por año.

**Cuadro 6.** Actividades de inversión estratégica y buenas prácticas de manejo de cuencas

No	Actividad de inversión estratégica	Detalle	Costo de la actividad (USD/ha/año)
1	Sistemas agroforestales	Siembra de café con sombra, mantenimiento por 5 años	1770.7
2	Prácticas agrícolas	Aplicación de broza	1379.7
		Control de malezas manual	
3	Prácticas de conservación de suelos	Barreras muertas	555.1
		Barreras vivas	
		Acequias	
		Cultivos de cobertura	
4	Educación ambiental	Charlas (temas ambientales)	290.5
		Capacitaciones (buenas prácticas agrícolas, protección de bosques, ambiente, sistemas agroforestales, conservación de suelos)	
		Spot radiales	
5	Protección de bosques comunales	Ingreso a programa de incentivos	601.8
6	Producción de abonos orgánicos	Gallinaza	211.8
		Compostaje	
7	Regeneración natural	Costos de restauración	143
8	Reforestación	Producción, transporte, plantación	238

Cabe destacar que la práctica aplicación de broza (hojarasca del bosque), que se incluye dentro de la línea de inversión de buenas prácticas agrícolas, actualmente es considerada una amenaza para la extinción de especies endémicas, ya que según el Plan Maestro de la Zona de Veda Definitiva del Volcán Chicabal del año 2016, reportó que las especies como las salamandras de los géneros *Pseudoeurycea* y *Oedipina* y las ranas del género *Craugastor*, son especies que viven debajo de la hojarasca y que al ser extraída se destruye el microhábit en el que viven (ASAECO y CONAP 2016).

Pese a este efecto negativo, se incluyó la práctica en la ejecución del modelo RIOS, con la finalidad de mostrar la importancia que tiene desde el campo cultural, pues lejos de percibir un efecto negativo, la población indígena del antiplano reconocen a los bosques como proveedores de leña, agua, madera o suministros de broza para sus cultivos, entre otros beneficios. Por lo tanto, es importante realizar investigación para conocer las propiedades de la broza en la agricultura, y con ello buscar alternativas que igualen o mejoren las características que los agricultores perciben, tales como: mayores rendimientos, mayor retención de humedad del suelo, menor cantidad de suelo erosionado, bajo costo y una relación con su cultura.

### 3.2.2. Ejecución de RIOS Investment Portafolio Adviser

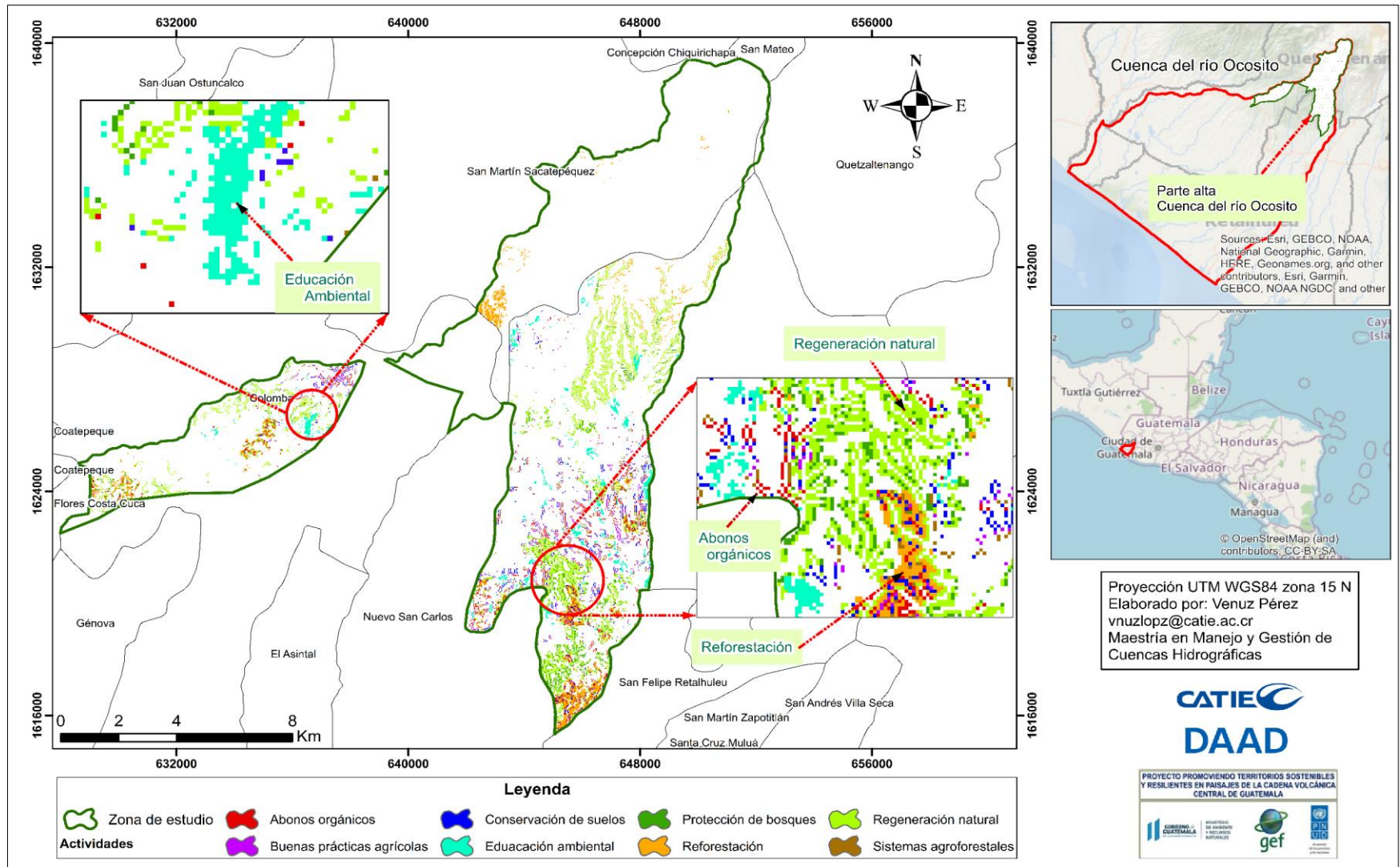
El resultado generado por el portafolio de inversión es un mapa de áreas priorizadas, basado en los insumos biofísicos, número de años a intervenir, presupuesto destinado por año y el costo de las actividades de inversión, descrito en el cuadro 2.

En la figura 11 se muestran las áreas priorizadas con ocho líneas de inversión, que a su vez representa un 11% del área de estudio. Los tipos de actividades, la distribución del presupuesto total equivalente a US\$618,046 para cuatro años de inversión, y el área priorizada, se detallan en el cuadro 7. Los resultados reportan 1,688.04 ha priorizadas, siendo la regeneración natural la actividad de inversión prioritaria con 660.2 ha (39.1%) a un costo de US\$92,708, seguidamente de la reforestación con 311.4 ha (18.4%) a un costo de US\$74,168.

**Cuadro 7.** Actividades priorizadas para la generación de servicios ecosistémicos hídricos en la parte alta de la cuenca del río Ocosito

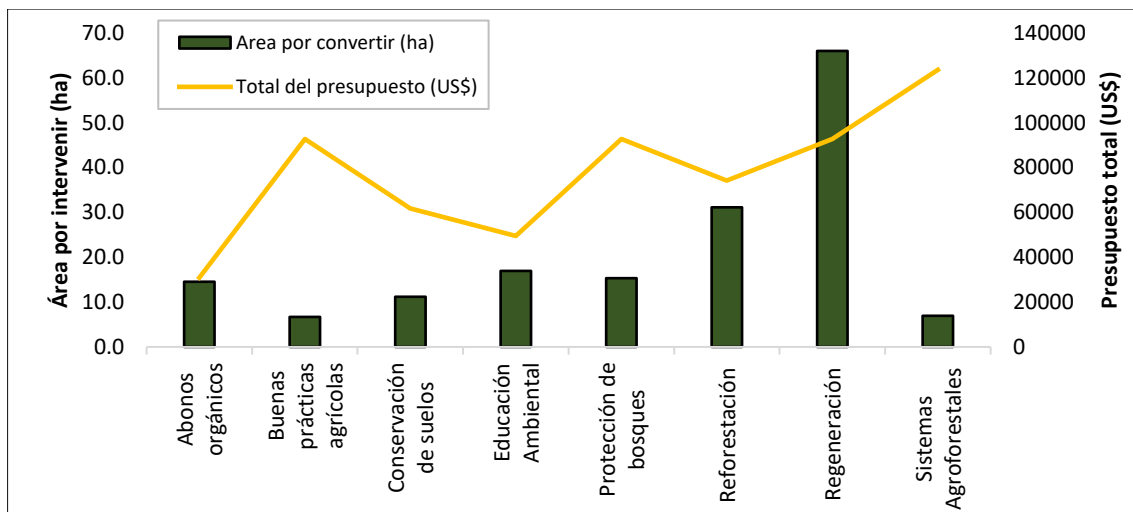
Tipo de actividad	Total presupuestado (\$)	Área por convertir (ha)	%
Abonos orgánicos	30900	145.4	8.6
Prácticas agrícolas	92708	67.0	4.0
Conservación de suelos	61804	111.6	6.6
Educación ambiental	49444	169.6	10.0
Protección de bosques	92708	153.4	9.1
Reforestación	74168	311.4	18.4
Regeneración	92708	660.2	39.1
Sistemas agroforestales	123608	69.48	4.1
<b>Total</b>	<b>618,048</b>	<b>1,688.04</b>	<b>100</b>





**Figura 10.** Áreas prioritarias para la implementación de buenas prácticas de manejo de cuencas en la parte alta de la cuenca del río Ocosito, Quetzaltenango, Guatemala

El presupuesto fue asignado principalmente a las actividades de inversión: sistemas agroforestales (\$123,609.15); regeneración natural (\$92,706.86); protección de bosques (\$92,706.86) y buenas prácticas agrícolas (\$92,706.86), no obstante, en la figura 12 se muestra que las principales actividades de inversión priorizadas, o las que mayor área reportan son la regeneración natural (660.2 ha), reforestación (311.4 ha) y educación ambiental (169.6 ha). Esto último corresponde a las que las actividades de inversión de menor costo, dando como resultado mayor área de intervención que contribuyan con la generación de los objetivos ecosistémicos propuestos.



