

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
VICERRECTORÍA DE DOCENCIA
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola

EFFECTO HIDROLÓGICO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO
PEJIBAYE, CARTAGO, COSTA RICA

MARÍA JOSÉ GÓMEZ ASTORGA

CARTAGO, 2020

EFFECTO HIDROLÓGICO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO
PEJIBAYE, CARTAGO, COSTA RICA

María José Gómez Astorga

Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

Isabel Guzmán Arias
Asesor - Lector

Isabel Guzmán Arias
Director Escuela
Ingeniería Agrícola

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

CARTAGO, COSTA RICA

2020

DEDICATORIA

*A mis padres y hermano que siempre me apoyan
incondicionalmente en la parte moral y económica,
además de otorgándome la valiosa oportunidad de estudiar.*

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser quien me colocó y permitió culminar esta etapa de mi vida,

A mi familia por estar presente en toda mi formación educativa,

A mis profesores por transmitirme sus conocimientos y consejos, y

A mis amigos y compañeros que compartieron conmigo esta maravillosa etapa.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	ix
I.INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	5
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	6
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	7
3.1 Uso del suelo.....	8
3.2 Información geoespacial para análisis de uso del suelo.....	9
3.2.1 Teledetección enfocada en sensores pasivos: Landsat, Sentinel 2b.....	9
3.3 Requerimientos de Sensores Remotos y SIG en modelación hidrológica.....	10
3.4 IDRISI: Modelador de cambio de tierras para la sostenibilidad (Land Change Modeler).....	11
3.4.1 Modelación de Cambios Predecibles.....	12
3.5 HydroBID: Modelo de simulación hidrológica para determinar escorrentía superficial.....	13
3.5.1 Parametrización y Datos.....	15
3.5.2 Estadísticas de Calibración De HydroBid.....	16
3.5.3 Cálculos estadísticos.....	17
3.6 Prospectiva: como herramienta de análisis social, económico y ambiental en estudios futuristas de cuenca.....	19
IV METODOLOGÍA.....	21
4.1 Descripción del área de estudio.....	22
4.2 Obtención de datos vectoriales e imágenes satelitales.....	23
4.3 Clasificación de uso de suelo.....	23
4.4 Modelación de cambios de suelo mediante Idrisi.....	25
4.4.1 Probabilidad de cambios predecibles para el año 2025.....	26
4.5 Obtención de la escorrentía superficial por medio del sistema de simulación Hydrobid.....	26
4.5.1 Tipo de suelo.....	26
4.5.2 Interpolación de Datos climáticos.....	27
4.5.3 Herramienta de parametrización.....	28
4.5.4 Calibración y validación del modelo Hydrobid.....	29
4.6 Análisis prospectivo en el manejo ambiental y socioeconómico de la cuenca.....	31
V. RESULTADOS.....	33
5.1 Caracterización de la cuenca del río Pejibaye.....	34

5.2 Clasificación de uso de suelo.....	38
5.3 Modelación de cambio de uso de suelo.	43
5.4 Probabilidad de cambios de suelo para el año 2025.	46
5.5 Obtención de escorrentía superficial.....	48
5.5.1 Tipo de suelo.....	48
5.5.2 Interpolación de datos climáticos.....	48
5.5.3 Herramienta de parametrización.	49
5.5.5 Calibración y validación.	49
5.6 Análisis prospectivo en el manejo ambiental y socioeconómico de la cuenca.	54
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	58
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
VIII. ANEXOS	65

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Descripción de las bandas Landsat-5	9
Cuadro 2. Características de las bandas Landsat-7.....	10
Cuadro 3. Características de las bandas Sentinel.....	10
Cuadro 4. Principales parámetros del GWLF.....	16
Cuadro 5. Paquete de bandas según Satélite.....	23
Cuadro 6. Conjunto de bandas.....	24
Cuadro 7. Clasificación de tipo de uso de suelo en el río Pejibaye.	25
Cuadro 8. Clasificación de textura de suelos.....	26
Cuadro 9. Grupos hidrológicos de Suelos (HSG, por sus siglas en inglés, derivados de las propiedades del suelo.....	27
Cuadro 10. Parámetros de la pre-prospectiva	31
Cuadro 11. Descripción de la red de drenaje.....	35
Cuadro 12. Comparación del cambio de uso de suelo mediante la herramienta SCP Y LCM.....	44
Cuadro 13. Resultado de probabilidad de transición de cambio según Markov.....	46
Cuadro 14. Resultado de probabilidad de cambio según Markov, para el año 2025.....	46
Cuadro 15. Parámetros de calibración del modelo	50
Cuadro 16. Estadísticas de rendimiento de la modelación	51
Cuadro 17. Escorrentía promedio diaria estimada y proyectada.	54
Cuadro 18. Plan general de prospectiva como propuesta aplicable en la cuenca de estudio	55
Cuadro 19. Evaluación ambiental por medio de la matriz Arboleda sobre la variabilidad climática.....	56
Cuadro 20. Resumen de afectación para el año 2025 en la cuenca del Río Pejibaye.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sensores pasivos y activos.....	8
Figura 2. Etapas de la modelación con Hydrobid	15
Figura 3. Proceso de clasificación supervisada.....	24
Figura 4. Herramienta CDI del modelo Hydrobid	28
Figura 5. Pestaña de configuración de datos del modelo Hydrobid.....	29
Figura 6. Parámetros hidrológicos necesarios en la calibración Hydrobid	30
Figura 7. Pasos de calibración múltiple	31
Figura 8. Ubicación de la cuenca del Pejibaye.....	34
Figura 9. Curva hipsométrica.....	36
Figura 10. Diversidad de bosque en la cuenca del río Pejibaye.	37
Figura 11. Clasificación de uso de suelo obtenida para los años propuestos.....	38
Figura 12. Clasificación de uso de suelo obtenida mediante satélite Landsat 7, para el estado de la cuenca en el año 2000.	39
Figura 13. Clasificación de uso de suelo obtenida mediante satélite Landsat 5, para el estado de la cuenca en el año 2008.	40
Figura 14. Clasificación de uso de suelo obtenida mediante satélite Sentinel, para el estado de la cuenca en el año 2013.	41
Figura 15. Clasificación de uso de suelo obtenida mediante satélite Sentinel, para el estado de la cuenca en el año 2018.	42
Figura 16. Cambio neto entre el uso del suelo entre los años del 2013 al 2018.....	43
Figura 17. Persistencia entre el año 2013 y 2018 para la cuenca del río Pejibaye.....	45
Figura 18. Representación visual de la proyección de uso de suelo para el año 2025 en la cuenca del río Pejibaye.....	47
Figura 19. Insumos necesarios para la implementación del modelo Hydrobid.....	48
Figura 20. COMID involucrados en la corrida del modelo.....	49
Figura 21. Obtención del caudal diario observado y calibrado.....	51
Figura 22. Curva de duración de flujo obtenido en la modelación	52
Figura 23. Escorrentía presente en el lapso del año 2000 al 2009	52
Figura 24. Decremento del caudal para el año proyectado.	53

RESUMEN

El cambio en el uso del suelo tiene un impacto en las transformaciones hidrológicas de una cuenca. Este cambio o sucesión vegetal, se refiere al proceso de sustitución de unas coberturas vegetales por otras en el transcurso de un tiempo. Evaluar las situaciones pasadas y del presente es posible gracias a la fotogrametría. Utilizando imágenes obtenidas con los sensores pasivos: Landsat 5, Landsat 7 y Sentinel, se determinan los cambios de uso de suelo del año 2013 y el año 2018 y se muestra un escenario proyectado para el año 2025. Además, se obtiene la variación de escorrentía y el horizonte proyectado al año 2025 de la cuenca del río Pejibaye. La respuesta en la implementación del modelo utilizado de Idrisi Selva, son aumentos en las superficies boscosas, mientras que las zonas urbanas y crecimiento demográfico muestran persistencia en cuanto a cambios. Además, se pronostica mediante el programa hidrológico Hydrobid, una disminución importante en el caudal, una disminución leve de escorrentía superficial y también una disminución en el aporte del flujo base. Se concluye que el aumento de zonas boscosa provoca que la escorrentía superficial no muestre cambios importantes comparado con lo obtenido en la serie temporal evaluada. Finalmente, se establecen recomendaciones para implementar el análisis prospectivo como herramienta integral y útil para el ordenamiento y manejo de la cuenca.

