

Análisis del modelo de Producción de Cultivos de InVEST para soportar la toma de decisiones sobre cambios de cobertura del suelo en la cuenca del río Suratá (Santander, Colombia)

Kevin Orlando Ballesteros Morales

Trabajo de Grado para optar el Título de Ingeniero Civil

Directora:

Sandra Rocío Villamizar Amaya, Ph.D.

Codirectora:

Daniela Sofía Arenas González, M.Sc.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2026

Reconocimiento del uso de Inteligencia Artificial y Calculo de UE

En la realización de esta pasantía de investigación se hizo uso de las herramientas de inteligencia Artificial (IA) Consensus, txyz.ai y Research Rabbit como apoyo para la búsqueda y exploración de literatura científica. Estas herramientas permitieron identificar, filtrar y conectar artículos académicos relevantes a partir de consultas de lenguaje natural y con palabras claves, y fueron usadas como complemento a las búsquedas realizadas en Scopus, Web of Science y SciELO. Así mismo, se usó la herramienta Gemini para la ayuda con la estructuración y organización de ideas. El contenido técnico, los análisis y las conclusiones son propios y surgieron de un proceso de discusión con las directoras del trabajo de grado.

Cálculo de Unidad Editorial (UE): $UE = \left(\frac{\#de\ palabras}{250} \right) + \#de\ figuras + \#de\ tablas$

$$UE = \left(\frac{6367}{250} \right) + 0 + 3 = 28.47UE$$

El documento cumple con el requisito de $UE \leq 35$.

Contenido

	Pág.
Introducción	8
2. Objetivos	11
2.1. Objetivo General.....	11
2.2. Objetivos Específicos.....	11
3. Desarrollo de la Pasantía	12
3.1. Metodología	12
3.1.1. Fase 1 — Revisión de literatura sobre el modelo de producción de cultivos de InVEST .	12
3.1.2. Fase 2 — Implementación del modelo InVEST CP	13
3.2. Resultados	16
3.2.1. Síntesis bibliográfica: InVEST-CP en el contexto global	16
3.2.2. Fortalezas, limitaciones y recomendaciones del módulo CP	21
3.2.3. Resultados del modelo InVEST–CP: producción potencial por escenario.....	23
3.3. Discusión	26
4. Conclusiones	31
Referencias Bibliográficas	34
Apéndices	39

Lista de tablas

	Pág
Tabla 1. Estudios que aplican o fundamentan el módulo InVEST-Crop Production Percentile .	18
Tabla 2. Fortalezas, limitaciones y recomendaciones para el uso del módulo InVEST-CP en la cuenca del río Suratá	22
Tabla 3. Producción potencial estimada por el modelo InVEST-CP en la cuenca del río Suratá (toneladas métricas)	24

Lista de apéndices

“Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS”

Apéndice A: Guía Para el Modelo Crop Production Percentil de InVEST

Apéndice B: Salidas de Resultados de InVEST

Resumen

Título: Análisis del modelo de Producción de Cultivos de InVEST para soportar la toma de decisiones sobre cambios de cobertura del suelo en la cuenca del río Suratá (Santander, Colombia)*

Autor: Kevin Orlando Ballesteros Morales**

Palabras Clave: Crop Production Percentile, cultivos de alto valor, InVEST, servicios ecosistémicos, planificación agroambiental.

Descripción: La cuenca del río Suratá, al nororiente de Bucaramanga (Santander, Colombia), abastece de agua a más de un millón de habitantes y enfrenta presiones por minería aurífera con mercurio en Vetas y California, que afectan la calidad del agua. En el marco del trabajo de maestría "Evaluación de Alternativas de Cultivos de Alto Valor y su Impacto en la Producción Hídrica de la Cuenca del Río Suratá", esta pasantía evaluó el potencial del módulo Crop Production Percentile (CP) de InVEST como herramienta de apoyo a la planificación agroambiental, para la implantación de cultivos de alto valor (CAV) como estrategia alternativa a la minería. El módulo CP estima el rendimiento potencial de 175 cultivos en los percentiles p25, p50, p75 y p95, a partir del mapa de uso y cobertura del suelo (LULC) y una tabla de correspondencia LULC-cultivo. La metodología comprendió una revisión bibliográfica sistemática en Scopus, Web of Science y SciELO, y la modelación de 14 escenarios con nueve CAV bajo condiciones climáticas locales y restricciones legales ambientales. La revisión evidenció que InVEST-CP es ampliamente usado para estimar potencial productivo agrícola regional, aunque presenta limitaciones por la resolución y antigüedad de los datos de entrada y la ausencia de variables de manejo agrícola, por lo que sus resultados deben interpretarse como potencial relativo y no como metas de producción predial. Las simulaciones mostraron que el limón/lima (2.684-6.711 t, p25-p95) y el aguacate Hass (1.176-1.846 t, p25-p95) presentan alto potencial productivo, aunque su implementación debe ser coherente con la disponibilidad hídrica y los objetivos de conservación de la cuenca. El trabajo propone una ruta metodológica para aplicar modelos globales en contextos andinos con alta heterogeneidad biofísica y limitada información local, concluyendo que InVEST-CP es valioso cuando sus resultados se interpretan como potencial relativo y se complementan con información del territorio.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directora: Sandra Rocío Villamizar Amaya, Ph.D. Codirectora: Daniela Sofía Arenas González, M.Sc.

Abstract

Title: Analysis of the InVEST Crop Production Model to Support Decision-Making on Land Cover Changes in the Surata River Basin (Santander, Colombia)*

Author: Kevin Orlando Ballesteros Morales**

Key Words: Crop Production Percentile, high-value crops, InVEST, ecosystem services, agro-environmental planning.

Description: The Surata River basin, located northeast of Bucaramanga (Santander, Colombia), supplies water to more than one million people while facing pressures from mercury-based gold mining in the municipalities of Vetaz and California, which affects water quality. Within the framework of the master's thesis "Evaluation of High-Value Crop Alternatives and Their Impact on Water Production in the Surata River Basin," this internship evaluated the potential of the InVEST Crop Production Percentile (CP) module as a support tool for agro-environmental planning, focusing on high-value crops (HVCs) as an alternative strategy to mining. The CP module estimates the potential yield of 175 crops across percentiles (p25, p50, p75, and p95), using a land use and land cover (LULC) map and a crop-LULC correspondence table as inputs. The methodology comprised a systematic literature review in Scopus, Web of Science, and SciELO, and the modeling of 14 scenarios involving nine high-value crops under local climatic conditions and legal restrictions aimed at protecting sensitive areas. The review showed that InVEST-CP is widely used to estimate regional agricultural production potential, although it presents limitations related to the resolution and age of input data and the absence of explicit agricultural management variables, meaning results should be interpreted as relative potential rather than farm-scale production targets. Simulation results showed that lemon/lime (2,684-6,711 t, p25-p95) and Hass avocado (1,176-1,846 t, p25-p95) present high production potential, although their implementation must be consistent with water availability and the basin's conservation objectives. The study proposes a methodological pathway for applying global models in Andean contexts with high biophysical heterogeneity and limited local data, concluding that InVEST-CP is a valuable tool when its results are interpreted as relative potential and complemented with territory-specific information.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directora: Sandra Rocío Villamizar Amaya, Ph.D. Codirectora: Daniela Sofía Arenas González, M.Sc.