**Figura 11.** Distribución de las actividades priorizadas en áreas y presupuesto para el área de estudio

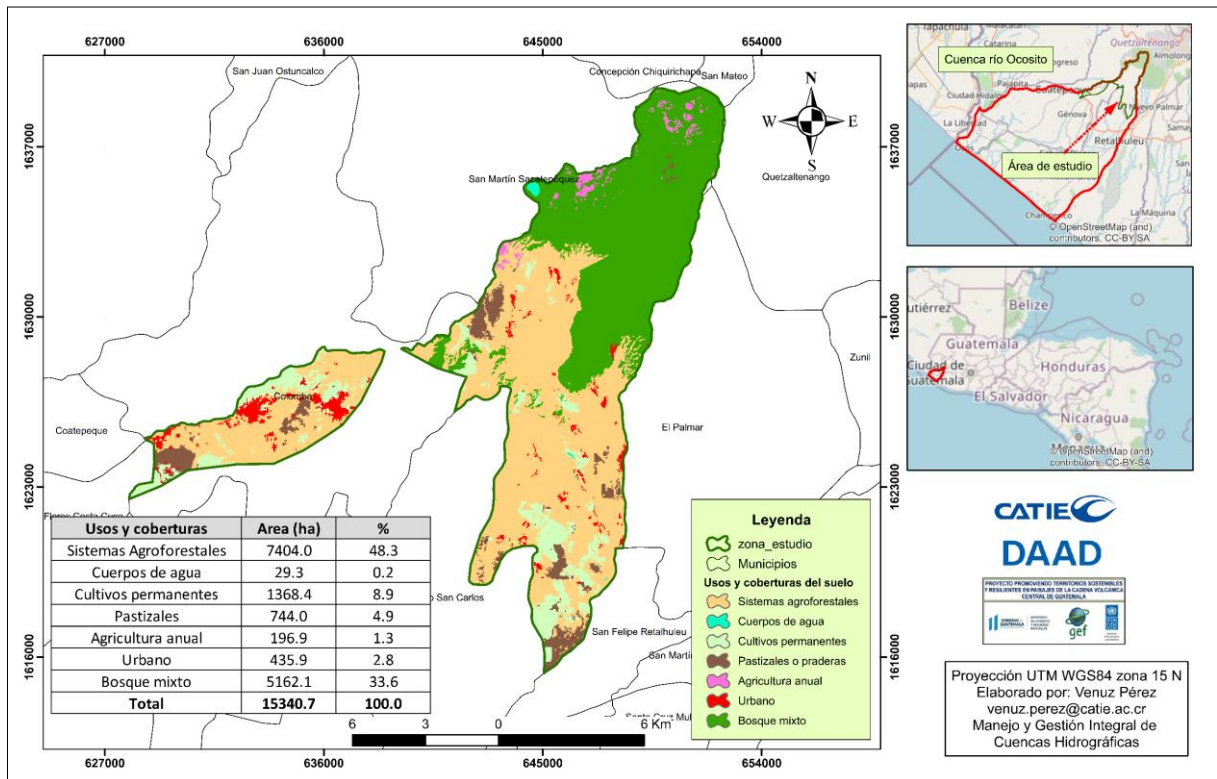
El modelo RIOS ha sido utilizado en otros estudios con objetivos similares a esta investigación, por ejemplo, en el marco del proyecto *WaterClima* se realizó la “Priorización de áreas para implementar buenas prácticas de manejo en cuencas costeras, los resultados reportaron la mayor cantidad de áreas priorizadas como regeneración natural (92%), sistemas silvopastoriles (2%) y sistemas agroforestales (0.88%) (Benegas *et al.* 2017). Otro caso se reporta en Costa Rica con el Fondo de Agua “Agua Tica”, donde se reportó la educación ambiental (26.9%) y la regeneración natural (26.4%) como actividades priorizadas (Guerrero *et al.* 2019). Los resultados demuestran que al igual que en este estudio, el modelo priorizó las actividades menos costosas y las que representan a las áreas con mayor potencial de degradación.

Los resultados del portafolio de inversión significan un punto de inicio, o bien, como línea base para evidenciar ante tomadores de decisiones y actores clave que la priorización promueve a largo plazo los mayores beneficios o servicios ecosistémicos, con los recursos económicos disponibles, Pues tal como lo expresa Guerrero *et al.* 2019; Zhang *et al.* 2010; Orme *et al.* 2005; (Krchnak 2007)), para mantener los servicios ecosistémicos para las futuras generaciones es necesario convencer a los creadores de políticas que al conservar los beneficios y servicios de los ecosistemas, se contribuye al desarrollo social y económico.

### 3.2.3. Ejecución de RIOS Portafolio Traductor

Los resultados de la ejecución de portafolio traductor fueron dos, el primero hace referencia al mapa base de uso y cobertura actual del suelo del año 2020 (Figura 13), y el segundo, al mapa de transición de restauración, agricultura y protección para un horizonte de 8 años (Figura 14).

El mapa de transición de restauración, agricultura y de protección muestra nuevos usos y coberturas si se implementa el portafolio de inversiones definidas por las buenas prácticas de manejo de cuencas, con los objetivos de promover los servicios ecosistémicos hídricos, para la reducción de la erosión del suelo para la calidad de agua potable y la mejora de la recarga de los acuíferos.



**Figura 12.** Mapa base del uso y cobertura del año 2020 de la parte alta de la cuenca del río Ocosito

Los cambios de uso y cobertura para un horizonte de ocho años se muestran en el cuadro 8, donde los usos como: cultivos permanentes, pastizales, agricultura anual y bosques mixtos reflejan los cambios más relevantes.

Los cultivos permanentes manifiestan un cambio de uso de 456.3 ha a suelos degradados (33.7%) si se mantienen la vegetación nativa en suelos desnudos. Quedando 898.4 ha de cultivos permanentes, que, a su vez, reflejan una disminución del 3% respecto al uso actual.

Respecto al área de pastizales, se prevé un cambio de uso a bosque mixto tropical/subtropical (45.3%) equivalente a 333.5 ha, agricultura mixta (9.2%) equivalente a 67.4 ha y bosques mixtos con agricultura y pastizales (4.8%) equivalente a 35.4 ha. Los tres cambios descritos anteriormente suman 59.3% respecto al área total de pastizales y representa una disminución del 3% respecto al uso actual.

En el área de bosque mixto habrá un cambio de 287.1 ha a bosques mixtos tropicales/subtropicales si se realizan actividades de restauración natural. Lo que representa en un 1.9% respecto al uso actual. Otros usos como los sistemas agroforestales (46.9%), cuerpos de agua (0.2%) y urbano (1.8%) no presentarían cambios significativos respecto al uso actual.

En el cuadro 7, se describen las actividades de transición de restauración, agricultura y de protección para ocho años, si se ejecuta el portafolio de inversión.

**Cuadro 8.** Áreas de actividades de transición de restauración, agricultura y protección para un horizonte de ocho años.

<b>Actividades</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>%</b>
Sistemas agroforestales	7189.7	46.9
Sistemas agroforestales con manejo de la vegetación agrícola y abonos orgánicos a sistemas agroforestales	73.3	0.5
Sistemas agroforestales con manejo de la vegetación agrícola y buenas prácticas agrícolas a sistemas agroforestales	44.4	0.3
Sistemas agroforestales con manejo de la vegetación agrícola y conservación de suelos a sistemas agroforestales	72.1	0.5
Sistemas agroforestales con manejo de la vegetación agrícola y Sistemas agroforestales a sistemas agroforestales	43.6	0.3
Sistemas agroforestales con manejo de fertilizantes y abonos orgánicos a sistemas agroforestales	0.4	0.0
Sistemas agroforestales con manejo de fertilizantes y buenas prácticas agrícolas a sistemas agroforestales	0.5	0.0
Sistemas agroforestales con manejo de fertilizantes y conservación de suelos agrícolas a bosque mixto con agricultura y pastizales	1.8	0.0
Sistemas agroforestales con manejo de fertilizantes y sistemas agroforestales a sistemas agroforestales	0.2	0.0
Sistemas agroforestales si se mantiene la vegetación nativa en suelos desnudos a degradados	13.4	0.1
Cuerpos de agua	26.1	0.2
Cuerpos de agua con manejo de la vegetación agrícola y educación ambiental a cuerpos de agua	2.4	0.0
Cuerpos de agua con manejo de pasturas y educación ambiental a cuerpos de agua	0.3	0.0
Cultivos permanentes	898.4	5.9
Cultivos permanentes si se mantiene la vegetación nativa en suelos desnudos a degradado	456.3	3.0
Pastizales	294.1	1.9
Pastizales con manejo de la vegetación agrícola y abonos orgánicos a agricultura templada mixta	5.9	0.0
Pastizales con manejo de la vegetación agrícola y buenas prácticas agrícolas a agricultura templada mixta	2.5	0.0
Pastizales con manejo de la vegetación agrícola y conservación de suelos a bosque mixto con agricultura y pastizales	1.1	0.0
Pastizales con manejo de la vegetación agrícola con sistemas agroforestales a bosque mixto con agricultura y pastizales	1.7	0.0
Pastizales con manejo de fertilizantes con abonos orgánicos a agricultura templada mixta	49.4	0.3
Pastizales con manejo de fertilizantes con buenas prácticas agrícolas a agricultura templada mixta	9.6	0.1
Pastizales con manejo de fertilizantes con conservación de suelos a bosque mixto con agricultura y pastizales	20.6	0.1
Pastizales con manejo de fertilizantes con sistemas agroforestales a bosque mixto con agricultura y pastizales	12.0	0.1