Palabras clave: Cambios de uso de suelo, Escorrentía superficial, Hydrobid, Idrisi Selva.

ABSTRACT

The change in land use has an impact on the hydrological transformations of a basin. This plant change or succession refers to the process of replacing some plant toppings with others over time. Evaluating past and present situations is possible thanks to photogrammetry. Using images obtained with the passive sensors: Landsat 5, Landsat 7 and Sentinel, determine the land use changes of the year 2013 and the year 2018 and show a projected scenario for the year 2025. In addition, obtain the variation in runoff and horizon projected to the year 2025 of the Pejibaye river basin. The answer in the implementation of the model used by Idrisi Selva, are increases in wooded areas, while urban areas and crops experienced persist in terms of changes. In addition, a significant decrease in flow and a decrease in the level of surface runoff is forecast through the Hydrobid hydrological program, as the changes are also not proportional to a decrease in the contribution of the base flow. It is concluded that the increase in forested areas causes that the surface runoff does not show important changes compared to that obtained in the time series tested. Finally, recommendations are recommended to implement prospective analysis as a comprehensive and useful tool for the ordering and management of the basin.

Key words: Land use changes, Surface runoff, Hydrobid, Idrisi Selva.

I. INTRODUCCIÓN

La base de todos los sistemas de producción es el suelo y el recurso hídrico, de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), (2011): “El suelo en conjunto con el agua sustentan la producción de biomasa en general y de productos agropecuarios, en particular. El suelo es el encargado de proveer materias primas, garantizando el secuestro y almacenamiento de carbono, el almacén del patrimonio geológico, facilitando la reserva de agua, el ciclo de nutrientes y la reserva de la biodiversidad”. El cambio de suelo, es entonces trascendental en las transformaciones hidrológicas de una zona, como por ejemplo, Hough (1984) ha determinado: “Si se generan cambios en reducción de la cobertura de árboles y vegetación en el área urbana decrece la evapotranspiración de 40% a 25%; aumenta la tasa de escorrentía de 10% a 30% (especialmente cuando se producen fuertes precipitaciones de tormenta lo que ocasiona desbordes, inundaciones, erosión y difusión de contaminantes); además disminuye el tiempo de retraso entre la iniciación de precipitaciones y escorrentía; y, decrece la infiltración subterránea de 50% a 32%”. Estos antecedentes permiten afirmar que uno de los más notables impactos hidrológicos del reemplazo de coberturas naturales por coberturas impermeables, corresponde al aumento de la escorrentía superficial.

Aguayo, Azócar, Wiegand y Vega, (2006) indican: “actualmente los modelos de cambio de uso se han transformado en una poderosa herramienta de análisis espacial orientada, principalmente, a explorar los variados mecanismos que fuerzan los cambios de uso del suelo y las variables sociales, económicas y espaciales que conducen a esto, permitiendo también proyectar los potenciales impactos ambientales y socioeconómicos derivados de los cambios en el uso del suelo”.

Los modelos de cambio de uso del suelo usan parámetros simples, incluyendo la extensión de las actuales áreas urbanas, condiciones topográficas, cultivos y la existencia de tierras en situación especial. El foco principal en el esfuerzo de la modelación, es la identificación de los factores físicos y socioeconómicos que determinan o condicionan la presión sobre el cambio de uso del suelo en un territorio determinado.

Según la FAO, (2014): “América Latina y el Caribe presenta un gran reto, ya que más de la mitad de los 576 millones de hectáreas de tierras productivas se encuentran con avanzados

procesos de degradación, donde sumado al calentamiento global, la producción de alimentos y la reducción de los recursos naturales generan un panorama integral poco favorable.”

En el caso de Costa Rica a pesar de que posee una ambiciosa política ambiental donde cerca del 27% del territorio está cubierto por algún uso de conservación, la utilización inadecuada de la tierra y los recursos naturales, han disminuido y está en mayor riesgo por el cambio climático, siendo la variabilidad climática y la ocurrencia de eventos extremos amenazas para la gestión sostenible de los recursos hídricos y edáficos del país (Arce, 2004).

En el año 2010 en la República de Argentina como parte de la solución a estos desafíos muestra un análisis de prospectiva denominado: “El futuro ambiental de Mendoza: escenarios”. El estudio consistió en construir escenarios futuros, proyectando el año 2015 y el año 2030. Estos horizontes fueron la base para monitorear el estado del ambiente y construir así, una estrategia básica para el desarrollo sustentable de la provincia de Mendoza y del ordenamiento territorial. El informe se focalizó en tres dimensiones del desarrollo sustentable; a) físico ambiental, b) sociocultural, y c) económico-productivo, con la finalidad de elaborar diagnósticos que permitían comprender en profundidad la situación de la provincia para la formulación de políticas públicas tendientes al desarrollo sustentable y su futuro (Fasciolo,G; Buccheri,M; Gudiño,M; Medalla,A; Papú,O; Vitale,J, 2010).

Las zonas de Jiménez y particularmente de Turrialba, pertenecientes a la cuenca del río Pejibaye han sido vulnerables a la presencia de amenazas, de las que se tienen datos desde la época de la colonización del Valle de Turrialba en el año 1890. Los factores topográficos, climáticos, geológicos y humanos han contribuido conjuntamente al factor de vulnerabilidad.

La información histórica demuestra que a partir del año de 1905 se han presentado precipitaciones y grandes inundaciones que destruyeron casas, puentes, caminos vecinales y provocaron la muerte de algunas personas problemas iguales se han presentado por inundaciones ocurridas en los años 1908, 1928, 1970 y 1983. Nuevamente en el año 1987 los poblados de Jiménez y Turrialba fueron afectadas por eventos similares que ocasionaron la muerte de tres personas, pérdidas en agricultura, destrucción de viviendas, caminos y otras edificaciones. Esta situación condujo a que el gobierno de la República decretar estado de emergencia para esta zona.

Más reciente, el terremoto del 22 de abril de 1991 produjo serios daños en las cuencas principales de los ríos de la zona, se registra que el día 11 agosto del 1993, las laderas inestables cayeron sobre los ríos aumentando el poder de arrastre del agua y el volumen de materiales dentro del cauce. Según la Comisión Especial de Vivienda (CEV), la emergencia provocó daños de consideración en viviendas, de las cuales muchas se declararon inhabitables. Además, se produjeron grandes pérdidas por la destrucción de carreteras, caminos vecinales y puentes (Comisión Nacional de Emergencia, 1993).

Mencionado lo anterior, existe una correlación entre las características geológicas e hidrológicas de la zona, la falta de control de uso del suelo, las técnicas deficientes de construcción y la falta de seguimiento de las normas de construcción, aumentando así, el grado de exposición de las vidas humanas ante la acción de los eventos naturales. Como se mencionó, la utilización inadecuada de la tierra genera cambios importantes en el recurso hídrico y en la degradación de suelos, mostrando escenarios de graves daños y pérdidas. Por tanto este enfoque integral pretende actualizar la información del cambio de uso del suelo tomando en consideración las condiciones hidrológicas de la cuenca para orientar de manera técnica, estrategias hacia alternativas de desarrollo que permita un mejoramiento sustancial de las condiciones en la cuenca del río Pejibaye.

II. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Valorar el efecto del cambio de uso del suelo en las condiciones hidrológicas de la cuenca del río Pejibaye, Cartago, Costa Rica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Determinar los cambios de suelo ocurridos en el año 2013 y su proyección para el año 2025.
- b. Estimar la escorrentía superficial para el año 2025.
- c. Estudiar el análisis prospectivo para la formulación e implementación de los planes de ordenamiento y manejo de la cuenca del río Pejibaye, considerando la interacción de los aspectos económicos, sociales y ambientales de la zona.

III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 Uso del suelo

Un sistema de clasificación de uso y cobertura del suelo permite la armonización de los procedimientos para el manejo de los mismos. Para Zabaleta y Uriarte, (2019): “Al clasificar el tipo de cobertura se obtiene información básica que muestra la problemática de los suelos bajo los aspectos de limitaciones de uso, necesidades y prácticas de manejo que requieren y también suministra elementos de juicio necesarios para la formulación y programación de planes futuros integrales de desarrollo”.

Las tecnologías de información, tanto los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como la Teledetección, son herramientas fundamentales para evaluar los usos de suelos agrícolas y en particular las superficies que han sufrido cambios. La teledetección logra obtener información a distancia de objetos sin necesidad que exista un contacto material. Esto es posible siempre y cuando exista alguna interacción entre los objetos observados; ya sea ubicado sobre la superficie terrestre, marina o en la atmósfera; y un sensor situado en una plataforma (satélite, avión, dron). La interacción que se produce va a ser un flujo de radiación que parte de los objetos y se dirige hacia el sensor, esa interacción es lo que corresponde a la teledetección. Alonso (2013) indica que de los sensores distinguen dos tipos:

- a. Pasivos: Detectan la radiación electromagnética emitida o reflejada por la superficie de la tierra, ejemplo de ellos son los satélites Landsat, Sentinel;
- b. Activos: Generan artificialmente la radiación por medio de fuentes internas, algunos de ellos son el Radar y el Lidar.(Figura 1)

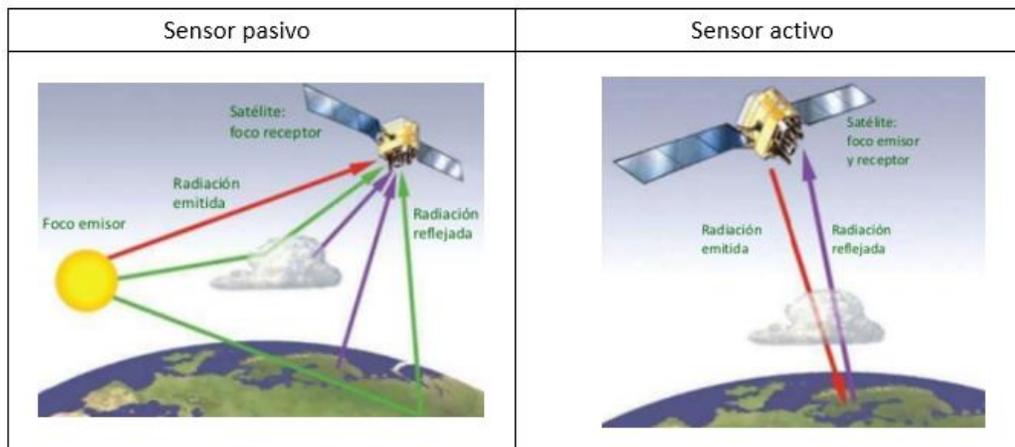


Figura 1. Sensores pasivos y activos. Fuente: De la Fuente, R.(2010)

3.2 Información geoespacial para análisis de uso del suelo.

3.2.1 Teledetección enfocada en sensores pasivos: Landsat, Sentinel 2b

La mayoría de sensores pasivos presentan sensibilidad multispectral, lo cual significa que recogen simultáneamente datos de diferentes bandas espectrales. Las mediciones sobre diferentes zonas del espectro electromagnético, aportan una amplia información sobre distintos aspectos del medio ambiente.

- **Landsat-5:** El satélite fue lanzado el 1 de marzo de 1984 y se dio de baja el 5 de junio de 2013 se ha convertido en el satélite de Observación de la Tierra que más tiempo ha estado operativo. Posee dos sensores: Escáner Multi-Espectral (MSS) y el Mapeo Telemático (TM), ambas con un tiempo de revisita de 16 días. Las características de las bandas se especifican en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Descripción de las bandas Landsat-5

Banda	Descripción	Longitud de onda central (nm)	Resolución (m)
1	Azul	450-520	30
2	Verde	520-600	30
3	Rojo	630-690	30
4	Infrarrojo	760-900	30
5	Infrarrojo	1550-1750	30
6	Infrarrojo térmico	10400-12500	120
7	MID-Infrarrojo	2080-1350	30

Fuente: Fernández, C; Herrero, L.2001

- **Landsat-7:** El satélite cuenta con 8 bandas (Cuadro 2), el cual uno es pancromático y 6 multispectrales y una termal (Banda 6), sus resoluciones radiométricas s de 8 bits.Las resoluciones de las bandas del satélite Landsat son: Pancromática: 15 m; Multiespectral: 30 m; Infrarrojo lejano o termal: 60 m. Tiempo entre imágenes de 16 días.

Cuadro 2. Características de las bandas Landsat-7

Banda Numero	Rango Espectral (µm)	Líneas de Datos por Escáner	Longitud de la Línea (bytes)	Bits por pixel
1	0,450 – 0,515	16	6,600	8
2	0,525 – 0,605	16	6,600	8
3	0,630 – 0,690	16	6,600	8
4	0,775 – 0,900	16	6,600	8
5	1,550 – 1,750	16	6,600	8
6	10,40 – 12,50	8	3,300	8
7	2,090 – 2,35	16	6,600	8
8	.520 - .900 (Pancrom.)	32	13,200	8

Fuente: Fernández, C; Herrero, L.2001

- **Sentinel:** Este satélite pertenece al Programa Copérnico de la Agencia Espacial Europea (ESA), es un ambicioso programa de la teledetección civil. El primer satélite Sentinel-2A fue lanzado el 23 de junio de 2015 y el segundo Sentinel-2B el 7 de marzo de 2017. (ESA,2015). La resolución espacial de Sentinel-2 es dependiente de la banda espectral, en particular vienen con tres resoluciones: 10, 20 y 60 m, como se observa en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Características de las bandas Sentinel

Banda	Descripción	Longitud de onda central (micrómetros)	Resolución (m)
1	Ultra Azul (Costa y Aerosol)	0,443	60
2	Azul	0,49	10
3	Verde	0,56	10
4	Rojo	0,665	10
5	Visible e Infrarrojo cercano (VNIR)	0,75	20
6	Visible e Infrarrojo cercano (VNIR)	0,74	20
7	Visible e Infrarrojo cercano (VNIR)	0,783	20
8	Visible e Infrarrojo cercano (VNIR)	0,842	10
8a	Visible e Infrarrojo cercano (VNIR)	0,865	20
9	Onda Corta Infrarroja (SWIR)	0,94	60
10	Onda Corta Infrarroja (SWIR)	1,375	60
11	Onda Corta Infrarroja (SWIR)	1,610	20
12	Onda Corta Infrarroja (SWIR)	2,190	20

Fuente: León, N.2015.