Introducción

La cuenca del río Suratá, ubicada en el norte del departamento de Santander, es un territorio donde la producción y la conservación hídrica entran en tensión permanente debido a que su parte alta nace en el Páramo de Santurbán, uno de los ecosistemas de regulación hídrica más importantes del país declarado área de reserva temporal por la Resolución 0221 de 2025 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) (AIDA, 2025; MADS, 2025), y en donde su agua abastece a más de un millón de personas en el Área Metropolitana de Bucaramanga (amb, 2021). Sin embargo, debido a la gran riqueza de minerales presentes en la zona, la cuenca acumula décadas de deterioro ambiental por minería aurífera informal con uso de mercurio, documentando concentraciones muy por encima de los límites permisibles para agua potable (CDMB, 2018; Procuraduría General de la Nación, 2023). Adicionalmente, otras presiones como la expansión de actividades agropecuarias sin planificación en zonas de recarga hídrica y la urbanización en áreas cercanas a ecosistemas estratégicos han sido identificadas como factores que contribuyen a la transformación del territorio y al aumento de conflictos entre usos del suelo y la conservación de recursos hídricos (CDMB, 2018).

Esta situación crea una necesidad concreta de planificación territorial para identificar alternativas productivas que permitan diversificar la economía rural de la cuenca, reducir la presión sobre los ecosistemas hídricos y mejorar los ingresos de las comunidades, sin comprometer las funciones de regulación hídrica que sostienen el abastecimiento urbano. Los cultivos de alto valor (CAV) como el cacao, café, aguacate Hass, piña, caña de azúcar, limón, arándano, quinoa y uchuva, han sido identificados institucionalmente por la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA) como alternativas productivas con aptitud agroclimática documentada para Santander (Daza et al., 2021). Sin embargo, la toma de decisiones sobre dónde implementar estos

cultivos, en qué proporciones y bajo qué escenarios, requiere evidencia espacialmente explícita que los instrumentos de planificación como el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCA) y el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), no siempre proveen.

En virtud de lo anterior, la modelación biofísica de servicios ecosistémicos es una forma práctica de cubrir parte de esa brecha. En particular, el módulo Crop Production Percentile (CP) de InVEST permite estimar el rendimiento potencial de 175 cultivos a escala regional utilizando como insumos principales un mapa de uso y cobertura del suelo (LULC) y una tabla de correspondencia LULC–cultivo (Natural Capital Alliance, 2026), lo que posiciona a esta herramienta como una opción óptima para análisis a escala de cuenca, donde suele haber cartografía disponible, pero escasean datos consistentes de manejo agrícola a nivel predial. Además, InVEST es una de las plataformas de modelación de servicios ecosistémicos más utilizadas a nivel global, ya que es de código abierto y gratuito, tiene integración SIG y es versátil ya que ofrece más de 20 modelos biofísicos distintos en una sola suite. Evidencia de esto es que, entre 2019 y 2025, se ha registrado un aproximado de más de 1.000 artículos indexados en Web of Science que aplican la suite, lo que respalda su madurez metodológica y su adopción en distintos contextos (Mukhopadhyay et al., 2025).

Esta pasantía de investigación se desarrolló en el Grupo de Investigación GPH de la Universidad Industrial de Santander (UIS), adscrito a la Escuela de Ingeniería Civil, dentro de la línea de investigación modelación de servicios ecosistémicos aplicada a la gestión de cuencas hidrográficas. La pasantía se enmarca como aporte al proyecto de investigación de maestría titulado "Evaluación de alternativas de cultivos de alto valor y su impacto en la producción hídrica de la cuenca del río Surata" y buscó proporcionar herramientas técnicas para la toma de decisiones

en planificación agroambiental territorial y la identificación de alternativas de actividades socioeconómicas de menor impacto ambiental para la población de la cuenca.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Analizar el modelo de producción de cultivos (CP) de InVEST para estimar la producción potencial de cultivos de alto valor (CAV) bajo diferentes escenarios de uso y cobertura del suelo en la cuenca del río Suratá.

2.2. Objetivos Específicos

- Realizar una revisión de literatura sobre el modelo de producción de cultivos de InVEST que permita conocer sus aplicaciones, casos de estudio y parámetros clave para su implementación.
- Implementar el modelo de producción de cultivos para diferentes escenarios de uso y cobertura de suelo con CAV en la cuenca del río Suratá.

3. Desarrollo de la Pasantía

3.1. Metodología

La metodología se estructuró en dos fases consecutivas con el fin de mantener alineados los objetivos, los métodos aplicados y los productos esperados. En la primera fase se consolidó el marco conceptual. En la segunda, se implementó la información técnica necesaria para la ejecución del modelo InVEST–Crop Production Percentile (CP) y se analizaron los resultados por escenario.

3.1.1. Fase 1 — Revisión de literatura sobre el modelo de producción de cultivos de InVEST

La Fase 1 tuvo como propósito consolidar una base conceptual y técnica antes de la ejecución del modelo. Para ello, se realizó una revisión de literatura alineada con el objetivo específico 1, orientada a identificar las principales aplicaciones, casos de estudio, requerimientos y limitaciones del modelo de producción de cultivos InVEST (CP Percentile), así como de enfoques similares de modelación de servicios ecosistémicos en sistemas agrícolas.

De esta manera se efectuó una revisión bibliográfica usando las bases de datos Scopus, Web of Science y SciELO, orientada a identificar las principales aplicaciones, requerimientos y limitaciones del modelo CP Percentile y de otros enfoques similares de modelación de servicios ecosistémicos. Así mismo, se emplearon términos de búsqueda como "InVEST Crop Production model", "ecosystem services" y "high-value crops", seleccionando artículos entre 2010 y 2025 que documentaran experiencias relevantes en contextos agrícolas o andinos, además se incluyeron estudios con aplicaciones en zonas de montaña, cuencas abastecedoras y paisajes agrícolas con presiones similares a las de Suratá, y se excluyeron estudios exclusivamente marinos o sin uso del módulo CP. Teniendo en cuenta lo anterior, los procesos de selección incluyeron 78 registros iniciales que se redujeron a 38 tras la lectura de títulos y resúmenes, y de estos se seleccionaron 12 para análisis en profundidad mediante lectura completa.

Adicionalmente, se emplearon herramientas de inteligencia artificial (IA) como Consensus, txyz.ai, Research Rabbit y Gemini, las cuales se usaron de apoyo en el proceso de revisión de literatura y como apoyo para la estructuración del documento. Los resultados de la revisión se sintetizaron en una matriz comparativa de casos de estudio, escalas de aplicación, y supuestos de modelación, lo cual permitió evaluar la pertinencia del modelo en contextos de zonas de montaña y fundamentar la selección de estudios de referencia para el diseño de los escenarios (Chen et al., 2024; Mukhopadhyay et al., 2025; Tito et al., 2018). A partir del análisis detallado de los estudios seleccionados, la identificación de los parámetros clave para la implementación del modelo se realizó mediante la extracción sistemática de la información reportada en cada publicación, enfocándose en los datos de entrada requeridos, las variables biofísicas consideradas y las configuraciones del modelo empleadas.