<b>Actividades</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>%</b>
Pastizales con revegetación asistida y protección de bosques a bosque mixto tropical o subtropical	6.9	0.0
Pastizales con revegetación asistida y reforestación a Bosque mixto tropical/subtropical	218.3	1.4
Pastizales con revegetación no asistida y protección de bosques a pastizales	5.8	0.0
Pastizales con revegetación no asistida y reforestación a bosque mixto tropical/subtropical	32.5	0.2
Pastizales con revegetación no asistida y regeneración natural a bosque mixto tropical o subtropical	75.7	0.5
Agricultura templada mixta	181.1	1.2
Agricultura templada mixta con revegetación asistida y reforestación a bosque mixto tropical o subtropical	0.8	0.0
Agricultura templada mixta con revegetación no asistida y reforestación a bosque mixto tropical o subtropical	6.7	0.0
Urbano	282.5	1.8
Urbano con manejo de pasturas y educación ambiental a urbano	144.2	0.9
Bosque mixto tropical o subtropical	4880.0	31.8
Bosque mixto tropical/subtropical con revegetación no asistida y reforestación a bosque mixto tropical o subtropical	287.1	1.9
<b>Total</b>	<b>15341</b>	<b>100.0</b>

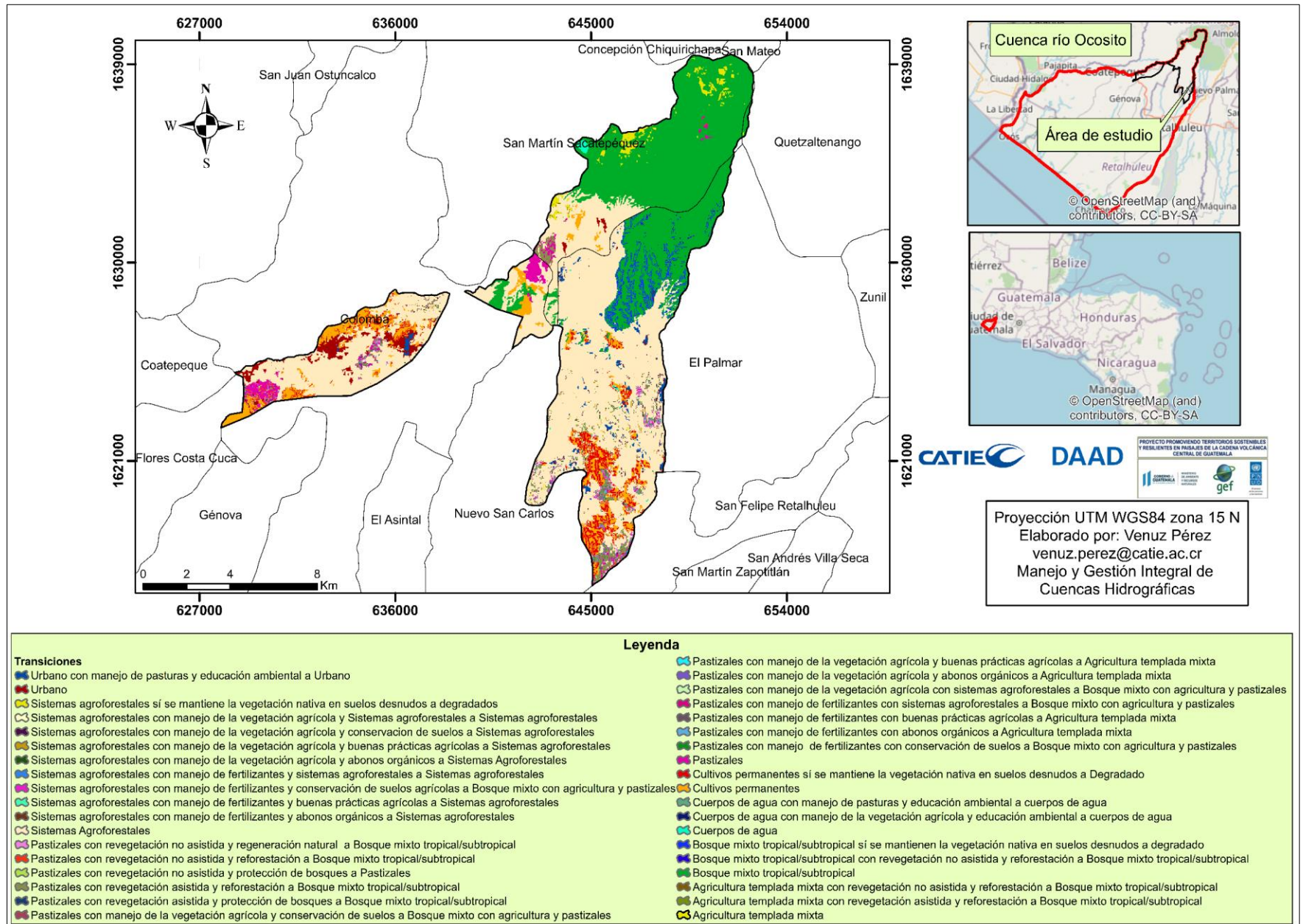


Figura 13. Mapa de transiciones de restauración, agricultura y de protección para un periodo de ocho años

Es vital reconocer que, para observar el escenario futuro, es fundamental que las áreas priorizadas sean validadas en campo, y con ello conocer su aptitud o potencial para implementar las prácticas citadas. En tal sentido, en otros estudios elaborados por Burbano *et al.* 2019; Guerrero *et al.* 2019; Benegas *et al.* 2017, indicaron la necesidad de ajustar los sitios priorizados en función del contexto de los posibles beneficiarios de los servicios ecosistémicos.

#### 4. CONCLUSIONES

- El análisis de NDVI para el área de estudio muestra una tendencia negativa generalizada, donde las áreas con clase de uso intensivo (agricultura) los valores de NDVI son significativamente más bajos (<0.6), respectos a los sistemas como bosques (>0.60). Por lo que, al analizar los diferentes usos del suelo, evidencian la vulnerabilidad actual de los sistemas agrícolas y forestales a ser degradadas.
- El análisis del comportamiento del NDVI permitió resaltar la importancia de la gestión y cogestión de las áreas protegidas, tal es el caso de la Zona de Veda del Volcán Chicabal y la Reserva Natural Privada de la Finca Comunitaria Loma Linda en que se resaltan tendencia estables desde la intervención.
- Del análisis de los resultados para la sección alta se conoce que el cambio más importante para los próximos diez años se observará en la ZDV del volcán siete Orejas en la clase de uso bosques con valores de 0.81 a 0.93 (aumento 0.12), equivalente a una vegetación muy densa. Sobre la parte media, las clases de uso agricultura, pastizales y sistemas agroforestales presentaron tendencias negativas con pronósticos constantes. En la parte baja, las clase de uso sistemas agroforestales, cultivos permanentes, bosque, pastizales y hule, todos mostraron tendencias negativas y pronósticos constantes, no obstante, el índice refleja vegetaciones densas, buena calidad, cantidad y desarrollo.
- En la planificación de manejo de la parte alta de la cuenca del río Ocosito, se identificaron 17 prácticas de manejo de cuencas, que contribuyen al control de erosión para la calidad del agua potable y la mejora de los acuíferos; las cuales se clasificaron en ocho líneas de inversión: sistemas agroforestales, buenas prácticas agrícolas, prácticas de conservación de suelos, educación ambiental, protección de bosques comunales, producción de abonos orgánicos, regeneración natural y reforestaciones.
- El portafolio de inversión prioriza un área de 1688.04 ha, equivalente a 11% del área total de estudio, distribuida en la sección baja con 1482 hectáreas (87.8%); sección media con 201.7 ha (11.9%) y sección alta con 3.8 hectáreas (0.22%), siendo las principales líneas de inversión: regeneración natural con 660.2 ha (39.1%) a un costo de US\$92,708 y la reforestación con 311.4 ha (18.4%) a un costo de US\$74,168. La priorización contribuye a las tendencias negativas del NDVI, que se observan, principalmente, a la sección media y baja del área de estudio.
- Respecto al escenario de ocupación generado por el portafolio traductor del modelo RIOS, indica que los principales cambios de uso y cobertura se observarán en los pastizales (60%), cultivos permanentes (34%) y bosques (5.5%).