3.3 Requerimientos de Sensores Remotos y SIG en modelación hidrológica

Actualmente las aplicaciones hidrológicas están prestando una mayor atención a los modelos hidrológicos integrados, que contemplan la componente espacial y temporal de los datos, desarrollando métodos de programación orientada a objetos. Sobre este modelo se pueden ejecutar todas aquellas funciones de la construcción, simulación, modificación y procesamiento de resultados. Así se realiza las aptitudes de los SIG para llevar a cabo

operaciones combinando los tres elementos básicos para la simulación hidrológica a saber:

- a. ecuaciones para la interpretación de procesos hidrológicos;
- b. mapas para la delimitación del área de estudio; y
- c. bases de datos con tablas que caracterizan la región estudiada y los parámetros del modelo. Triviño,A;Morad,M.(2001)

3.4 IDRISI: Modelador de cambio de tierras para la sostenibilidad (Land Change Modeler)

IDRISI Selva es un programa integrado de proceso de imágenes y SIG, desarrollado por Clark University, Dentro de las herramientas de proceso de imágenes, se ubica el modelador de cambio de tierra al problema acuciante de la conversión acelerada de la tierra y a las necesidades muy específicas de la conservación de la biodiversidad (Eastman,2012).

Las herramientas para el modelado del cambio de tierras se organizan secuencialmente en torno a las tareas principales:

- a. Análisis del Cambio
- b. Mapas de Cambio
- c. Tendencia espacial
- d. Armonizar

En el análisis de cambio se evalúa el cambio entre el tiempo 1 y el tiempo 2 entre los dos mapas de cobertura terrestre. Los cambios que se identifican son transiciones de un estado de cobertura terrestre a otro.

Los mapas de cambio corresponden a la representación gráfica de zonas de cambio, coberturas persistentes, mapas de ganancias y pérdidas por cada cobertura, también a transición de una cobertura a otra e intercambios entre las mismas, se puede analizar de un modo visual y sencillo aquellas zonas que presentan valores altos de afectación o por el contrario, incremento en coberturas protegidas.

La tendencia espacial del cambio proporciona la capacidad de mapear las predisposiciones con una tendencia polinómica mejor ajustada al patrón de cambio. Una línea de tendencia polinómica es una línea curva que se utiliza cuando los datos fluctúan. Es útil, por ejemplo, para analizar las pérdidas y ganancias de un conjunto de datos. El orden del polinomio se puede determinar mediante el número de fluctuaciones en los datos o en función del número de

máximos y mínimos que aparecen en la curva. Una línea de tendencia polinómica de Orden 2 suele tener sólo un máximo o un mínimo. Una de Orden 3 normalmente tiene uno o dos máximos o mínimos y así seguidamente (Chaparro,2017).

3.4.1 Modelación de Cambios Predecibles

Conocer los cambios que han ocurrido en el pasado pueden ayudar a predecir cambios futuros, mediante los métodos de Cadena de Markov y en los Autómatas celulares. Es importante hacer énfasis en estos términos. La cadena de Márkov, es un proceso estocástico en el que se parte de:

“Si el estado actual X_N y los estados previos X_1, \dots, X_{n-1} son conocidos la probabilidad del estado futuro es X_{N+1} ”

Dicho de otro modo, es un proceso en el que el estado de un sistema en tiempo 2 se puede predecir por el estado del sistema en tiempo 1 con una matriz de probabilidades de transición de cada clase de cobertura a cada una de las otras clases de cobertura. El módulo Márkov se puede emplear para crear dicha matriz de probabilidad de transición (Reynoso; Valdez; Escalona; Posadas;Perez,2016).

Como entrada, necesita dos mapas de cobertura terrestre y posterior se generan las siguientes producciones:

- a. Una matriz de probabilidad de transición. Ésta es desplegada y almacenada automáticamente. Las probabilidades de transición expresan la probabilidad de que un pixel de cierta clase cambie a cualquier otra clase (o permanezca en la misma) en el próximo periodo de tiempo
- b. Una matriz de área de transición: expresa el área total (en celdas) que se espera cambie en el próximo periodo de tiempo.
- c. Un grupo de imágenes de probabilidad condicional-uno para cada clase de cobertura terrestre. Estos mapas expresan la probabilidad de que cada pixel pertenezca a la clase designada en el próximo periodo de tiempo, los mapas se llaman de probabilidad condicional porque esta probabilidad es condicional en su estado actual.

Por otro lado, uno de los elementos espaciales básicos que motivan la dinámica de muchos eventos de cambio es la proximidad: las áreas tienen una tendencia más alta a cambiar a una

clase cuando hay áreas existentes cercanas de la misma clase (es decir, un fenómeno de expansión). Éstas pueden ser modeladas en forma muy efectiva usando autómatas celulares. Un autómata celular es una entidad celular que varía independientemente su estado basándose en su estado previo y en el de sus vecinos inmediatos según una regla específica. Es similar al proceso Markoviano, pero se diferencia en la aplicación de una regla de transición que depende no solo del estado previo, sino también del estado de los vecinos locales.

En el desarrollo de cualquier modelo de cambios predecibles es importante la validación. Esto es posible lograrlo midiendo el entendimiento que se tiene en el proceso y del poder del modelo haciendo que prever algún periodo de tiempo del cual ya se conocen las condiciones de la cobertura terrestre.

Los módulos para asistir el proceso de validación son dos: Validate que provee un análisis corporativo sobre la base del índice de Acuerdo Kappa. Este es esencialmente una declaración de exactitud proporcional ajustada para el acuerdo de oportunidad.

El coeficiente kappa refleja la concordancia inter-observador y puede ser calculado en tablas de cualquier dimensión, siempre y cuando se contrasten dos observadores. El coeficiente kappa puede tomar valores entre -1 y +1. Mientras más cercano a +1, mayor es el grado de concordancia inter-observador, por el contrario, mientras más cercano a -1, mayor es el grado de discordancia inter-observador. Un valor de $k = 0$ refleja que la concordancia observada es precisamente la que se espera a causa exclusivamente del azar.

El otro módulo de validación es el ROC (Característica Operativa Relativa). Se usa para comparar cualquier declaración acerca de la probabilidad de una ocurrencia sobre un mapa booleano que muestra las verdaderas ocurrencias (Eastman, 2012).

3.5 HydroBID: Modelo de simulación hidrológica para determinar escorrentía superficial.

El objetivo del análisis del sistema hidrológico es estudiar la operación del sistema y predecir su salida. Hydrobid es una herramienta de simulación creada por el Banco Inter-Americano de Desarrollo (BID) para dar soporte a la región de Latino América y el Caribe (LAC) en el manejo y planificación del recurso hídrico.

Hydrobid simula flujos de corrientes en cuencas no intervenidas para condiciones históricas,

actuales o futuras tomando entradas de uso de tierras, precipitación y temperatura. Para la simulación de condiciones futuras, las entradas deben generarse, aplicando el porcentaje esperado de incremento o disminución a los datos actuales de precipitación y temperatura.

Las salidas del modelo para cada cuenca incluyen las siguientes series de tiempo:

- a. Escorrentía superficial diaria,
- a. Flujo de base diario,
- b. Flujo total diario,
- c. Humedad diaria almacenada en el suelo (aproximada promedio, no el valor real),y
- d. Evaporación diaria actual.

En Hidrología superficial, el Coeficiente de Escorrentía es uno de los parámetros fundamentales debido a que representa la porción de la precipitación que se convierte en caudal, es decir, la relación entre el volumen de Escorrentía superficial y el de precipitación total sobre un área (cuenca).

Según Chow; Maidment y Mays, (1994):” El coeficiente de escorrentía superficial, se define como el cociente entre el monto de precipitación de tormenta que escurre en superficie y la precipitación de tormenta. Para determinar la escorrentía superficial existe el modelo desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelo de Estados Unidos (USSCS, son sus siglas en inglés. Este se basa en la teoría sobre el destino de las precipitaciones en función de resultados de empíricos de varias cuencas pequeñas en Estados Unidos”. El modelo del USSCS considera los siguientes parámetros:

- a. Grupo hidrológico del suelo (el cual depende del tipo de drenaje del suelo),
- b. El porcentaje de impermeabilización de cada uso / cobertura de suelo, que también fueron adaptados a la clasificación del USSCS,y
- c. El monto de precipitación de tormenta extrema.