3.1.2. Fase 2 — Implementación del modelo InVEST CP

En esta fase se llevó a cabo la implementación del módulo Crop Production Percentile (CP) de InVEST (v3.15.0), el análisis de los resultados obtenidos y la elaboración de un tutorial para su uso. Este tutorial documentó de manera detallada el proceso de preparación de insumos, configuración del modelo, ejecución de escenarios, lectura de resultados y se presentó en el *Apéndice A* como parte de los productos de la investigación.

En esta fase, se trabajó con escenarios y áreas productivas previamente definidos en el marco del trabajo de maestría que sustenta a esta investigación en el cual, ya se habían incorporado las restricciones normativas del POMCA del río Alto Lebrija (CDMB, 2018), la Ley 1930 de 2018 y la Resolución 0221 de 2025 del MADS (AIDA, 2025; MADS, 2025). En este trabajo, la actividad consistió en utilizar dichos escenarios y establecer la correspondencia entre los códigos LUCODE

del mapa LULC y los cultivos del modelo, de acuerdo con los requerimientos del módulo Crop Production Percentile de InVEST.

Como insumo para la implementación del modelo, se utilizaron datos geoespaciales provenientes de fuentes oficiales (IDEAM, IGAC y CDMB), los cuales fueron previamente recopilados y procesados en el marco del trabajo de maestría que sustenta esta investigación. En particular, el mapa de uso y cobertura del suelo (LULC) del IDEAM, (Gomez Anaya, 2023) basado en la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia, fue procesado en QGIS para delimitar la cuenca del río Suratá y reclasificar las coberturas a códigos LUCODE compatibles con InVEST. Así mismo, se dispuso de capas climáticas de temperatura media y precipitación anual, utilizadas para verificar la coherencia de los bins (categorías) climáticos asignados por el modelo.

Como parte de la preparación de insumos, se empleó la tabla de correspondencia LULC–cultivo en formato CSV, la cual fue previamente construida en el marco del trabajo de maestría que sustenta esta investigación. Esta tabla fue desarrollada de manera conjunta, incluyendo aportes en su elaboración para algunos de los escenarios analizados. En ella, a cada código LUCODE se le asignó el nombre exacto del cultivo en inglés, conforme a la nomenclatura del archivo interno `crop_to_observed_yield.csv`. También se verificó la disponibilidad de los cultivos de alto valor priorizados en el trabajo de Maestría, correspondientes a cacao (`cocoa_beans`), café (`coffee`), aguacate Hass (`avocados`), piña (`pineapples`), caña de azúcar (`sugarcane`), limón/lima (`lemons_and_limes`), arándano (`blueberries`), uchuva (`gooseberries`), y quinoa (`quinoa`).

La base geoespacial estandarizada, con metadatos completos, y la tabla de correspondencia LULC–cultivo en formato CSV fueron empleados como insumos directos para la ejecución del modelo. (Gomez Anaya, 2023), como se mencionó anteriormente, mientras que la tabla de

correspondencia se estructuró conforme a los requerimientos del módulo Crop Production Percentile de InVEST, asociando cada código LUCODE con un cultivo reconocido por la base global de rendimientos derivada de EarthStat (Monfreda et al., 2008; Natural Capital Alliance, 2026).

Para la ejecución del modelo, se consolidaron los insumos requeridos, incluyendo la configuración del módulo Crop Production Percentile (CP) de InVEST (v3.15.0) y en el procesamiento de sus salidas para comparar escenarios, se optó por la variante Percentile porque el objetivo no fue calibrar rendimientos a escala predial, sino obtener una medida comparativa del potencial productivo bajo condiciones de información limitada caracterizada por la ausencia de series climáticas detalladas, datos de manejo agronómico y experimentos de campo para calibración. Teniendo en cuenta lo anterior, esta medida comparativa se expresa mediante percentiles de rendimiento (p25, p50, p75 y p95), en donde p25 representa un rendimiento bajo, p50 un rendimiento promedio, p75 un nivel asociado a buenas prácticas de manejo y p95 el rendimiento alcanzable bajo condiciones óptimas dentro de la zona climática correspondiente (Mueller et al., 2012). Para efectos de trazabilidad, todas las corridas reportadas en este documento se realizaron con el programa InVEST v3.15.0, (Natural Capital Alliance, 2026).

En consecuencia, se ejecutaron 14 escenarios de modelación previamente definidos en el marco del trabajo de Maestría, los cuales fueron implementados en esta investigación conforme a los lineamientos establecidos. De estos, nueve corresponden a escenarios de monocultivo (Esc1–Esc9), en los que se asigna uno por cada CAV sobre las coberturas convertibles de la cuenca, y cinco multi-cultivo (Esc10–Esc14) en los que se combinan dos o tres CAV distribuyendo proporcionalmente el área convertible; siendo así, que para cada escenario se utilizó un mapa LULC de entrada y se ejecutó la corrida completa del módulo.

Cabe mencionar que las salidas del modelo incluyeron mapas en formato ráster (.tif) de rendimiento potencial (t/ha) para los percentiles p25, p50, p75 y p95, así como las tablas en formato CSV con la producción total por cultivo, el área cubierta y producción observada histórica proveniente de la base de datos EarthStat empleada por el modelo (Monfreda et al., 2008; Natural Capital Alliance, 2026).

3.2. Resultados

3.2.1. Síntesis bibliográfica: InVEST-CP en el contexto global

Durante las últimas dos décadas, la modelación espacial de servicios ecosistémicos se ha consolidado como un apoyo técnico para la planificación territorial, especialmente en cuencas donde entran en tensión objetivos productivos y de conservación (Foley et al., 2011; Guerri et al., 2015; Tallis & Polasky, 2009). En ese marco, InVEST es una de las plataformas utilizadas a nivel mundial con aplicaciones que van desde la gestión de cuencas abastecedoras hasta la evaluación de compensaciones entre producción agrícola y regulación hídrica (Mukhopadhyay et al., 2025). En particular, el módulo CP de InVEST estima rendimientos potenciales a partir de distribuciones empíricas construidas con estadísticas globales de la FAO y con la base EarthStat para cerca de 175 cultivos, alrededor del año 2000 (Monfreda et al., 2008; Natural Capital Alliance, 2026). En su variante Percentile, el modelo asigna a cada píxel un rendimiento asociado a los percentiles p25, p50, p75 y p95 del cultivo ya mencionados (ver definición conceptual en la sección 3.1.2), calculados a partir de la distribución empírica de rendimientos observados dentro de cada bin climático del cultivo (Natural Capital Alliance, 2026). Al no exigir información local de manejo, clima o suelos por parte del usuario, resulta útil en regiones donde esos datos son escasos o están fragmentados; por lo mismo, sus salidas deben interpretarse como potencial relativo para comparar escenarios.

En términos geográficos, los estudios que aplican CP se concentran principalmente en Asia oriental e Irán (Adelisardou et al., 2021), así como en China (Xiong et al., 2024; Zhang et al., 2025). También se encontró un estudio comparativo Europa–África (Nel, 2024) y en América Latina se identificó un único caso documentado en México (Valencia Torres et al., 2022). En la búsqueda realizada no se encontraron aplicaciones de InVEST-CP en Colombia ni, específicamente, en cuencas abastecedoras de los Andes colombianos. Esta ausencia sugiere una brecha regional en la literatura y coincide con lo reportado por (Mukhopadhyay et al., 2025), respecto a la baja presencia de aplicaciones latinoamericanas del módulo CP en publicaciones indexadas.