## 5. RECOMENDACIONES

- Es necesario en continuidad de esta y futuras investigaciones, realizar correlaciones entre variables biofísicas, que expliquen las tendencias negativas y positivas del NDVI en los distintos usos y coberturas del suelo. Lo anterior se expone pues existen registros que muestran aumentos de precipitación en los años 1997, 1998, 2010 y 2011, incremento de 1.5°C de temperatura desde el año 1961 al 2015 y actividades ciclónicas en el período de 1998 al 2011 (Bardales *et al.* 2019), lo que permite inferir que existe una relación que debe ser analizada de manera específica con registros para el área de estudio.
- Sobre el análisis de series temporales, es importante recalcar la limitante temporal de la serie de datos analizada (31 años), ya que debido a la disponibilidad de la calidad de imágenes que se encontraron por el satélite Landsat, el período no permitió una base de datos más amplia. Sin embargo, aunque se logra identificar las tendencias en los diferentes usos y coberturas, es importante incluir en futuros estudios datos semestrales o mensuales, con el fin de mejorar las conclusiones obtenidas en este estudio y otros.
- En cuanto a las buenas prácticas identificadas para contribuir a la degradación de las tierras dentro del área de estudio, se recomienda promover la investigación en abonos orgánicos que permitan disminuir o eliminar la extracción de broza de los bosques (hojarasca de los árboles), pues se identificó como una práctica que amenaza a las especies de salamandras de los géneros *Pseudoeurycea* y *Oedipina* y las ranas del género *Craugastor*, ambas en peligro de extinción.
- Es necesario que las áreas priorizadas generadas por el modelo RIOS desde el traductor de inversión sean validadas en campo, a fin de reconocer su aptitud o potencial previo a la implementación de las líneas de inversión estratégica.

## 6. AGRADECIMIENTOS

A los actores locales (hombres y mujeres) de los municipios de Colomba, El Palmar y San Martín Sacatepéquez, por su esfuerzo en tiempo, y por la calidad de información compartida. ¡Gracias!



## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Abad, C; Mosquera, GQ. (2020). Entre el NDVI y las precipitaciones en zonas altoandinas del sur del Perú , en el periodo 2000 - 2020.
- ASAECO; CONAP. (2016). Plan Maestro de la Zona de Veda Definitiva Volcán Chicabal San Martín Sacatepéquez , Quetzaltenango. Documento técnico No. 04-2017 (en línea). Gua, s.e. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33527.32164>.
- ASOKARST; CUNOR. (2010). Evaluación del Potencial de Aguas Subterráneas de la República de Guatemala a Escala (1:250,000), Como Apoyo al Desarrollo del Riego para la Producción Agrícola en Comunidades de Pequeños y Medianos P. Ciudad de Guatemala, Guatemala (en línea). Guatemala4, s.e. Disponible en <https://isbn.cloud/9789929808805/evaluacion-del-potencial-de-aguas-subterraneas-de-la-republica-de-guatemala-a-escala-1250000-com/>.
- Bardales, W; Castañón, C; Herrera, J. (2019). Clima de Guatemala, tendencias observadas e índices de cambio climático (en línea). s.l., s.e. Disponible en <https://sgccc.org.gt/wp-content/uploads/2019/07/1RepCCGuaCap2.pdf>.
- Baskan, O; Dengiz, O; Demirag, İT. (2017). The land productivity dynamics trend as a tool for land degradation assessment in a dryland ecosystem. *Environmental Monitoring and Assessment* 189(5). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5909-3>.
- Benegas, L; Vilades, M; Ríos, N. (2014). Planificación basada en el servicio ecosistémico hídrico ante la vulnerabilidad al Cambio Climático en la región hidrológica del estero Jaltepeque, El Salvador (en línea). 2100. Costa Rica, s.e. Disponible en [http://201.207.189.89/bitstream/handle/11554/9300/Planificacion\\_basada\\_en\\_el\\_servicio\\_ecosistemico.pdf?sequence=4&isAllowed=y](http://201.207.189.89/bitstream/handle/11554/9300/Planificacion_basada_en_el_servicio_ecosistemico.pdf?sequence=4&isAllowed=y).
- Benegas, L; Watler, W; Ríos, N. (2017). Priorización de áreas para implementar buenas prácticas de manejo en cuencas costeras: un enfoque de optimización hidrológica y económica en función de los servicios ecosistémicos (en línea). s.l., s.e. 61 p. Disponible en [http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/8716/Priorizacion\\_de\\_areas\\_para\\_implementar\\_buenas.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/8716/Priorizacion_de_areas_para_implementar_buenas.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- Bonet, F. (2004). Caracterización de la dinámica Vegetal en el parque Natural de Sierra de Huétor (Granada, España) mediante el uso de SIG. s.l., Grupo de métodos cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia, Murcia, España. 141-153 p.
- Bremer, LL; Hamel, P; Ponette-González, AG; Pompeu, P V.; Saad, SI; Brauman, KA. (2020). Who Are we Measuring and Modeling for? Supporting Multilevel Decision-Making in Watershed Management (en línea). *Water Resources Research* 56(1):1-17. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019WR026011>.
- Burbano, Y; Watler, W; Sepúlveda, C; Benegas, L; Valera, V. (2019). Análisis de la vulnerabilidad a la disponibilidad del recurso hídrico en paisajes ganaderos de la microcuenca del río El tablón, en Chiapas, México (en línea). s.l., Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 87 p. Disponible en [http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/9194/Analisis\\_de\\_la\\_vulnerabilidad\\_a\\_la\\_disponibilidad.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/9194/Analisis_de_la_vulnerabilidad_a_la_disponibilidad.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- Cargua, F; Rodríguez, M; Romero, B; Santillan, P. (2018). Evaluación del estado de conservación del bosque de ceja andina sur occidental del Parque Nacional Sangay (Ecuador), para una mejor gestión del recurso forestal Evaluation the conservation state of the south-western flank Andean brow forest of the Sangay (en línea). *Espacios* 39:45. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/339/33944256008.pdf>.
- Castro, I. (2013). Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica en microcuenca de presa Madín, México Soil loss estimate by hydric erosion at Madin dam watershed, state of Mexico, Mexico (en línea). *Ingeniería Hidráulica Y Ambiental XXXIV(2):3-16*.

- Disponible en <http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v34n2/riha01213.pdf>.
- Chávez González, H; González Guillén, MDJ; Hernández de la Rosa, P. (2018). Metodologías para identificar áreas prioritarias para conservación de ecosistemas naturales (en línea). *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 6(27):8-23. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i27.277>.
- Chuvienco, E; Deshayes, M; Stach, N; Cocero, D; Riaño, D. (1999). Short-term fire risk: foliage moisture content estimation from satellite data. *Remote Sensing of Large Wildfires* :17-38. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-60164-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-60164-4_3).
- CONAP. (1989). Ley de áreas protegidas, Decreto número 4-89 (en línea). Disponible en <https://www.acnur.org/fileadmin/Documentos/BDL/2008/6696.pdf>.
- \_\_\_\_\_. (2020). Memoria de labores 2019, Consejo Nacional de Áreas Protegidas (en línea). s.l., s.e. Disponible en <https://conap.gob.gt/wp-content/uploads/2020/07/Memoria-de-Labores-CONAP-2019-final.pdf>.
- \_\_\_\_\_. (2021). Listado áreas protegidas SIGAP (en línea, sitio web). Disponible en <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:7fTm6ztl53QJ:https://conap.gob.gt/wp-content/uploads/2021/01/Listado-SIGAP-Pu%25CC%2581blico-Enero-2021.xlsx+&cd=2&hl=es-419&ct=clnk&gl=cr>.
- Cruz, DD; Curbelo, EA; Ferrer-Sánchez, Y; Ávila, DD. (2020). Spatial and temporal variations in Normalized Difference Vegetation Index in Cuba. *Ecosistemas* 29(1):1-12. DOI: <https://doi.org/10.7818/ECOS.1885>.
- Cruz Flores, DD; Curbelo Benítez, EA; Ferrer-Sánchez, Y; Ávila, DD. (2020). Spatial and temporal variations in Normalized Difference Vegetation Index in Cuba. *Ecosistemas* 29(1). DOI: <https://doi.org/10.7818/ECOS.1885>.
- Cuevas, M; Garrido, A; Pérez, J; Iura, D. (2009). Procesos de Cambio de uso de suelo y degradación de la vegetación natural (en línea). s.l., s.e. p. 8. Disponible en <https://micrositios.inecc.gob.mx/cuenca/diagnostico/20-cambio-uso-suelo.pdf>.
- Dagnachew, M; Dagnachew, M; Kebede, A; Moges, A; Abebe, A. (2020). Effects of Climate Variability on Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in the Gojeb River Catchment, Omo-Gibe Basin, Ethiopia. *Advances in Meteorology* 2020. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/8263246>.
- Dickey, D; Fuller, W. (1979). Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series with a Unit Root. *Journal of the American Statistical Association* :6. DOI: <https://doi.org/10.1080/01621459.1979.10482531>.
- Feeley, KJ; Gillespie, TW; Terborgh, JW. (2005). The utility of spectral indices from Landsat ETM+ for measuring the structure and composition of tropical dry forests. *Biotropica* 37(4):508-519. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2005.00069.x>.
- Gaitán, J.; Bran, D; Azcona, C. (2015). Tendencia del NDVI en el período 2000-2014 como indicador de la degradación de tierras en Argentina : ventajas y limitaciones (en línea). *AGRISCIENTIA* 32(2):83-93. Disponible en <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/agris/article/view/16559/16370>.
- Guerrero, M; Herrera, B; Carazo, F. (2019). Priorización de inversiones para la conservación del recurso hídrico en iniciativas público-privadas: el caso de Agua Tica, Costa Rica. Costa Rica, s.e.
- IARNA. 2008. Perfil Ambiental de Guatemala 2008-2009 (en línea). s.l., s.e. 343 p. Disponible en <https://www.url.edu.gt/publicacionesurl/FileCS.ashx?Id=41026>.
- IARNA; URL. (2015). Mapa de ecosistemas de Guatemala basado en el sistema de clasificación de zonas de vida [mapa digital]. Guatemala. (en línea). s.l., s.e. Disponible en <https://sie.url.edu.gt/capas-geograficas/>.
- IARNA; URL; Pérez, G. (2019). Ajustes y correcciones del mapa del Sistema Guatemalteco de Áreas Protegidas – SIGAP [mapa digital]. Guatemala. (en línea). s.l., s.e. Disponible en <https://sie.url.edu.gt/capas-geograficas/>.
- INE. (2018). Resultados CENSO 2018 Guatemala (en línea, sitio web). Disponible en <http://redatam.censopoblacion.gt/bingtm/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=CPVGT20>