El programa Hydrobid utiliza la estructura de datos y las topologías de red de cuencas y corrientes de la base de datos de Hidrología Analítica (Analytical Hydrographic Dataset), AHD. Éste incorpora los datos mencionados anteriormente: uso de tierras, tipos de suelos, precipitaciones y temperatura dentro del área de estudio, así como los flujos de corrientes observados para usarlos en calibración. Además, por medio del modelo estándar Factor de Carga de Cauces Generalizados - (GWLF, por sus siglas en inglés) en conjunto con una metodología nueva de tiempo de retardo-enrutamiento (lag-routing) desarrollada por RTI genera salidas como una serie de tiempo de proyecciones de flujos de agua, en escala diaria o mensual. (Figura 2)

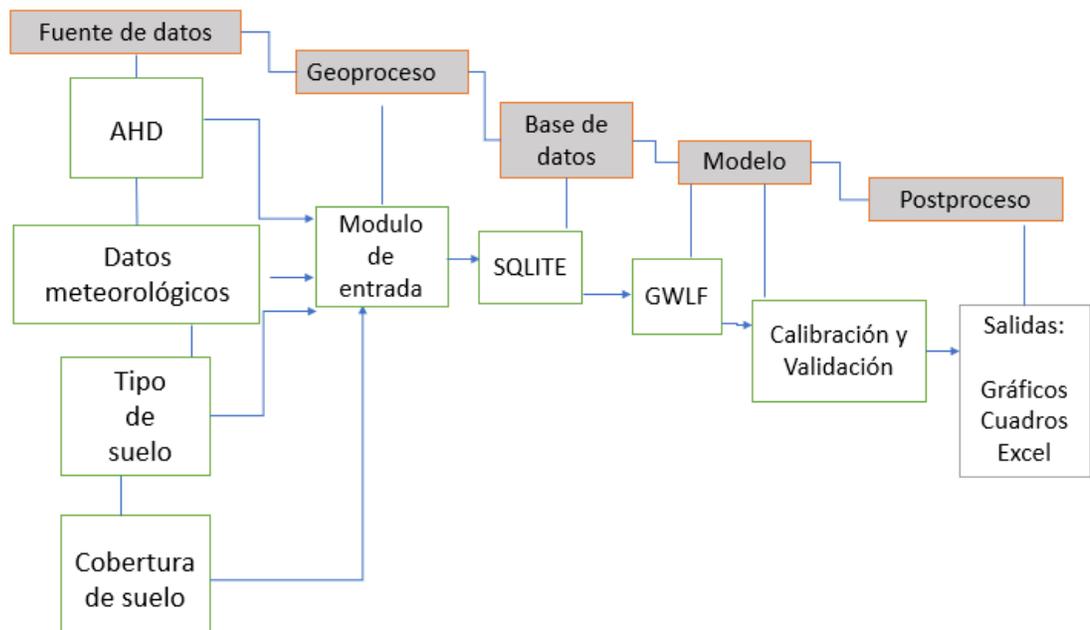


Figura 2. Etapas de la modelación con Hydrobid

Fuente: Elaboración propia

3.5.1 Parametrización y Datos

La mayoría de los parámetros requeridos por el GWLF se acoplan en una base de datos para cada cuenca de la AHD, incluyendo el área de captación y la longitud del arroyo. Los parámetros principales del GWLF se describen en el Cuadro 4.

Cuadro 4.Principales parámetros del GWLF que están relacionados con la generación de flujos

Parámetros	Descripción	Método de Estimación
Capacidad disponible de Agua del Suelo (U*)	Este parámetro activa el inicio de la percolación	Puede ser estimado por las características del suelo.
Número de Curva (CN)	Controla la cantidad inicial de abstracción y usada para calcular la detención	Se escoge usando el uso del suelo y el tipo de clasificación del suelo
Coefficiente de la Curva de Evaporación (CV)	Representa la variación estacional de la evaporación debido al crecimiento de la vegetación	Se estima mensualmente.
Coefficiente de Recesión de Aguas Subterráneas (r)	Controla la tasa de flujo de agua subterránea desde la zona saturada	En estaciones de aforo en las cuencas, el parámetro de recesión puede ser estimado usando técnicas de separación hidrográfica.
Parámetro de Percolación (s)	Controla la tasa de percolación hacia el acuífero de aguas subterráneas profundas	Dependiendo de la formación geológica, los valores de percolación pueden ser muy variables

Fuente: HydroBid

3.5.2 Estadísticas de Calibración De HydroBid.

La calibración es el proceso por el cual se identifican los valores apropiados de los parámetros (P) del modelo de tal manera que la cuenca simulada reproduzca algún aspecto del comportamiento hidrológico observado en la realidad. Hydrobid produce series de tiempo de flujo de corrientes a nivel de cuenca. Esta salida se puede adaptar a una aplicación específica del modelo. Por ejemplo, para fines de calibración, las series de tiempo de flujo simuladas se generan para comparar con aquellas series de tiempo de flujos observadas en las estaciones de aforo. A continuación, se establecen los supuestos que mantiene el programa:

- La serie de flujo observada se supone que no tiene ningún valor faltante para el período de simulación
- Tanto los flujos observados y simulados son en metros cúbicos por segundo (cms)
- Ambas series de tiempo están en un intervalo de tiempo diario
- Para evitar el impacto de la condición inicial de la simulación del modelo, el primer año del período de simulación no será considerado en los cálculos de las estadísticas de rendimiento
- O_t = Flujo observado en el día t
- S_t = Flujo simulado del modelo en el día t.

3.5.3 Cálculos estadísticos.

- **Generar el flujo promedio mensual**

Para ambos flujos observado y simulado, los flujos mensuales promedios $O_{(m,y)}$ y $S_{(m,y)}$ se calculan

$$O_{(m,y)} = \frac{\sum_{t=1}^{NDAYS} O_t}{NDAYS_{my}} \quad (E. 1)$$

$$S_{(m,y)} = \frac{\sum_{t=1}^{NDAYS} S_t}{NDAYS_{my}} \quad (E. 2)$$

Donde m es el mes y y es el año, y $NDAYS$ es el número de días en el mes.

- **Error de volumen general (Overall volume error) (ove)**

$$ove = \frac{\sum_{t=1}^N S_t - \sum_{t=1}^N O_t}{\sum_{t=1}^N O_t} * 100 \quad (E. 3)$$

Donde N es el número de días de la simulación sin el primer año. Tal como se describió antes, el $t=1$ comienza el primer día del segundo año de la simulación.

- **Error de Volumen Anual (Annual volume error) (ave)**

El error de volumen anual utiliza la misma ecuación (E. 3), pero calcula para cada año por separado.

- **Error de Volumen Mensual (Monthly volume error) (mve)**

Para cada uno de los 12 meses, se calcula el error de volumen mensual mediante la ecuación 3.

Por ejemplo, para el mes de enero, todos los flujos en enero de todos los años se suman juntos.