A continuación, se sintetizan los 12 trabajos que fueron insumo clave para este estudio (Tabla 1). Se muestran primero cinco artículos que aplican explícitamente el módulo CP (ID 1 a 5), cuatro fuentes técnicas primarias asociadas al funcionamiento del modelo (ID 6 a 9) y tres trabajos de contexto sobre agroecosistemas similares al andino (ID 10 a 12).

Tabla 1.*Estudios que aplican o fundamentan el módulo InVEST-Crop Production Percentile*

ID	Referencia	País/Región	Base de datos	¿Usa módulo CP?	Resultados clave	Aporte al presente estudio
1	(Adelisardou et al., 2021)	Irán — Llanura de Jiroft	Scopus	Sí	Cambios LULC por expansión urbana redujeron servicios de regulación hasta 38%; CP cuantificó pérdida productiva asociada.	Metodología de integración CP + módulos regulación en cuenca con presión mixta; replicable en Surata.
2	(Xiong et al., 2024)	China — cuenca periurbana Wuhan	Web of Science	Sí	Expansión urbana redujo producción agrícola potencial 22% en 10 años; sinergias y compensaciones espaciales CP+Water Yield.	Cómo combinar CP con módulo hídrico para análisis de compensaciones en cuenca bajo presiones múltiples.
3	(Valencia Torres et al., 2022)	México — Zona Metropolitana de Toluca (2.600 m s.n.m.)	Scopus	Sí, estudio más completo de CP en la alta montaña tropical	La diversificación de cultivos mejora sustancialmente la producción nutricional (mínimo 2x vs. monocultivo) y puede sinergizar con la conservación de suelos. Uso de InVEST-CP + SDR sobre paisajes sintéticos.	Estudio de referencia principal: misma altitud, misma combinación CP+SDR propuesta.
4	(Zhang et al., 2025)	China — Provincia Anhui (escala regional)	Web of Science	Sí	Algoritmo Marxan con CP delimitó zonas de protección manteniendo >85% producción.	Referencia para uso de CP en zonificación territorial y optimización espacial.
5	(Nel, 2024)	Hungría y Sudáfrica (comparativo)	Scopus	Sí	Mosaicos productivos diversificados mostraron $\pm 15\%$ menor variabilidad de rendimiento frente a monocultivos bajo eventos climáticos extremos.	Justifica estrategia de diversificación con CAV vs. monocultivos en cuencas bajo variabilidad climática.

ID	Referencia	País/Región	Base de datos	¿Usa módulo CP?	Resultados clave	Aporte al presente estudio
6	(Mukhopadhyay et al., 2025)	Global — revisión sistemática (n=276 artículos)	Scopus + Web of Science	Bibliométrico — CP en ~8% estudios	InVEST en 276 artículos WoS 2019-2024. CP concentrado en Asia; brecha en América Latina identificada.	Posiciona globalmente InVEST y documenta brecha de CP en Andes latinoamericanos.
7	(Natural Capital Alliance, 2026)	Global — documentación técnica NatCap	Fuente primaria NatCap	Documentación completa del módulo CP	CP Percentile: 175 cultivos, datos FAO/EarthStat base año 2000. Entradas: LULC raster + CSV tabla cultivos.	Fuente técnica primaria del modelo. Define qué entra, qué sale y cómo funciona el algoritmo.
8	(Monfreda et al., 2008)	Global — base de datos EarthStat	Global Biogeochemical Cycles	Datos de rendimiento que usa CP internamente	Mapeo global de ~175 cultivos a resolución ~10 km, año base circa 2000.	Explica la resolución efectiva del modelo (~10 km) y la antigüedad de los datos de referencia.
9	(Mueller et al., 2012)	Global — análisis de brechas de rendimiento	Nature	Marco conceptual de percentiles del módulo CP	Percentil 95 de rendimientos observados como "rendimiento alcanzable". Cierre de brechas en 16 cultivos.	Fundamenta el concepto de percentiles del módulo CP: p25=bajo, p50=promedio, p75=buenas prácticas, p95=óptimo.
10	(Gerber et al., 2024)	Global — metaanálisis metodológico	Agricultural Systems	Marco analítico del sistema de percentiles de CP	Percentiles p25-p75 como proxies válidos de intensificación sostenible sin datos explícitos de manejo.	Justifica el uso de percentiles como indicadores relativos de intensificación y no como predicciones absolutas.
11	(Keller et al., 2022)	Global — análisis metodológico de escalas	Environmental Modelling & Software	Análisis crítico de limitaciones del módulo CP	Resolución efectiva ~10 km de EarthStat es la principal limitación de CP en territorios andinos heterogéneos.	Referencia para la sección de limitaciones. Fundamenta la necesidad de comparar p50 con estadísticas locales.

ID	Referencia	País/Región	Base de datos	¿Usa módulo CP?	Resultados clave	Aporte al presente estudio
12	(van Ittersum et al., 2013)	Global — revisión metodológica de yield gaps	Field Crops Research	Marco conceptual de brechas para contextualizar CP	Definición jerárquica: rendimiento potencial → limitado por agua → alcanzable → actual. El alcanzable corresponde al p95 de CP.	Ubica el percentil p95 de CP dentro del marco conceptual de brechas de rendimiento de la agronomía.

Nota. Elaboración propia a partir de revisión bibliográfica en Scopus, Web of Science y SciELO (2008–2025). BD = base de datos de indexación; CP = Crop Production Percentile, SDR= Sediment Delivery Ratio.

3.2.2. Fortalezas, limitaciones y recomendaciones del módulo CP

La revisión del módulo InVEST–CP y de su documentación técnica permite identificar varias fortalezas que explican por qué se ha usado en estudios de planificación y análisis de escenarios. Primero, CP se apoya en distribuciones empíricas de rendimiento para alrededor de 175 cultivos, lo que hace posible representar patrones espaciales de productividad sin exigir bases de datos locales extensas ni procesos de calibración con ensayos de campo (Monfreda et al., 2008; Natural Capital Alliance, 2026). En segunda instancia, nos permite explorar que tan sensible podría ser la productividad ante mejoras de manejo; por ejemplo, un valor cercano al p25 refleja el desempeño de sistemas productivos insipientes o con un manejo mínimo, mientras si observamos un valor cercano al p75 refleja lo que es alcanzable con prácticas agronómicas que estén ya consolidadas. Esta diferencia es relevante para la planificación en la zona del Rio Surata porque permite distinguir entre el potencial productivo bajo condiciones actuales de manejo local y el potencial que podría lograrse si se acompaña la implementación de CAV con asistencia técnica y mejores prácticas, sin presentar las salidas como predicciones puntuales (Gerber et al., 2024; Mueller et al., 2012). Tercero, el módulo se integra con facilidad con otros componentes de InVEST (rendimiento hídrico, retención de sedimentos, carbono y calidad de hábitat), lo que favorece diagnósticos conjuntos sobre producción de alimentos y servicios de regulación, particularmente en cuencas con presiones múltiples como es el caso de la cuenca del Surata (Valencia Torres et al., 2022; Zhang et al., 2025).