- 18&lang=esp.
- Krchnak, K. (2007). Valoración de Cuencas como una Herramienta para la conservación de la biodiversidad -LEecc (en línea). s.l., s.e. Disponible en [https://pdf.usaid.gov/pdf\\_docs/Pnadi518.pdf](https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/Pnadi518.pdf).
- MARN. (2016). Informe Ambiental del Estado de Guatemala 2016 (en línea). Guatemala, s.e. 274 p. Disponible en <https://www.marn.gob.gt/Multimedios/8879.pdf>.
- MARN; PNUD. (2018). Promoviendo territorios sostenibles y resilientes en paisajes de la cadena volcánica central en Guatemala. :238.
- Millano, J; Paredes, F. (2016). Variabilidad de la Vegetación con el Índice de Diferencia Normalizada (NDVI) en Latinoamérica (en línea). *Novum Scientiarum* 2(4):33-44. Disponible en <http://www.ecoambienteydesarrollo.org/revista/ojs/index.php/novum/article/view/109>.
- Moraga, C. (2011). Mapping Model for Watershed Management (en línea). *Revista Geográfica de América Central* :39-72. Disponible en file:///C:/Users/Venuz/Downloads/5008-Texto del artículo-10529-1-10-20130429.pdf.
- Orme, CDL; Davies, RG; Burgess, M; Eigenbrod, F; Pickup, N; Olson, VA; Webster, AJ; Ding, T-S; Rasmussen, PC; Ridgely, RS; Stattersfield, AJ; Bennett, PM; Blackburn, TM; Gaston, KJ; Owens, IPF. (2005). Global hotspots of species richness are not congruent with endemism or threat (en línea). *Nature* 436(7053):1016-1019. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature03850>.
- Pacheco, FAL; Sanches Fernandes, LF; Valle Junior, RF; Valera, CA; Pissarra, TCT. (2018). Land degradation: Multiple environmental consequences and routes to neutrality (en línea). *Current Opinion in Environmental Science and Health* 5:79-86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.07.002>.
- Pérez, AL; Menes, MRM. (2015). Análisis Morfométrico E Índice De Vegetación (en línea). *Tecnología y ciencias del agua* VI(1):10-15. Disponible en [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222015000100007](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000100007).
- Pineda, M; Martinez-Casasnovas, J; Vilorio, J. (2016). Relación entre los cambios de cobertura vegetal y la ocurrencia de deslizamientos de tierra en la serranía del interiro (en línea). 41(March):190-198. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/339/33944256008.pdf>.
- Pôças, I; Calera, A; Campos, I; Cunha, M. (2020). Remote sensing for estimating and mapping single and basal crop coefficients: A review on spectral vegetation indices approaches (en línea). *Agricultural Water Management* 233(February):106081. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106081>.
- Pulido, J; Bocco, G. (2011). How is land degradation assessed? (en línea). *Interciencia* 2(36):96-103. Disponible en <https://www.interciencia.net/wp-content/uploads/2018/01/096-BOCCO-8.pdf>.
- Sánchez, L; Paz, F; Mota, J; Figueroa, B; Menez, M; Ortiz, C; Exebio, A. (2018). Corrector atmosférico en imágenes Landsat (en línea). *Terra Latinoamericana* :309-321. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.232>.
- SEGEPLAN. (2018). Plan de desarrollo Municipal y Ordenamiento Territorial El Palmar, Quetzaltenango 2018-2032. s.l., s.e. 124 p.
- \_\_\_\_\_. (2019). Plan de Desarrollo Municipal y Ordenamiento Territorial PDM-OT Colomba Costa Cuca, Quetzaltenango 2019 -2032. s.l., s.e. 112 p.
- \_\_\_\_\_. (2020). Plan de desarrollo municipal y ordenamiento territorial San Martín Sacatepéquez, Quetzaltenango 2020-2032. s.l., s.e. 112 p.
- Sharp, R; Tallis, HT; Ricketts, T; Guerry, AD; Wood, SA; Chaplin-Kramer, R; Nelson, E; Ennaanay, D; Wolny, S; Olwero, N; Vigerstol, K; Pennington, D; Mendoza, G; Aukema, J; Foster, J; Forrest, J; Cameron, D; Arkema, K; Lonsdorf, E; Kennedy, C; Verutes, G; Kim, CK; Guannel, G; Papenfus, M; Toft, J; Marsik, M; Bernhardt, J; Griffin, R; Glowinski, K; Chaumont, N; Perelman, A; Lacayo, M; Mandle, L; Hamel, P; Vogl, AL;

- Rogers, L; Bierbower, W; Denu, D; Douglass, J. (2018). InVEST 3.7.0.post22+ug.h3b687e57fad0 User's Guide. s.l., s.e.
- Sklenicka, P. (2016). Classification of farmland ownership fragmentation as a cause of land degradation: A review on typology, consequences, and remedies (en línea). *Land Use Policy* 57:694-701. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.06.032>.
- Torres, E; Linares, G; Tenorio, MG; Peña, R; Castelán, R; Rodríguez, A. (2014). Índices de vegetación y Uso de Suelo en la Región Terrestre Prioritaria 105: Cuetzalan, México (en línea). *Revista Iberoamericana de Ciencias* :12. Disponible en <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwib6s7FnuTYAhUOyGMKHTdHDAUQFgguMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.reibci.org%2Fpublicados%2F2014%2Fagosto%2F3300108.pdf&usg=AOvVaw1qHbLTgmsrMGQZ9PJC24tB>.
- Torrice, JM. (2018). América Latina avanza contra la degradación de la tierra (en línea, sitio web). Disponible en <http://www.ipsnews.net/2018/01/latin-america-makes-headway-land-degradation/>.
- UNCCD. (2013). Aspectos económicos de la desertificación, la degradación de las tierras y la sequía: Metodologías y análisis para la toma de decisiones. (en línea). s.l., s.e. 73 p. Disponible en <https://funcagua.org.gt/wp-content/uploads/2020/04/2013.-Aspectos-economicos-de-la-desertificacion-la-degradacion-de-las-tierras-y-la-sequia.-UNCCD.pdf>.
- Volgi, A; Tallis, H; Douglass, J; Sharp, R; Veiga, F; Benítez, S; León, J; Game, E; Petry, P; Guimarães, J; Sebastian, J. (2016). Sistema de Optimización de Inversiones en Recursos (RIOS): Guía paso a paso (en línea). s.l., s.e. Disponible en <https://docplayer.es/29113182-Sistema-de-optimizacion-de-inversiones-en-recursos-rios.html>.
- Zhang, X; Wu, B; Ling, F; Zeng, Y; Yan, N; Yuan, C. (2010). Identification of priority areas for controlling soil erosion (en línea). *Catena* 83(1):76-86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.06.012>.
- Zhao, A; Zhang, A; Liu, X; Cao, S. (2018). Spatiotemporal changes of normalized difference vegetation index (NDVI) and response to climate extremes and ecological restoration in the Loess Plateau, China. *Theoretical and Applied Climatology* 132(1-2):555-567. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2107-8>.