Correlación $-r$

$$r = \frac{N \sum_{t=1}^N O_t S_t - \sum_{t=1}^N O_t \sum_{t=1}^N S_t}{\sqrt{\left[N \sum_{t=1}^N S_t^2 - \left(\sum_{t=1}^N S_t \right)^2 \right] \left[N \sum_{t=1}^N O_t^2 - \left(\sum_{t=1}^N O_t \right)^2 \right]}} \quad (E. 4)$$

- **Coefficiente de correlación modificado (Modified correlation coefficient), r_{mod}**
(McCuen and Snyder, 1975)

$$r_{mod} = r \frac{\min(\sigma_{sim}, \sigma_{obs})}{\max(\sigma_{sim}, \sigma_{obs})} \quad (E. 5)$$

Donde σ_{obs} y σ_{sim} son desviaciones estándar de las series de tiempo de flujos observadas y simuladas, respectivamente. Ver la Ecuación 8 para calcular las desviaciones estándar.

- **Índice de Eficiencia de Nash- Sutcliffe, R^2**

$$r^2 = 1.0 - \frac{\sum_{t=1}^N (S_t - O_t)^2}{\sum_{t=1}^N (O_t - \mu_o)^2} \quad (E. 6)$$

Donde μ_o es la media (promedio) del flujo observado.

$$\mu_o = \frac{\sum_{t=1}^N O_t}{N} \quad (E. 7)$$

$$\sigma_o = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (O_t - \mu_o)^2}{N - 1}} \quad (E. 8)$$

Al igual que en los modelos de cambio de uso de suelo, dentro de los modelos hidrológicos se utilizan para pronosticar caudales para un periodo de tiempo futuro. Para lo cual se debe asegurar que el modelo que funciona actualmente se ajustará también al escenario futuro. Esto conlleva a complementar el proceso de calibración con el proceso de validación. Refsgaard y Knudsen (1996) definen la validación de un modelo como “el proceso de demostración que el modelo es capaz de hacer predicciones en un lugar específico determinado para periodos fuera del período de calibración”. Además, la validación se puede llevar a cabo:

- Usando una parte (aproximadamente 1/3 de los datos) del registro de datos (climáticos y caudal).
- Consiste en correr el modelo con los valores de los parámetros obtenidos en el proceso de calibración, pero utilizando otro rango de tiempo de la estación de caudales u otra estación en la misma cuenca.

Los resultados de la validación se evalúan de la misma manera que la calibración: comparación gráfica, análisis de correlación y error en el volumen de los resultados del modelo y los datos observados (Hydrobid,2014).

3.6 Prospectiva: como herramienta de análisis social, económico y ambiental en estudios futuristas de cuenca

La evaluación de impacto es un procedimiento metodológico, por el cual se logra saber el significado (valor) que los diferentes actores les dan a las actividades, los recursos utilizados y los resultados del proyecto que se quiera realizar. Ésta muestra el proceso de cómo los beneficiarios del proyecto se apropian de los conocimientos, servicios y apoyos proporcionados por el proyecto, y cómo los adaptan a sus circunstancias de vida para convertirlos en oportunidades de desarrollo individual y colectivo. (Martinez,2005). En todo análisis de proyecto existen siempre 3 ejes principales de análisis: económico, social y ambiental y este al ser un estudio hidrológico, el cual involucra territorio a mayor escala, se estudia la prospectiva como herramienta de uso en este segmento.

La prospectiva es una forma de ver la planeación del desarrollo territorial de manera futurista, es decir, pensando cómo es, cómo puede ser y/o cómo queremos que sea la cuenca. Se parte del conocimiento de la realidad, realizando un análisis que permite brindar alternativas de escenarios posibles, para conocer los impactos y consecuencias en un horizonte de tiempo definido en donde se reflejen acciones concretas que deban ser adelantadas y gestionadas por los actores sociales de la cuenca. Esta forma de planeación visualiza el modelo territorial futuro o deseado en un horizonte de 15 años o más y plantea escenarios o situaciones que pueden presentarse, dependiendo del grado de intervención planificadora y ordenadora. Esta etapa se adelanta a partir del diagnóstico, que aporta información sobre las variables claves o aspectos más importantes que determinan el desarrollo territorial. Para construir los diferentes escenarios es indispensable hacer talleres donde estén debidamente representados los diversos grupos o actores sociales. En este sentido, la prospectiva permite:

- a. Crear imágenes, visiones compartidas del futuro fundadas sobre estrategias de desarrollo a largo plazo y la definición de acciones a mediano y corto plazo.

- b. Seleccionar un futuro, ser el artífice de él, en vez de asumirlo o ser víctima de ello. La prospectiva navega entre el fatalismo “no se puede nada” y la ilusión Utópica “se puede todo”.
- c. Hacer surgir nuevas ideas.
- d. Aumentar el éxito del proyecto territorial: planes, esquemas, programas (Fasciolo,G; Buccheri,M; Gudiño,M; Medalla,A; Papú,O; Vitale,J, 2010).

IV METODOLOGÍA

4.1 Descripción del área de estudio

La cuenca del río Pejibaye forma parte de la Cordillera de Talamanca, su altura máxima es de 2702 y la mínima de 630 m.s.n.m. Tiene una precipitación promedio anual de 5374 mm y una temperatura promedio anual de 23 °C.

La cuenca del Río Pejibaye aporta al recurso hídrico ya que al ser parte del Reventazón concentra gran parte de represas generadoras de hidroelectricidad, dos de gran importancia Angostura (Turrialba) y Cachí. Se estima que genera el 38% de la electricidad que se utiliza en Costa Rica y el 50% de la producción de cemento. Además, abastece a la población de recursos fundamentales: el 50% del agua que consume el área metropolitana de San José es producida en la cuenca, y a través de sus áreas protegidas conserva importantes recursos naturales. (Inder,2014)

En cuanto a la distribución política, la unidad de división administrativa y territorial pertenecientes a la cuenca del Río Pejibaye, se encuentra definida en la provincia de Cartago dentro los cantones de Jiménez y Paraíso. El cantón de Paraíso es el número 2 de la provincia, cuenta con un área de 411,91 km² ,su ciudad cabecera de igual manera se llama Paraíso y se encuentra ubicada aproximadamente a 8 km al sureste de la ciudad de Cartago, por lo que forma parte de su área metropolitana. Jiménez está comprendido por una superficie de 286,43 km², y corresponde al cantón número 4 de la provincia de Cartago, cuya ciudad cabecera es Juan Viñas. El territorio perteneciente al cantón de Jiménez se encuentra administrativamente separado a nivel cantonal del territorio Turrialba, sin embargo, debido a su cercanía geográfica y similitud en cuanto a actividades productivas y condiciones climáticas, se han unificado para el desarrollo de planes y rumbos en conjunto que aseguren el bienestar humano, de forma sustentable y sostenible con el medio ambiente. (Inder,2016)

Además, la cuenca está rodeada por gran protegida, en ella se ubica el Parque Nacional Tapantí, que comprende distintos tipos de bosques, tales como el Bosque Montano Bajo, El Bosque Premontano y Montano. El Bosque Montano bajo es un bosque sumamente húmedo, que posee rango de precipitación oscila entre los 2800 mm a los 3200 mm, como promedio anual, sin embargo, presenta un promedio efectivamente seco moderado entre 2 a 4 meses de baja altura (20-30 m). El bosque premontano también es llamado bosque muy húmedo

premontano y se caracteriza por una precipitación superior a los 4000 mm anuales. Este tipo de clima es adaptable para el desarrollo de actividades agropecuarias sostenibles debido a la excesiva precipitación y la alta tasa de humedad predominante. En esta zona, los bosques se caracterizan por ser siempre verdes.

En cuanto al bosque Montano, los rasgos más particulares del ambiente físico de esta zona de vida son: alta radiación, variaciones marcadas en temperatura y humedad relativa, alta evaporación y suelos poco estables. El rango de precipitaciones en el bosque Montano rondan entre 2200 mm y 4500 mm anuales como promedio. Esta formación se encuentra en alta Talamanca y pequeñas extensiones en la cima de los volcanes Irazú, Turrialba, Poás y Barba. Este bosque es siempre verde, de altura baja a intermedia y con dos estratos de árboles (Quesada,2007).