Al mismo tiempo, la literatura también coincide en algunas limitaciones relevantes del modelo, sintetizadas en la tabla 2 que se muestra a continuación, ya que están relacionadas principalmente con la resolución espacial, la antigüedad de los datos y la ausencia de variables explícitas de manejo agrícola para evitar interpretaciones erróneas de sus resultados.

Tabla 2.

Fortalezas, limitaciones y recomendaciones para el uso del módulo InVEST-CP en la cuenca del río Suratá

Dimensión	Hallazgos de la revisión	Recomendación para Suratá
Datos y estructura del modelo	Base global FAO/EarthStat para ~175 cultivos; supuestos y tablas documentadas.	Aprovechar CP en contextos con datos limitados, explicitando siempre la procedencia y fecha de los insumos.
Representación de rendimientos	Percentiles de rendimiento (p25–p95) que permiten lecturas relativas e interpretación de incertidumbre.	Emplear percentiles para comparar escenarios y no como predicción puntual de rendimiento observado.
Integración con otros módulos	Combinación frecuente con agua, carbono y hábitat en estudios de servicios múltiples.	Diseñar aplicaciones donde CP sea uno de varios módulos, priorizando análisis de sinergias y compensaciones.
Calidad de datos espaciales	Sensibilidad alta a inconsistencias en mapas de uso y cobertura del suelo (LULC).	Usar coberturas oficiales actualizadas, documentar reclasificaciones y validar consistencia espacial.
Resolución y antigüedad de datos	Resolución ~10 km y línea base alrededor del año 2000; no captura cambios recientes de manejo o clima.	Interpretar resultados como potencial relativo histórico y contrastarlos con estadísticas agropecuarias recientes.
Representación del manejo	Variante Percentile no incluye fertilización, variedades ni prácticas de manejo explícitas.	Complementar CP con conocimiento local y, si es necesario, con modelos detallados a escala predial.

Nota. Síntesis elaborada a partir de la documentación oficial de InVEST y literatura científica revisada.

3.2.3. Resultados del modelo InVEST–CP: producción potencial por escenario

Esta sección presenta los resultados cuantitativos de las 14 corridas del módulo InVEST–Crop Production Percentile (v3.15.0), cada una asociada a un escenario de cambio de uso y cobertura del suelo en la cuenca del río Suratá (Tabla 3). Se evaluaron nueve escenarios de monocultivo (Esc1–Esc9), uno por cada cultivo de alto valor, y cinco escenarios multi-cultivo (Esc10–Esc14) que combinan entre dos y tres cultivos dentro del mismo ráster de entrada. Para cada escenario, el modelo reportó el área asignada a cada cultivo, la producción observada histórica (EarthStat) y la producción potencial estimada para los percentiles p25, p50, p75 y p95 (Monfreda et al., 2008; Natural Capital Alliance, 2026). Es importante notar que, para varios cultivos, el área observada en el LULC de referencia es igual a cero, dado que actualmente no se cultivan en la cuenca; sin embargo, el modelo sí estima su producción potencial a partir de las condiciones biofísicas de la zona climática correspondiente, independientemente de la distribución actual de cultivos en el territorio.

Tabla 3.

Producción potencial estimada por el modelo InVEST–CP en la cuenca del río Suratá (toneladas métricas)

Escenario	Cultivo	Tipo	Área (ha)	P. Observada (t)	P25 (t)	P50 (t)	P75 (t)	P95 (t)
Esc1	Aguacate Hass	Monocultivo	0,000	0,000	1.175,6	1.284,3	1.471,3	1.845,9
Esc2	Arándano	Monocultivo	0,000	0,000	83,7	84,4	84,4	84,5
Esc3	Cacao	Monocultivo	10,406	0,078	0,0	0,0	0,0	0,0
Esc4	Café	Monocultivo	439,750	422,160	210,2	317,2	377,6	438,5
Esc5	Caña de azúcar	Monocultivo	10,719	0,127	516,7	549,7	656,1	780,8
Esc6	Limón/Lima	Monocultivo	0,000	0,000	2.684,1	3.330,9	3.859,1	6.711,2
Esc7	Piña	Monocultivo	0,000	0,000	123,0	123,0	123,0	175,3
Esc8	Quinoa	Monocultivo	0,000	0,000	14,0	21,8	21,8	21,8
Esc9	Uchuva/Grosella	Monocultivo	0,000	0,000	0,0	0,0	0,0	0,0
Esc10	Aguacate Hass	Multi-cultivo	0,000	0,000	1.175,6	1.284,3	1.471,3	1.845,9
	Arándano	Multi-cultivo	0,000	0,000	83,7	84,4	84,4	84,5
	Cacao	Multi-cultivo	10,406	0,078	0,0	0,0	0,0	0,0
Esc11	Cacao	Multi-cultivo	10,406	0,078	0,0	0,0	0,0	0,0
	Café	Multi-cultivo	439,750	422,160	210,2	317,2	377,6	438,5
Esc12	Arándano	Multi-cultivo	0,000	0,000	83,7	84,4	84,4	84,5
	Caña de azúcar	Multi-cultivo	10,719	0,127	516,7	549,7	656,1	780,8
Esc13	Uchuva/Grosella	Multi-cultivo	0,000	0,000	0,0	0,0	0,0	0,0
	Piña	Multi-cultivo	0,000	0,000	123,0	123,0	123,0	175,3
Esc14	Uchuva/Grosella	Multi-cultivo	0,000	0,000	0,0	0,0	0,0	0,0
	Quinoa	Multi-cultivo	0,000	0,000	14,0	21,8	21,8	21,8

Nota. Resultados obtenidos con el módulo InVEST Crop Production Percentile v3.15.0. El área corresponde a los píxeles del raster LULC asignados a cada cultivo. La producción observada proviene de la base EarthStat (~año 2000), mientras que los valores P25–P95 representan

percentiles de rendimiento potencial según la distribución global del cultivo que son valores expresados en toneladas métricas (t).

Antes de comparar los escenarios de monocultivo, es importante notar que varios cultivos con alto potencial productivo, como el limón/lima, el aguacate Hass, al arándano, la piña y la quinua, que presenta un área reportada de cero hectáreas (0.0 ha) en el escenario de referencia según los datos globales del modelo (EarthStat). Esto no representa un error del modelo, sino que refleja que dichos cultivos no estaban registrados históricamente en esa cartografía global a escala de aproximadamente 10km. Para el cálculo de producción potencial (p25-p95) en los escenarios de simulación, el modelo InVEST no utiliza el área histórica de EarthStat, sino la superficie física convertible definida directamente en el mapa de cobertura del suelo (LULC de entrada). A cada hectárea asignada a un cultivo en el LULC se le aplica la tasa de rendimiento (ton/ha) correspondiente a su zona climática (climate bin, permitiendo estimar la producción potencial independientemente de si el cultivo registraba presencia histórica o se encuentra sembrado actualmente en la cuenca. Dicho esto, al comparar los escenarios de monocultivo entre sí, el limón/lima (Esc6) presenta la mayor producción potencial en todos los percentiles, con valores entre 2.684 t (p25) y 6.711 t (p95). En segundo lugar, se ubica el aguacate Hass (Esc1), con un rango de 1.176 t (p25) a 1.846 t (p95), el café (Esc4) es el único cultivo con producción observada significativa en el mapa de referencia (422 t) y, por ello, sirve como punto de contraste: su estimación en p25 (210 t) queda por debajo de la observada, lo que sugiere que el manejo local puede estar por encima del umbral inferior de la distribución global del cultivo, así mismo, la caña de azúcar (Esc5) también muestra un potencial relevante (517–781 t). En contraste, el cacao (Esc3) y la uchuva/Gooseberry (Esc9) registran producción potencial igual a cero en todos los percentiles; esto se asocia a vacíos en la base global de rendimientos utilizada por el modelo para la zona

climática y el año de referencia, y no debe interpretarse como una imposibilidad agronómica en la cuenca (Monfreda et al., 2008).