## 8. ANEXOS

### Anexo 1. Script para el análisis de series temporales.

```
##### SERIES TEMPORALES - NDVI #####
```

#### # 1. INSTALAR Y ACTIVAR PAQUETES

```
suppressMessages(library(xts))
library(zoo)
library(lattice)
library(astsa)
library(sp)
library(raster)
library(readxl)
library(ggplot2)
require(tseries)
library(tidyverse)
library(foreign)
library(quantmod)
library(lubridate)
library(tsm)
```

#### #2. DIRECTORIO DE TRABAJO

```
getwd()
setwd("D:/NDVI/Puntos_muestreo/ndvi_uso")
```

#### #3 CARGAR LA BASE DE DATOS

```
ndvi.z1 <- read.csv("./NDVI_ZONA1.csv")
class(ndvi.z1)
str(ndvi.z1)
attach(ndvi.z1) # para evitar utilizar $ al seleccionar las columnas
names(ndvi.z1)
```

#### # PLOT - GRAFICOS GENERALES

```
names(ndvi.z1)
attach(ndvi.z1)
Fecha <- ndvi.z1[,1] # el número indica el número de columna

par(mar=c(2.5,2.5,1.5,0.3), mgp=c(1.2,0.2,0), tck=-0.02)
plot(NDV_Parte_alta,
     type="l", lwd=1, xaxt="n", ylim=c(0.1,1), xlab="Fecha",
     ylab="NDVI", main="NDVI - Parte Alta, zona de estudio")
# xaxt="n" quita los valores de x en la grafica
axis(1, at=1:length(Fecha), labels=Fecha) # agregar las fechas de 1990 a 2020
lines(NDVI_Agricultura_Alta, col="green", type="l", lwd=1.5)
lines(ndvi.z1$Agricultura_P_concepcion, col="purple", type="l", lwd=0.5)
lines(ndvi.z1$Agricultura_P_SaqbÃ., col="orange", type="l", lwd=1.5)
lines(ndvi.z1$Bosque_Loma_linda, col="yellow", type="l", lwd=1.5)
lines(ndvi.z1`Bosque_p_concepciÃ³n`, col="red", type="l", lwd=1.5)
lines(ndvi.z1$Bosque_p_SaqbÃ., col="gray", type="l", lwd=1.5)
lines(ndvi.z1$Bosque_v_Chicabal, col="black", type="l", lwd=1.5)
lines(ndvi.z1$Bosque_siete_orejas, col="navy", type="l", lwd=1.5)
lines(ndvi.z1$Bosque_alto, col="blue", type="l", lwd=1.5)
```

```

legend("topright", legend=c("Agricultura alta", "Agricultura Parque Concepción C.", "Agricultura
Parque Saqbé", "Bosque Loma Linda", "Bosque Parque Concepción C.", "Bosque Parque
Saqbé", "Bosque zona de veda V. Chicabal", "Bosque zona de veda v. Siete orejas", "Bosque
alto"),
      lty=0.8, lwd=0.5, pch=20,
      col=c("green", "purple", "orange", "yellow", "red", "gray", "black", "navy", "blue"),
      ncol=2, bty="n", cex=0.5, text.col=c("green", "purple", "orange",
"yellow", "red", "gray", "black", "navy", "blue"),
      inset=0.04, title.adj=300, size=1, xpd = TRUE)
grid()

```

##### TENDENCIA NDVI BOSQUE LOMA LINDA #####

```

#####ggplot2
require(gridExtra)
g <- ggplot(ndvi.z1, aes(x=Fecha, y=Bosque_Loma_linda))
g + geom_line(size=1) +
  geom_point(size=1.5) +
  geom_rect(data=ndvi.z1, mapping=aes(xmin=as.Date.numeric(1991),
                                     xmax=as.Date.numeric(1993),
                                     ymin=0.4,
                                     ymax=1), fill="gray79", alpha=0.1) +
  geom_rect(data=ndvi.z1, mapping=aes(xmin=as.Date.numeric(1995),
                                     xmax=as.Date.numeric(1999),
                                     ymin=0.4,
                                     ymax=1), fill="gray79", alpha=0.1) +
  geom_line(data=ndvi.z1, mapping=aes(x=Fecha, y=Bosque_Loma_linda), color="black",
            size=0.5) +
  geom_smooth(method="loess", colour="red", fill="gray90", lty=1, lwd=0.5) +
  labs(title="Uso y cobertura actual Bosque Reserva Natural Privada Finca Comunitaria Loma
Linda", x="", y="NDVI") +
  scale_x_continuous(name="Fecha", breaks=seq(from=1990, to=2020, by=2)) +
  coord_cartesian(expand=T, ylim=c(0.4, 1)) +
  theme(panel.background=element_rect(fill=NA, colour="gray90"),
        panel.grid.major.y=element_line(color="gray80", linetype=5),
        panel.grid.minor.y=element_blank(),
        text=element_text(family="Times New Roman", color="black", size=9)) +
  annotate("text", x=1991.9, y=0.85, label="NDVI=0.802\n(1991)", size=3) +
  annotate("text", x=1993.5, y=0.55, label="NDVI=0.638\n(1993)", size=3) +
  annotate("text", x=1995.7, y=0.80, label="NDVI=0.7180\n(1995)", size=3) +
  annotate("text", x=1999.2, y=0.55, label="NDVI=0.610\n(1999)", size=3) +
  theme(text = element_text(size=8.5)) +
  annotate("text", x=2011.5, y=0.78, label="Regresión LOESS", col="red",
        size=3.5)

```

#####ANALISIS DE SERIES TEMPORALES DE LOS NVDI#####

```

# LIBRERIAS Y PAQUETES
require(trend)
require(utf8)
require(lubridate)
library(tidyverse)
library(astsa)
library(xts)
require(tseries)

```

```

require(vars)
library(foreign)
library(TTR)
require(dynlm)
require(mFilter)
require(timsac)
require(forecast)

#-----
# CREAR LA SERIE DE TIEMPO
head(ndvi.z1)
ndvi.z1$Fecha <- NULL
ndvi.z1$Column1 <- NULL
st.ndvi.z1 <- ts(ndvi.z1[,1:17],
                start = c(1990),
                end = c(2020),
                frequency = 1)

st.ndvi.z1
class(st.ndvi.z1)
plot.ts(st.ndvi.z1[,6],
        xlim=c(1990, 2020),
        ylab="NDVI",
        main="Serie temporal, NVDI-Bosque, Reserva Privada Comunitaria Loma Linda")
grid()

#-----
##### APLICAR EL MODELO ARIMA #####
## ARIMA - ESTACIONARIEDAD DE LOS USOS Y COBERTURA - PARTE ALTA

# 1. Prueba de Dickey-Fuller para ver si existe estacionariedad en la serie de nuestros datos
(>0.05 no es estacionaria, <0.05 es estacionaria).
# 2. Se incluye la prueba de ruido blanco con Ljung Box. Ruido blanco significa para saber si
nuestro modelo está bien ajustado. El Ruido blanco significa que la media del error es igual a
cero, tiene varianza constante en el error y no están serialmente correlacionadas el error
(>0.05 hay ruido blanco, <0.05 no hay ruido blanco).

# Datos de serie temporal
ndvi.z1 # datos originales
st.ndvi.z1 # datos originales convertidos a series de tiempo

##### NDVI_Bosque, Reserva Natural Privada Finca Comunitaria Loma Linda -
estacionariedad #####
# Prueba de estacionariedad aplicando logaritmo
stlog.ndvi.z1.BLL <- log(st.ndvi.z1[,6]) # Bosque loma linda (BLL)
stlog.ndvi.z1.BLL
plot(stlog.ndvi.z1.BLL) # con logaritmo - prueba de la estacionariedad al BLL
# prueba de Dickey Fuller por logaritmo
adf.test(stlog.ndvi.z1.BLL,
         alternative="stationary")

# Prueba de estacionariedad aplicando una (1) diferencia
stdiff.ndvi.z1.BLL1 <- diff(st.ndvi.z1[,6]) # primera diferencia

```

```

plot(stddiff.ndvi.z1.BLL1) # se ve estacionariedad - los datos están a lo largo de una misma
media
# Prueba de Dickey Fuller por 1 diferencia
adf.test(stddiff.ndvi.z1.BLL1) # el p-value es mayor a 0.05 no es estacionario aplicando una
diferencia

# plot la estacionariedad con unas diferencias
plot(stddiff.ndvi.z1.BLL1,
      type="o", lty="dashed", col="black", ylab="stdiff=1",
      xlab="Fecha", main="Serie Estacionaria - NDVI Bosque, Reserva Natural Privada Finca
Comunitaria Loma Linda", cex.main=1)
abline(h=0, col="red")
mtext("Dickey-Fuller = -3.809, Lag order = 3, p-value = 0.03355",
      cex=0.9, font=3, col="blue")

#-----
##### MEDIAS MOVILES Y AUTORREGRESIVOS AL MODELO #####
# Función de auto-correlación (ACF) y auto-correlación parcial (PACF), para conocer cuántas
medias móviles y autorregresivos vamos a utilizar en el modelo de predicción ARIMA

ar(mfrow=c(1,2), mar=c(4,4,4,2))
acf(ts(stddiff.ndvi.z1.BLL1, frequency=1), main="NDVI Bosque, Reserva
Natural Privada Comunitaria Loma Linda (2 MM)")
# dos (2) media móvil, que son los 2 rezagos que salen de la línea azul
pacf(ts(stddiff.ndvi.z1.BLL1, frequency=1), main="Series (2 Autorregresivo)")
# dos (2) autorregresivos

#-----
## Aplicar del modelo ARIMA - PRONOSTICO 10 AÑOS

##### MODELO - NDVI_BOSQUE LOMA LINDA- ARIMA #####
# order=c(2,1,2) = 2 autorregresivos, 1 diferencias, y 2 media movil
mod.arima.BLL <- arima(st.ndvi.z1[,6], # dato de serie de tiempo original
                      order=c(2,1,2)) # NDVI_Bosque Loma Linda
mod.arima.BLL

# Diagnosticar el MODELO - NDVI_Bosque Loma Linda - ARIMA
par(mar=c(3,4,2.67,1))
tsdiag(mod.arima.BLL) # los errores estandarizados deben parecerse al ruido blanco

# PRUEBA DE RUIDO BLANCO AL MODELO - NDVI_Bosque Loma Linda - ARIMA
# p-value es mayor a 0.05 si hay ruido blanco. Significa que nuestro modelo se ajusta bien
# prueba de ruido blanco a traves del estadístico Box.test()
Box.test(residuals(mod.arima.BLL),
         type="Ljung-Box") # me dice que el valor es mayor a 0.05 lo cual significa que existe
ruido blanco - el modelo se ajusta bien, es decir, que el error tiene media igual a cero

# Calcular el error del modelo, para ver si tiene media=0
error.mod.arima.BLL<-residuals(mod.arima.BLL)
mean(error.mod.arima.BLL)
dev.off()
plot(error.mod.arima.BLL)
abline(h=0, col="red")

```



```
# PRONOSTICO DEL MODELO NDVI_Bosque Loma Linda a 10 años
pronost.BLL <- forecast::forecast(mod.arima.BLL, h=10)
pronost.BLL # ver los datos con el límite inferior y superior del nivel de confianza

autoplot(pronost.BLL, xlab="Fecha", ylab="NDVI", main= "Forecasts from ARIMA (2,1,2)
           Bosque Reserva Natural Privada Comunitaria Loma Linda")
checkresiduals(mod.arima.BLL) # otra manera de ver los residuos del modelo
```

**Anexo 2:** Pronósticos de NDVI para los próximos diez años en los diferentes usos y coberturas en el área de estudio, parte alta del río Ocosito.