4.2 Obtención de datos vectoriales e imágenes satelitales.

Mediante el Atlas Digital (2013), se accedió a la base de datos simple y se logró obtener información importante de la cuenca del río Pejibaye: poblados, ríos, división política, carreteras y caminos, permitiendo la descripción de la cuenca.

Para descargar las imágenes satelitales se utilizó la plataforma digital: Earth Explorer. A la hora de realizar la búsqueda se seleccionaron los productos que presentaban un menor porcentaje de nubosidad, esto con el objetivo de lograr posteriormente, una clasificación del uso de suelo más detallada. Las imágenes que permitió visualización se muestran en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Paquete de bandas según Satélite

Nombre	Satélite	Fecha
LMLE07_L1TP_015053_20001221_20170208_01_T1	Landsat 5	8/2/2017
LT05_L1TP_015053_20080610_20161031_01_T1	Landsat 8	31/06/2008
L1C_T16PHS_A009232_20181212T160504	Sentinel 2B	12/12/2018
L1C_T16PHS_A006239_20130212T160504	Sentinel 2B	12/2/2013

4.3 Clasificación de uso de suelo.

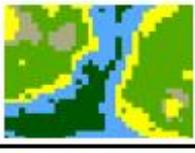
Haciendo uso del complemento de clasificación supervisada de la plataforma QGis, se siguieron los siguientes pasos:

- Corrección atmosférica de las imágenes satelitales,
- Recorte de las imágenes al área en estudio,
- Creación del conjunto de bandas (Cuadro 6), y
- Creación de áreas de entrenamiento, la cual se clasifica de acuerdo al uso del suelo (Figura 3).

Cuadro 6. Conjunto de bandas

Satélite	Fecha	Nombre de banda			Composición		
		Infrarrojo Medio	Infrarrojo Cercano	Rojo	R	G	B
Landsat 5	8/2/2017	4	3	2	4	3	2
Landsat 8	31/06/2008	6	5	4	4	5	3
Sentinel 2B	12/2/2013	11	8	4	11	8	4
	12/12/2018						

Figura

Tonalidad por año	Imagen producto combinación natural	Identificación de elementos en la SCP
2000 (Landsat 7)		
2008 (Landsat 5)		
2013 (Sentinel)		
2018 (Sentinel)		

3. Proceso de clasificación supervisada.

Para la cuenca del río Pejibaye se aplicó la siguiente categorización de uso de suelo (Cuadro 7).

Cuadro 7. Clasificación de tipo de uso de suelo en el río Pejibaye.

Tipo de Uso de Suelo
Tierras Urbanas y asentamientos humanos
Suelo seco
Tierras agrícolas
Bosque
Cuerpos de agua

Al definir los tipos de suelo se procedió a crear las clasificaciones, basado en el cuadro anterior y mediante la herramienta SCP de QGIS.

4.4 Modelación de cambios de suelo mediante Idrisi.

Para obtener el análisis de cambios de uso de suelo se utilizó la herramienta “Land Change Modeler” de Idrisi Selva, donde se seleccionaron las imágenes con las coberturas del año 2013 y del 2018. Estas 2 imágenes fueron tomadas porque compartían tipo bytes, igual número de categorías en la misma secuencia y numeración, además de las dimensiones espaciales incluyendo la resolución y georreferenciación.

El análisis de cambios proporcionó gráficos del cambio de uso de suelo entre los dos mapas de las fechas especificadas anteriormente. Se realizó la representación gráfica de las ganancias y pérdidas por categoría de cobertura vegetal y también los cambios experimentados por una sola cubierta terrestre. Estos datos seguidamente fueron comparados con las clasificaciones de uso de suelo obtenidas con el complemento SCP de QGIS.

Posterior se crearon una variedad de mapas de cambio, incluyendo los mapas anteriores de persistencia, ganancias y pérdidas, transiciones e intercambios. Se ignoraron transiciones, es decir, se filtró las transiciones menores que pueden ser el resultado de errores de mapa.

Respecto a la aplicación de modelador de cambio de suelo, al ser complejos los patrones de cambio y difíciles de descifrar, el panel proporcionó la capacidad de mapear las tendencias con una superficie de tendencia polinómica mejor ajustada al patrón de cambio, se utilizó el valor de 5to orden que es buena para una visión general muy amplia.

A partir de los mapas y datos obtenidos, se obtuvieron los principales cambios estadísticos y se mapeó las zonas con mayores cambios, haciendo un análisis de los resultados obtenidos.

4.4.1 Probabilidad de cambios predecibles para el año 2025.

Al tener el conocimiento de los cambios que han ocurrido en el pasado, entre las fechas del 2013 y 2018, mediante la probabilidad de Cadena de Markov, se predijo el uso de suelo al año 2025 y además se permitió validar sobre la base del índice Kappa y realizar su análisis respectivo.

4.5 Obtención de la escorrentía superficial por medio del sistema de simulación Hydrobid.

Seguidamente se prepararon los insumos del modelo hidrológico de Hydrobid;

4.5.1 Tipo de suelo.

Con el mapa Digital Mundial de Suelos de la FAO-UNESCO. a escala 1:5,000,000, se sobrepuso la capa definida como área de estudio, para determinar el tipo de suelo presente en el río Pejibaye, asociado a los valores de clasificación de suelos según USDA (Cuadro 8) posteriormente, el tipo de suelo dominante se clasificó con un grupo hidrológico de suelo basado en la clasificación (Cuadro 9) del U.S. Department of Agriculture (USDA)

Cuadro 8. Clasificación de textura de suelos.

Código	Valor
1	Arcilla (pesado)
2	Arcillo Limoso
3	Arcilla (liviano)
4	Franco Arcillo
5	Franco Arcilloso
6	Limo
7	Franco Limoso
8	Arcillo Arenoso
9	Franco
10	Franco Arcillo
11	Arena
12	Arenoso Franco
13	Franco Arenoso

Fuente: USDA.(1986).

Cuadro 9. Grupos hidrológicos de Suelos (HSG, por sus siglas en inglés, derivados de las propiedades del suelo).

HSG	Textura del Suelo según la USDA	Suelo	Propiedad
A	11, 12, 13	Arena, arenoso franco, o franco arenoso	Bajo potencial de escorrentía y altas tasas de filtración, aun cuando completamente húmedo; consiste principalmente de arenas o grava de bien a excesivamente drenadas
B	6, 7, 9	Franco limoso, franco, o limo	Infiltración moderada y consiste principalmente en suelo con textura entre fina a moderadamente gruesa.
C	10	Franco arcillo arenoso	Infiltración baja cuando completamente húmedo y consiste principalmente de suelos con texturas entre moderadamente finas a finas.
D	1, 2, 3, 4, 5, 8	Franco arcilloso, franco arcilloso arenoso, arcilloso arenoso, arcilloso limoso, o arcilla	Potencial más elevado de escorrentía, muy baja infiltración cuando completamente húmedo y consiste principalmente en suelos arcillosos.
0		Agua	

Fuente: Hong, Y; Adler, R; Hossain, F; Curtis, S; Huffman, G. (2007)

Hydrobid contiene un sistema de cuencas y ríos delineado, mediante la base de datos de hidrología analítica (AHD), el cual se incluyó al software QGIS lo que permitió la identificación del patrón de drenaje aguas arriba y aguas debajo del río Pejibaye.

4.5.2 Interpolación de Datos climáticos.

Los datos de precipitación y caudal fueron tomadas de estaciones del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y del Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Para los caudales se tomaron de las estaciones llamadas: Pejibaye, Oriental y el Humo. Los datos de temperatura fueron obtenidos de la plataforma virtual Giovanni de la NASA, obteniendo datos para 3 puntos dentro de la cuenca. Estos se organizaron en formato que solicita Hydrobid, mediante archivos en formato abierto o .csv, para lograr que así que el modelo procesara dicha información.