Los escenarios multi-cultivo (Esc10–Esc14) mantienen los patrones de sus cultivos componentes, esto se debe a que el ráster LULC empleado en estos escenarios contiene particiones espaciales fijas para cada cultivo; lo que varía entre un escenario de monocultivo y uno multicultivo es únicamente la identidad de cultivo asignada a cada partición mediante la tabla de correspondencia, no la extensión de área que ocupa cada cultivo. Por esta razón, el rendimiento potencial de un mismo cultivo se mantiene idéntico dentro de su escenario de monocultivo y cualquier escenario multi-cultivo en el que participe; por ejemplo, el Aguacate Hass presenta los mismos valores de p25 a p95 en el Esc1 y en Esc10. Este último (Aguacate + Arándano + Cacao) combina el alto potencial del aguacate con un aporte menor, aunque estable, del arándano (83,7–84,5 t). El cacao, en cambio, no reporta percentiles de producción en este escenario, debido a los vacíos en la base global de rendimientos ya descritos. En el Esc11 (Cacao + Café), el café concentra la señal productiva del escenario, con un gradiente claro entre p25 (210 t) y p95 (438 t), mientras que el cacao no aporta producción potencial por las limitaciones ya descritas. Finalmente, los escenarios Esc12 (Arándano + Caña), Esc13 (Uchuva + Piña) y Esc14 (Uchuva + Quinoa) son útiles para explorar combinaciones que mezclan cultivos con información completa y cultivos con vacíos en la base global, lo cual ayuda a identificar prioridades de mejora de datos y de validación local para ciclos futuros de planificación (Gerber et al., 2024).

3.3. Discusión

Los resultados de la revisión bibliográfica y las salidas del modelo indican que InVEST-CP es coherente con el objetivo de este estudio y con el tipo de información disponible para la cuenca del río Suratá. En particular, el hecho de contar con cartografía LULC, pero no con datos

detallados de manejo agrícola a escala predial, respalda la elección de la variante Percentile. Bajo esta aproximación, los mapas y tablas obtenidos deben leerse como un insumo para comparar alternativas de reconversión productiva entre escenarios y no como una estimación puntual del rendimiento de una parcela específica (Mukhopadhyay et al., 2025; Natural Capital Alliance, 2026).

En la revisión se logró evidenciar que InVEST-CP raramente se aplica de forma aislada, ya que en la mayoría de los estudios analizados se integra con otros módulos, particularmente aquellos relacionados con la producción hídrica, sedimentos o carbono. Este enfoque integrado responde a la necesidad de evaluar no solo la productividad agrícola, sino también las interacciones entre distintos servicios ecosistémicos (Bouguerra et al., 2024; Wang et al., 2023; Wei et al., 2021; Zhu et al., 2025). En el marco de la tesis de maestría que sustenta esta pasantía de investigación, se adoptó igualmente este enfoque articulado, evitando un análisis independiente del componente productivo. Esta decisión es coherente con el planteamiento de la tesis de maestría que sustenta esta pasantía, donde la problemática de la cuenca no se limita a maximizar la producción agrícola, sino a comprender sus posibles complicaciones sobre la disponibilidad de agua para consumo humano y la tensión entre expansión agropecuaria y recursos hídricos ya documentada para la cuenca del Surata (CDMB, 2018). De este modo, el análisis conjunto permite abordar de manera más adecuada los posibles conflictos entre la expansión agrícola y la disponibilidad de recursos hídricos, aportando una base más robusta para la toma de decisiones en el territorio (Mukhopadhyay et al., 2025).

La limitación de resolución (~10 km) requiere una lectura cuidadosa en el contexto andino. En la cuenca del río Surata la variación altitudinal hace que, dentro de un mismo píxel de referencia, puedan coexistir condiciones muy distintas: desde climas cálido-húmedos en el fondo

del valle hasta condiciones frías cercanas al subpáramo en las partes altas. En la práctica, el modelo asigna un mismo bin o rango climático a toda esa unidad espacial y, por tanto, aplica los mismos percentiles de rendimiento a sus píxeles, lo que tiende a “suavizar” la diversidad productiva real del territorio. Esta limitación no invalida el análisis de CP; sigue siendo útil para comparar escenarios y reconocer tendencias a escala cuenca, pero sí obliga a comunicar claramente que los mapas de percentiles son diagnósticos de potencial relativo y no predicciones prediales (Keller et al., 2022; Monfreda et al., 2008).

Los resultados también evidencian una asimetría de información relevante para la planificación. Por un lado, el limón/lima y el aguacate Hass presentan los valores más altos de producción potencial; sin embargo, su área observada es cero en el LULC de referencia, lo que sugiere que su presencia actual en la cuenca es marginal o inexistente, al menos en la fecha del mapa. Esta diferencia se debe a que el modelo estima la producción potencial a partir de condiciones biofísicas asociadas a cada zona climática independientemente de la distribución actual de los cultivos en el territorio. En consecuencia, los altos valores obtenidos no reflejan producción real, sino una aproximación a la aptitud productiva del territorio para dichos cultivos bajo las condiciones ambientales consideradas por el modelo. Estos resultados permiten identificar oportunidades potenciales de reconversión productiva o expansión agrícola, sujetas a validación en campo y a consideraciones socioeconómicas y normativas.

En contraste, el café sí registra presencia (439 ha) y producción observada (422 t), lo que permite una comparación directa: el p50 estimado (317 t) se ubica en el mismo orden de magnitud, la diferencia (25%) es esperable dada la resolución efectiva (10 km) de la base EarthStat en un territorio con alta heterogeneidad altitudinal, aunque por debajo de la cifra observada. Aunque esta comparación no constituye una validación formal del modelo, muestra que las estimaciones se

encuentran en el mismo orden de magnitud para el único cultivo con información observable significativa en el área de estudio, lo que aporta contexto para la interpretación de los resultados como indicadores de potencial productivo relativo y no de rendimiento real a escala predial (Gerber et al., 2024; Natural Capital Alliance, 2026; van Ittersum et al., 2013).