Agricultura anual, sección alta

	Lo 80	Hi 80	Lo 95	Hi 95
2021	0.4845819	0.37858094	0.5905829	0.32246742
2022	0.4510486	0.32256037	0.5795369	0.25454279
2023	0.5405678	0.39058451	0.6905510	0.31118816
2024	0.5322672	0.32588690	0.7386475	0.21663578
2025	0.5193176	0.26980436	0.7688308	0.13772003
2026	0.5696688	0.27775388	0.8615838	0.12322344
2027	0.5761451	0.22478039	0.9275097	0.03877917
2028	0.5753160	0.16653266	0.9840993	-0.04986417
2029	0.6064786	0.13948226	1.0734750	-0.10773068
2030	0.6183231	0.08365404	1.1529922	-0.19938269

Agricultura anual, Parque Regional Municipal Concepción Chiquirichapa

	Lo 80	Hi 80	Lo 95	Hi 95
2021	0.6016761	0.4654451	0.7379072	0.3933288
2022	0.6530291	0.5023521	0.8037060	0.4225886
2023	0.6255773	0.4335689	0.8175858	0.3319258
2024	0.6450384	0.4287819	0.8612948	0.3143027
2025	0.6362445	0.3857975	0.8866915	0.2532189
2026	0.6441392	0.3632188	0.9250596	0.2145085
2027	0.6418503	0.3254142	0.9582865	0.1579030
2028	0.6454450	0.2928322	0.9980577	0.1061703
2029	0.6453165	0.2527399	1.0378931	0.0449224
2030	0.6472088	0.2122253	1.0821924	-0.0180411

Agricultura anual, Parque Regional Municipal Saqbé, Quetzaltenango

	Lo 80	Hi 80	Lo 95	Hi 95
2021	0.6915934	0.6138799	0.7693069	0.5727409
2022	0.6987817	0.6155258	0.7820376	0.5714528
2023	0.7100246	0.6192162	0.8008330	0.5711451
2024	0.7162195	0.6136539	0.8187851	0.5593590
2025	0.7228593	0.6080062	0.8377124	0.5472066
2026	0.7300212	0.6020425	0.8579999	0.5342947
2027	0.7370337	0.5948396	0.8792279	0.5195665
2028	0.7440113	0.5867118	0.9013108	0.5034424
2029	0.7510131	0.5778096	0.9242167	0.4861212
2030	0.7580147	0.5681497	0.9478797	0.4676413

Bosque mixto, Finca comunitaria Loma Linda

	Lo 80	Hi 80	Lo 95	Hi 95
2021	0.7467930	0.6814478	0.8121383	0.6468561
2022	0.7686298	0.6968128	0.8404468	0.6587951
2023	0.7484008	0.6750482	0.8217533	0.6362177
2024	0.7617723	0.6760165	0.8475281	0.6306202
2025	0.7551405	0.6674105	0.8428706	0.6209691

2026 0.7571581 0.6626736 0.8516425 0.6126566 0.9016596  
2027 0.7575207 0.6592030 0.8558385 0.6071567 0.9078848  
2028 0.7563635 0.6537613 0.8589658 0.5994470 0.9132801  
2029 0.7574661 0.6505573 0.8643748 0.5939633 0.9209689  
2030 0.7567247 0.6460903 0.8673592 0.5875239 0.9259255

Bosque mixto, sección alta

Pronóstico puntual Lo 80 Hi 80 Lo 95 Hi 95  
2021 0.7501391 0.6966459 0.8036324 0.6683282 0.8319500  
2022 0.7450183 0.6886796 0.8013570 0.6588557 0.8311809  
2023 0.7423837 0.6847751 0.7999923 0.6542790 0.8304884  
2024 0.7410554 0.6829061 0.7992046 0.6521238 0.8299870  
2025 0.7402460 0.6817206 0.7987713 0.6507392 0.8297527  
2026 0.7396651 0.6807948 0.7985353 0.6496307 0.8296994  
2027 0.7391808 0.6799357 0.7984259 0.6485733 0.8297883  
2028 0.7387381 0.6790613 0.7984149 0.6474703 0.8300059  
2029 0.7383131 0.6781332 0.7984930 0.6462759 0.8303503  
2030 0.7378957 0.6771331 0.7986583 0.6449673 0.8308241

Bosque mixto, Parque Regional Municipal Saqbé

Pronóstico puntual Lo 80 Hi 80 Lo 95 Hi 95  
2021 0.6126761 0.4885821 0.7367702 0.4228906 0.8024616  
2022 0.6108221 0.4781256 0.7435185 0.4078804 0.8137638  
2023 0.6155615 0.4801643 0.7509586 0.4084894 0.8226336  
2024 0.6176032 0.4751371 0.7600693 0.3997201 0.8354863  
2025 0.6167834 0.4637447 0.7698222 0.3827309 0.8508360  
2026 0.6159022 0.4535660 0.7782385 0.3676304 0.8641741  
2027 0.6158799 0.4460016 0.7857582 0.3560735 0.8756863  
2028 0.6161434 0.4392508 0.7930360 0.3456095 0.8866772  
2029 0.6162321 0.4323144 0.8001498 0.3349542 0.8975099  
2030 0.6161788 0.4253499 0.8070077 0.3243312 0.9080264

Bosque mixto, Parque Regional Municipal Concepción Chiquirichapa

Pronóstico puntual Lo 80 Hi 80 Lo 95 Hi 95  
2021 0.6938953 0.6008747 0.7869158 0.5516326 0.8361579  
2022 0.6943355 0.5982562 0.7904148 0.5473948 0.8412761  
2023 0.6943292 0.5950400 0.7936183 0.5424795 0.8461788  
2024 0.6943292 0.5919343 0.7967242 0.5377297 0.8509288  
2025 0.6943292 0.5889200 0.7997385 0.5331197 0.8555388  
2026 0.6943292 0.5859894 0.8026690 0.5286378 0.8600207  
2027 0.6943292 0.5831361 0.8055224 0.5242741 0.8643844  
2028 0.6943292 0.5803542 0.8083043 0.5200195 0.8686390  
2029 0.6943292 0.5776386 0.8110199 0.5158663 0.8727921  
2030 0.6943292 0.5749848 0.8136737 0.5118077 0.8768508

Bosque mixto, Zona de veda del volcán Siete Orejas

Pronóstico puntual Lo 80 Hi 80 Lo 95 Hi 95  
2021 0.8140316 0.7392525 0.8888108 0.6996668 0.9283965  
2022 0.8220922 0.7373485 0.9068360 0.6924878 0.9516966

2023	0.8289624	0.7418240	0.9161008	0.6956957	0.9622291
2024	0.8489948	0.7454861	0.9525036	0.6906919	1.0072978
2025	0.8657372	0.7426594	0.9888150	0.6775059	1.0539685
2026	0.8762947	0.7416069	1.0109825	0.6703075	1.0822819
2027	0.8904950	0.7417489	1.0392411	0.6630075	1.1179825
2028	0.9069740	0.7391191	1.0748290	0.6502620	1.1636861
2029	0.9207871	0.7350517	1.1065224	0.6367293	1.2048448
2030	0.9341566	0.7312406	1.1370726	0.6238233	1.2444899

#### Bosque mixto, Zona de veda definitiva volcán Chicabal

##### Pronóstico puntual Lo 80 Hi 80 Lo 95 Hi 95

2021	0.7304837	0.6791650	0.7818023	0.6519986	0.8089687
2022	0.7502256	0.6937216	0.8067296	0.6638102	0.8366410
2023	0.7692749	0.6999101	0.8386397	0.6631906	0.8753592
2024	0.7527168	0.6780464	0.8273872	0.6385183	0.8669153
2025	0.7295495	0.6446780	0.8144210	0.5997497	0.8593492
2026	0.7471197	0.6544865	0.8397530	0.6054494	0.8887901
2027	0.7670421	0.6671637	0.8669205	0.6142913	0.9197929
2028	0.7485398	0.6426009	0.8544788	0.5865203	0.9105594
2029	0.7271688	0.6133766	0.8409609	0.5531386	0.9011989
2030	0.7449500	0.6235982	0.8663019	0.5593584	0.9305417

#### Agricultura anual, sección media

##### Pronóstico puntual Lo 80 Hi 80 Lo 95 Hi 95

2021	0.6766241	0.6107894	0.7424588	0.5759386	0.7773095
2022	0.7261422	0.6536573	0.7986271	0.6152861	0.8369983
2023	0.6897273	0.6129595	0.7664951	0.5723211	0.8071335
2024	0.7172461	0.6369206	0.7975717	0.5943988	0.8400935
2025	0.6777616	0.5831592	0.7723639	0.5330798	0.8224434
2026	0.7074619	0.6083320	0.8065918	0.5558558	0.8590680
2027	0.6790580	0.5734922	0.7846237	0.5176091	0.8405068
2028	0.6975629	0.5871304	0.8079955	0.5286709	0.8664550
2029	0.6720012	0.5527163	0.7912860	0.4895708	0.8544316
2030	0.6894812	0.5654737	0.8134887	0.4998281	0.8791343

#### Bosque mixto, sección Baja

##### Pronóstico puntual Lo 80 Hi 80 Lo 95 Hi 95

2021	0.7019606	0.6461231	0.7577980	0.6165646	0.7873565
2022	0.7195611	0.6577277	0.7813946	0.6249950	0.8141273
2023	0.7178314	0.6555275	0.7801354	0.6225458	0.8131171
2024	0.7137585	0.6508191	0.7766978	0.6175011	0.8100159
2025	0.7130888	0.6487900	0.7773876	0.6147522	0.8114254
2026	0.7137615	0.6479657	0.7795573	0.6131355	0.8143875
2027	0.7140695	0.6469462	0.7811928	0.6114133	0.8167257
2028	0.7140082	0.6456475	0.7823689	0.6094595	0.8185569
2029	0.7139291	0.6443429	0.7835153	0.6075061	0.8203521
2030	0.7139218	0.6431160	0.7847277	0.6056336	0.8222100

## Pastizales, sección media

Pronóstico puntual Lo 80 Hi 80 Lo 95 Hi 95

2021	0.6832115	0.6403509	0.7260721	0.6176618	0.7487611
2022	0.6826204	0.6397805	0.7254602	0.6171025	0.7481383
2023	0.6826252	0.6398246	0.7254259	0.6171672	0.7480832
2024	0.6826852	0.6397684	0.7256020	0.6170497	0.7483207
2025	0.6827350	0.6392663	0.7262037	0.6162554	0.7492146
2026	0.6827710	0.6382781	0.7272640	0.6147250	0.7508171
2027	0.6827965	0.6368906	0.7287024	0.6125895	0.7530035
2028	0.6828144	0.6352184	0.7304105	0.6100226	0.7556063
2029	0.6828271	0.6333639	0.7322903	0.6071796	0.7584745
2030	0.6828359	0.6314057	0.7342662	0.6041801	0.7614918

## Sistemas agroforestales, sección media

2021	0.7785064	0.7347791	0.8222336	0.7116313	0.8453814
2022	0.7784492	0.7296172	0.8272811	0.7037672	0.8531312
2023	0.7784487	0.7250640	0.8318335	0.6968038	0.8600937
2024	0.7784487	0.7208705	0.8360270	0.6903905	0.8665070
2025	0.7784487	0.7169624	0.8399351	0.6844135	0.8724840
2026	0.7784487	0.7132883	0.8436092	0.6787944	0.8781031
2027	0.7784487	0.7098105	0.8470870	0.6734756	0.8834219
2028	0.7784487	0.7065007	0.8503968	0.6684137	0.8884838
2029	0.7784487	0.7033365	0.8535610	0.6635745	0.8933230
2030	0.7784487	0.7003004	0.8565971	0.6589312	0.8979663

## Sistemas agroforestales, sección baja

Pronóstico puntual Lo 80 Hi 80 Lo 95 Hi 95

2021	0.7806106	0.7251500	0.8360711	0.6957909	0.8654302
2022	0.7834841	0.7266735	0.8402947	0.6965998	0.8703684
2023	0.7866529	0.7298474	0.8434585	0.6997763	0.8735296
2024	0.7884501	0.7312845	0.8456158	0.7010228	0.8758774
2025	0.7889127	0.7296897	0.8481357	0.6983390	0.8794864
2026	0.7886767	0.7256527	0.8517007	0.6922898	0.8850636
2027	0.7882982	0.7209517	0.8556447	0.6853006	0.8912958
2028	0.7880447	0.7167175	0.8593718	0.6789592	0.8971301
2029	0.7879547	0.7131668	0.8627426	0.6735764	0.9023329
2030	0.7879658	0.7101008	0.8658308	0.6688815	0.9070501

## Cultivos permanentes, sección baja

Pronóstico puntual Lo 80 Hi 80 Lo 95 Hi 95

2021	0.6978221	0.6181687	0.7774754	0.5760027	0.8196414
2022	0.7217454	0.6420868	0.8014040	0.5999181	0.8435727
2023	0.7320314	0.6523590	0.8117037	0.6101830	0.8538797
2024	0.7272175	0.6448510	0.8095839	0.6012488	0.8531861
2025	0.7243490	0.6390944	0.8096035	0.5939634	0.8547346
2026	0.7252486	0.6382225	0.8122746	0.5921537	0.8583434
2027	0.7260102	0.6373748	0.8146456	0.5904541	0.8615664
2028	0.7258616	0.6354492	0.8162740	0.5875878	0.8641355
2029	0.7256672	0.6334643	0.8178701	0.5846550	0.8666794

2030 0.7256858 0.6317691 0.8196025 0.5820527 0.8693190

Pastizales, sección baja

Pronóstico puntual Lo 80 Hi 80 Lo 95 Hi 95

2021 0.7568801 0.6876969 0.8260633 0.6510735 0.8626867  
2022 0.7575640 0.6791379 0.8359902 0.6376216 0.8775065  
2023 0.7573736 0.6698067 0.8449405 0.6234515 0.8912956  
2024 0.7574266 0.6618136 0.8530396 0.6111992 0.9036541  
2025 0.7574118 0.6543208 0.8605028 0.5997477 0.9150759  
2026 0.7574160 0.6473691 0.8674628 0.5891138 0.9257181  
2027 0.7574148 0.6408223 0.8740073 0.5791020 0.9357276  
2028 0.7574151 0.6346266 0.8802037 0.5696262 0.9452040  
2029 0.7574150 0.6287281 0.8861020 0.5606053 0.9542248  
2030 0.7574151 0.6230885 0.8917416 0.5519804 0.9628498

Hule, sección baja

Pronóstico puntual Lo 80 Hi 80 Lo 95 Hi 95

2021 0.6831414 0.6257400 0.7405429 0.5953536 0.7709293  
2022 0.7082431 0.6388684 0.7776179 0.6021436 0.8143427  
2023 0.7047590 0.6327598 0.7767582 0.5946458 0.8148723  
2024 0.7052426 0.6299584 0.7805269 0.5901053 0.8203800  
2025 0.7051755 0.6268492 0.7835018 0.5853858 0.8249652  
2026 0.7051848 0.6239163 0.7864533 0.5808954 0.8294742  
2027 0.7051835 0.6210776 0.7892895 0.5765546 0.8338125  
2028 0.7051837 0.6183327 0.7920347 0.5723565 0.8380109  
2029 0.7051837 0.6156717 0.7946956 0.5682870 0.8420804  
2030 0.7051837 0.6130877 0.7972797 0.5643350 0.8460323

**Anexo 3.** Identificación de buenas prácticas de manejo de cuencas

Fecha: \_\_\_\_\_  
 Nombre productor: \_\_\_\_\_ Nombre finca: \_\_\_\_\_  
 Municipio: \_\_\_\_\_ Comunidad/aldea: \_\_\_\_\_  
 Coordenadas Geográficas (UTM): Longitud (X) \_\_\_\_\_ Latitud (Y) \_\_\_\_\_  
 Altitud (msnm): \_\_\_\_\_ Actividad de inversión estratégica: \_\_\_\_\_  
 Actividad secundaria: \_\_\_\_\_  
 Cantidad (especificar unidad): \_\_\_\_\_ Frecuencia (si aplica): \_\_\_\_\_  
 Objetivo de la subactividad: \_\_\_\_\_  
 Actividad productiva de la finca (Uso principal): \_\_\_\_\_

<b>Subactividad y proceso</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Unitario (Q.)</b>	<b>Costo Total (Q.)</b>
Insumos				
Herramientas *Duración*				
Transporte				
Instalación/Construcción/establecimiento				
Mantenimiento				
Mano de obra				
Otros				
<b>Total</b>				
<b>Observaciones:</b>				

Fuente: Hernández, 2019.

#### **Anexo 4.** Fórmula para la estimación de la depreciación de equipos y herramientas

El valor de las herramientas y equipos se asignará considerando la depreciación de éstos en base a su vida útil considerada para cada equipo o herramienta dividido entre los ciclos de producción y mantenimiento de la práctica.

$$D = \frac{ca}{cv} * cp$$

Donde:

D: es la depreciación

ca: es el costo actual del equipo o herramienta

cv: es el ciclo de vida útil de cada equipo o herramienta

cp: es el ciclo de producción o mantenimiento de la práctica

#### **Anexo 5.** Identificación de buenas prácticas de manejo de cuencas en la parte alta de la cuenca del río Ocosito



**Figura 14 A.** Reforestaciones en el municipio el Palmar



**Figura 15A.** Cultivos permanentes de aguacate en el municipio de San Martin Sacatepéquez





**Figura 16A.** Aboneras a base de cáscara de macadamia en La Alianza S.A, El Palmar



**Figura 17A.** Sistemas agroforestales en el municipio de Colomba



**Figura 18A.** Barreras vivas en sistemas agroforestales en el municipio de Colomba



**Figura 19A.** Sistemas agroforestales (café y especies maderables) en el municipio el Palmar