La interpretación del conjunto de escenarios permite identificar un patrón de aptitud climática diferenciado en la cuenca. El limón/lima y el aguacate Hass no solo presentan los valores más altos, sino también los rangos más amplios entre percentiles, lo que indica mayor variabilidad potencial y, por extensión, una mayor sensibilidad a condiciones de manejo dentro de la zona climática considerada. En cambio, la piña, el arándano y la quinoa muestran rangos muy estrechos entre p25 y p75, lo cual puede interpretarse como señales de desempeño más estable, pero también como evidencia de que estos cultivos podrían encontrarse cerca del margen de su nicho adecuado en el bin climático de Suratá. La caña de azúcar, con 517–781 t entre p25 y p95, exhibe un gradiente de intensificación relevante, aunque su interpretación debe considerar que se trata de un cultivo industrial sin información nutricional asociada en la base de InVEST. En conjunto, estos patrones sumados a la aptitud altitudinal y a las restricciones normativas del POMCA aportan criterios técnicos para priorizar espacialmente zonas de reconversión productiva en la cuenca (Natural Capital Alliance, 2026; van Ittersum et al., 2013).

Desde el punto de vista normativo, aplicar InVEST-CP en Suratá no es únicamente un ejercicio técnico, sino también es una forma de traducir restricciones y objetivos de conservación en criterios espaciales comparables entre escenarios. Si bien este estudio se centró en la comparación tabular de escenarios, una extensión natural del análisis sería generar los mapas espaciales de rendimiento potencial correspondientes a cada escenario evaluado. Estos mapas que el módulo InVEST produce como salida estándar (ver apéndice B) podrían servir como evidencia

espacial complementaria para discutir y ajustar zonificaciones productivas en los POT municipales, especialmente si se articulan con la revisión del POMCA en la subcuenca. En ese marco, los escenarios que combinan CAV con aptitud climática favorable, dentro de las áreas ya delimitadas como convertibles bajo las restricciones normativas del POMCA (Ley 1930 de 2018 y Resolución 0221 de 2025) constituyen la base técnica de este análisis. Una extensión futura del estudio podría incorporar explícitamente criterios adicionales de conectividad ecológica y protección de franjas ribereñas como capas diferenciadoras entre escenarios. El aporte instrumental del modelo es aportar evidencia espacialmente explícita para que las decisiones de uso del suelo sean más informadas, consistentes y justificables frente a autoridades ambientales y comunidades locales (AIDA, 2025; CDMB, 2018; MADS, 2025; Rodríguez et al., 2023).

4. Conclusiones

La revisión bibliográfica confirmó que el modelo InVEST-CP es una herramienta adecuada para estimar el potencial productivo agrícola en contextos con disponibilidad limitada de información, dado que es de código abierto, utiliza condiciones biofísicas generales derivadas de una base de datos global que cubre 175 cultivos y requiere insumos mínimos como el mapa de uso y cobertura del suelo (LULC) y una tabla de correspondencia como datos de entrada (Monfreda et al., 2008; Natural Capital Alliance, 2026). Asimismo, se evidenció que su principal fortaleza radica en permitir comparaciones espaciales entre escenarios, mientras que sus resultados deben interpretarse como estimaciones de potencial relativo, debido a limitaciones asociadas a la resolución espacial (~10 km), la antigüedad de los datos base y la ausencia de variables explícitas de manejo agrícola. En este sentido, la escasa aplicación del módulo en cuencas andinas colombianas posiciona este estudio como un referente metodológico para la planificación agroambiental en el país.

En términos de resultados, los escenarios de monocultivo evidencian que el Esc6 (limón/lima) y el Esc1 (aguacate Hass) presentan el mayor potencial productivo dentro de la zona climática de la cuenca, con rangos de 2.684–6.711 t y 1.176–1.846 t (p25–p95), respectivamente; les siguen Esc5 (caña de azúcar) y el Esc4 (café). En contraste, el Esc3 (cacao) y el Esc9 (uchuva) presentan valores nulos en todos los percentiles, no porque no puedan crecer en la cuenca, sino como una limitación de la base global de rendimientos para el año de referencia (~2000) (Monfreda et al., 2008). Esto evidencia la necesidad de complementar los resultados con información local para fortalecer su aplicabilidad.

Los escenarios multi-cultivo mantienen los patrones de sus cultivos componentes y muestran que la diversificación productiva permite explorar configuraciones más diversas y útiles

para la planificación frente a la variabilidad ambiental, aportando información relevante para la toma de decisiones en el territorio (Gerber et al., 2024).

Desde el punto de vista metodológico, se identificó que uno de los aspectos críticos en la implementación del modelo es la correcta construcción de la tabla de correspondencia (CSV) entre coberturas del suelo y cultivos, debido a que esta tabla funciona como el puente entre el mapa LULC y la base interna de rendimientos del modelo. Errores en esta correspondencia no generan alertas en el sistema, sino que generan resultados nulos, lo que resalta la importancia del control de calidad de los insumos. Asimismo, se confirmó que el modelo no incorpora restricciones normativas de manera automática, por lo que estas deben integrarse explícitamente en los escenarios de entrada.

La comparación entre la producción observada de café (422 t) reportada por EarthStat y la estimada por el modelo en el percentil p50 (317 t) arrojó valores dentro del mismo orden de magnitud lo que respalda el uso del modelo como herramienta comparativa. Se priorizó el percentil p50 como línea base de comparación por representar el rendimiento esperable bajo condiciones de manejo y clima promedio, evitando el sesgo de asumir un escenario optimo de producción p95(438,5 t). la proximidad del dato observado al percentil p95 sugiere que la zona representa eficiencias locales superiores al promedio global del modelo. No obstante, se reconoce que esta aproximación no constituye una validación formal del modelo, dado que ambos resultados se encuentran asociados a la base global de información utilizada por InVEST. En consecuencia, los resultados deben interpretarse como diagnósticos de potencial productivo relativo y no como valores absolutos de producción.

Finalmente, los resultados muestran que la combinación de patrones de aptitud climática y restricciones normativas constituye un criterio clave para la priorización de zonas de reconversión

productiva. En este sentido, la diversificación con cultivos de alto valor, aplicada bajo las salvaguardas del POMCA, la Ley 1930 de 2018 y la Resolución 0221 de 2025, representa una alternativa viable para equilibrar la producción agrícola y la conservación hídrica de la cuenca del río Suratá.

Referencias Bibliográficas

- Adelisardou, F., Jafari, H. R., Malekmohammadi, B., Minkina, T., Zhao, W., & Karbassi, A. (2021). Impacts of land use and land cover change on the interactions among multiple soil-dependent ecosystem services (case study: Jiroft plain, Iran). *Environmental Geochemistry and Health*, 43(10), 3977-3996. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00875-5>
- AIDA. (2025). *La declaración de un Área de Reserva Temporal en el Páramo de Santurbán es una victoria para la defensa del agua en América Latina | Asociación Interamericana para la Defensa Ambiental (AIDA)*. <https://aida-americas.org/en/press/declaration-of-a-temporary-reserve-area-in-the-santurban-paramo-is-a-victory-for-the-defense-of-water-in-latin-america>
- amb. (2021, octubre 13). *Fuentes de Agua—Amb—Acueducto Metropolitano de Bucaramanga*. <https://www.amb.com.co/amb/conoce-amb/nuestros-procesos/procesos-operativos/fuentes-de-agua/>
- Bouguerra, S., Stiti, B., Khalfaoui, M., Jebari, S., Khaldi, A., & Berndtsson, R. (2024). Modeling Ecosystem Regulation Services and Performing Cost–Benefit Analysis for Climate Change Mitigation through Nature-Based Solutions Using InVEST Models. *Sustainability*, 16(16), 7201. <https://doi.org/10.3390/su16167201>
- CDMB. (2018). *Plan de Manejo Ambiental Río Surata | PDF | Evapotranspiración | Clima*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/364245600/POMCA-SUBCUENCA-SURATA>
- Chen, J., Kasimu, A., Rehemann, R., Wei, B., Han, F., & Zhang, Y. (2024). Temporal and spatial variation and prediction of water yield and water conservation in the Bosten Lake Basin

based on the PLUS-InVEST model. *Journal of Arid Land*, 16(6), 852-874.

<https://doi.org/10.1007/s40333-024-0101-4>

- Daza, A. R., Vargas, F. E. M., Esparza, B. M., & Ardila, J. P. (2021). *Priorización de alternativas productivas agropecuarias y diagnóstico de mercados para el departamento de Santander*. https://upra.gov.co/Kit_Territorial/2-%20Informaci%C3%B3n%20por%20Departamentos/SANTANDER/Priorizaci%C3%B3n%20de%20Alternativas%20Productivas%20Agropecuarias%20y%20Diagn%C3%B3stico%20de%20Mercados%20para%20el%20Departamento%20de%20Santander2021.pdf.
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., ... Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337-342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- Gerber, J. S., Ray, D. K., Makowski, D., Butler, E. E., Mueller, N. D., West, P. C., Johnson, J. A., Polasky, S., Samberg, L. H., Siebert, S., & Sloat, L. (2024). Global spatially explicit yield gap time trends reveal regions at risk of future crop yield stagnation. *Nature Food*, 5(2), 125-135. <https://doi.org/10.1038/s43016-023-00913-8>
- Gomez Anaya, W. (2023). *Memoria Técnica y Resultados Mapa Nacional de Coberturas de la Tierra, Escala 1:100.000, Periodo 2018. Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia*. https://www.researchgate.net/profile/Wilson-Gomez-Anaya/publication/370947005_Memoria_Tecnica_y_Resultados_Mapa_Nacional_de_Coberturas_de_la_Tierra_Escala_1100000_Periodo_2018_Metodologia_Corine_Land_Cover_adaptada_para_Colombia/links/646bfcdc27938813482dfd46/Memoria-Tecnica-y-

Resultados-Mapa-Nacional-de-Coberturas-de-la-Tierra-Escala-1100000-Periodo-2018-
Metodologia-Corine-Land-Cover-adaptada-para-Colombia.pdf

- Guerry, A. D., Polasky, S., Lubchenco, J., Chaplin-Kramer, R., Daily, G. C., Griffin, R., Ruckelshaus, M., Bateman, I. J., Duraipappah, A., Elmqvist, T., Feldman, M. W., Folke, C., Hoekstra, J., Kareiva, P. M., Keeler, B. L., Li, S., McKenzie, E., Ouyang, Z., Reyers, B., ... Vira, B. (2015). Natural capital and ecosystem services informing decisions: From promise to practice. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(24), 7348-7355. <https://doi.org/10.1073/pnas.1503751112>
- Keller, A. A., Garner, K. L., Rao, N., Knipping, E., & Thomas, J. (2022). Downscaling approaches of climate change projections for watershed modeling: Review of theoretical and practical considerations. *PLOS Water*, 1(9), e0000046. <https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000046>
- MADS. (2025). *Resolución 0221 de 2025* -. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-0221-de-2025/>
- Monfreda, C., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2008). Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 22(1). <https://doi.org/10.1029/2007GB002947>
- Mueller, N. D., Gerber, J. S., Johnston, M., Ray, D. K., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2012). Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*, 490(7419), 254-257. <https://doi.org/10.1038/nature11420>
- Mukhopadhyay, A., Hati, J. P., Acharyya, R., Pal, I., Tuladhar, N., & Habel, M. (2025). Global trends in using the InVEST model suite and related research: A systematic review.

Ecohydrology & Hydrobiology, 25(2), 389-405.

<https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2024.06.002>

Natural Capital Alliance. (2026). *InVEST | Natural Capital Alliance*.

<https://naturalcapitalalliance.stanford.edu/software/invest>

Nel, L. (2024). *Complex evaluation of ecosystem services in agricultural landscapes*.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13483.35360>

Procuraduría General de la Nación. (2023). *Por minería ilegal, aumentan niveles de contaminación con mercurio*. <https://www.procuraduria.gov.co/Pages/por-mineria-ilegal-aumentan-niveles-de-contaminacion-con-mercurio.aspx>

Rodríguez, T., Reu, B., Bolívar-Santamaría, S., Cortés-Aguilar, A., & Buendía, C. (2023). A framework for participatory scenario planning to guide transitions towards sustainability in mountain social-ecological systems: A case study from the Colombian Andes. *Land Use Policy*, 132, 106817. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106817>

Tallis, H., & Polasky, S. (2009). Mapping and Valuing Ecosystem Services as an Approach for Conservation and Natural-Resource Management. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1162(1), 265-283. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04152.x>

Tito, R., Vasconcelos, H. L., & Feeley, K. J. (2018). Global climate change increases risk of crop yield losses and food insecurity in the tropical Andes. *Global Change Biology*, 24(2), e592-e602. <https://doi.org/10.1111/gcb.13959>

Valencia Torres, A., Tiwari, C., & Atkinson, S. F. (2022). Sustaining Human Nutrition in an Increasingly Urban World. *Sustainability*, 14(13), 7607.

<https://doi.org/10.3390/su14137607>

- van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance—A review. *Field Crops Research, Crop Yield Gap Analysis – Rationale, Methods and Applications*, 143, 4-17.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>
- Wang, R., Zhao, J., Chen, G., Lin, Y., Yang, A., & Cheng, J. (2023). Coupling PLUS–InVEST Model for Ecosystem Service Research in Yunnan Province, China. *Sustainability*, 15(1), 271. <https://doi.org/10.3390/su15010271>
- Wei, P., Chen, S., Wu, M., Deng, Y., Xu, H., Jia, Y., & Liu, F. (2021). Using the InVEST Model to Assess the Impacts of Climate and Land Use Changes on Water Yield in the Upstream Regions of the Shule River Basin. *Water*, 13(9), 1250.
<https://doi.org/10.3390/w13091250>
- Xiong, C., Ren, H., Xu, D., & Gao, Y. (2024). Spatial scale effects on the value of ecosystem services in China’s terrestrial area. *Journal of Environmental Management*, 366, 121745.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121745>
- Zhang, X., Zhang, X., Zhang, L., Gu, K., & Gu, X. (2025). Coupling Marxan and InVEST Models to Identify Ecological Protection Areas: A Case Study of Anhui Province. *Land*, 14(7), 1314. <https://doi.org/10.3390/land14071314>
- Zhu, K., Li, S., Huang, W., Hou, P., Liu, Y., Liu, J., & Li, Z. (2025). Integrating the PLUS-InVEST Model to Project Water Conservation Dynamics and Decipher Climatic Drivers in the Chengdu–Chongqing Economic Zone Under Multiple Future Scenarios. *Hydrology*, 12(7), 184. <https://doi.org/10.3390/hydrology12070184>

Apéndices

“Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS”

Apéndice A: Guía Para el Modelo Crop Production Percentil de InVEST

Apéndice B: Salidas de Resultados de InVEST