Una vez ordenados los datos mencionados anteriormente, se recurrió a generar las coordenadas de los centroides de todas las sub-cuencas, así como las coordenadas de las estaciones climáticas, con el propósito de generar mediante la técnica conocida de Distancia Inversa Ponderada (IDW), la interpolación espacialmente entre las subcuencas. Luego de obtener los datos interpolados, automáticamente fueron guardados a la base de datos llamada SQLite, que a su vez es la ruta de la base de datos que se utilizó en la corrida de la herramienta.

Además, se configuró la herramienta de Interpolación de Datos Climáticos mediante el ingreso de datos de: fecha a realizar la simulación, la base de datos, COMID de la cuenca, las tablas de datos interpolados y demás datos que solicita la herramienta, tal y como se muestra en la interfaz del programa (Figura 4).

Figura 4. Herramienta CDI del modelo Hydrobid. Fuente:Hydrobid

Una vez obtenido los valores diarios interpolados para cada una de las sub-cuencas, se creó un cuadro en la base de datos con la información.

4.5.3 Herramienta de parametrización.

Los cuadros de número de curva (NC) se crearon por medio del instrumento de parametrización. Esta herramienta, al igual que la antes mencionada, la AHD, es parte del complemento de software QGIS y es importante mencionar que, la herramienta funciona solamente con la versión del programa 2.18 “Las Palmas”. En este apartado la conformación y preparación de insumos se hizo mediante:

- a. La creación de una capa (shapefile) solo con las cuencas que serán parametrizadas, otra de cobertura de suelo (realizada previamente de la clasificación supervisada) y del tipo de suelo (obtenida del mapa de la FAO).
- b. Conformación de una lista en formato .csv del descriptor o símbolo del atributo de la capa de uso del suelo que se asoció a un número de ndcl como se ejemplifica en el Anexo 1. Es importante mencionar que hubo la misma cantidad de símbolos como segmentos (pixeles) obtenidos de la clasificación supervisada. En el caso de la cobertura del año 2008, la cual se utilizó para este ejercicio, la cantidad de datos sobrepasó 117 mil valores.

Además, el nombre de la columna en la tabla de búsqueda debió coincidir con el de la tabla de atributos.

- c. Para el tipo de suelo, se implementó similar al paso anterior, es decir, una capa vectorial con la textura de suelo y un documento en formato abierto (.csv) donde los descriptores de los atributos de los suelos debieron ser únicos, pero no fue necesario que el grupo hidrológico de suelos lo fuera, el grupo hidrológico asignado fue seleccionado de acuerdo al cuadro 9. El Anexo 2 muestra cómo se preparó el archivo.

Teniendo los insumos anteriores se agregaron a la herramienta de parametrización, visibles en el Anexo 3, obteniendo así los nuevos valores del número de curva (Anexo 5), que fueron mostrados en la SQLite y disponibles en el simulador de Hydrobid.

4.5.4 Calibración y validación del modelo Hydrobid.

Se dirigió al programa de Hydrobid y todos los insumos previamente descritos fueron incorporados (Figura 5). El COMID utilizado en la calibración fue el :212599300, perteneciente al caudal de la estación Pejibaye.

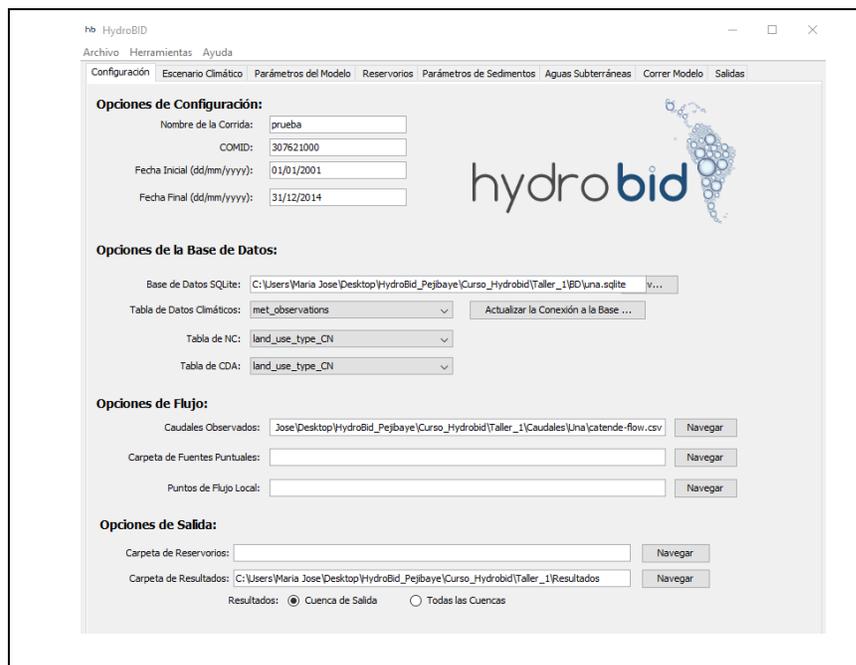


Figura 5. Pestaña de configuración de datos del modelo Hydrobid. Fuente: Hydrobid

Adicionalmente se cargó la información de caudales, la tabla creada con la herramienta de parametrización y los parámetros hidrológicos (Figura 6) que representaban situaciones que

afectan los resultados del modelo, se modificaron de manera manual, es decir, se empezaron a calibrar.

Parámetros Hidrológicos:

Velocidad del Flujo: Obtener Latitud de la Base de Datos

Latitud (decimales): Guardar Percolación Profunda

Comienzo de la Temporada de Cultivo (día juliano):

Final de la Temporada de Cultivo (día juliano):

COMID de Calibración Aguas Arriba:

	Valor Único	Multiplicador	Usar Calibrado	Reemplazar Todos	
Numero de Curva (NC):	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="text" value="0.8"/>
Contenido Disponible de Agua (CDA):	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="text" value="1.2"/>
Coef. de Recesión (r):	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="text" value="0.01"/>
Coef. de Percolación (s):	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="text" value="0.001"/>
Factor de ET en Temporada de Cultivo:	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="text" value="1"/>
Factor de ET en Temporada Latente:	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="text" value="1"/>
Porcentaje de Cobertura Impermeable:	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="text" value="1.0"/>
Umbral de Temperatura:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="text" value="1"/>
Factor de Fusión:	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="text" value="1"/>

Figura 6. Parámetros hidrológicos necesarios en la calibración Hydrobid. Fuente:Hydrobid

Donde:

- Número de Curva (NC): Controla la cantidad inicial de abstracción utilizada para calcular la escorrentía
- Contenido Disponible de Agua (CDA): Contenido Disponible de Agua. Activa el inicio de la percolación
- Coefficiente de Recesión (r): Controla la tasa de flujo de agua subterránea desde el almacenamiento saturado
- Coefficiente de Percolación (s): Coeficiente que controla la tasa de filtración en el acuífero subterráneo
- Factor de ET en Temporada de Cultivo: Factor de evapotranspiración durante la temporada de crecimiento
- Umbral de Temperatura: Temperatura que clasifica la precipitación como lluvia o nieve
- Factor de Fusión: Factor que controla la tasa a la cual se derrite la nieve

Se dispuso a generar el modelo, obteniéndose así resultados en la calibración y al evaluar las estadísticas obtenidas de desempeño, los hidrogramas simulados y observados y las curvas de duración de caudal, se procedió nuevamente a realizar ajustes en los parámetros hasta obtener un resultado satisfactorio. En Hydrobid, se va calibrando la cuenca entera de aguas arriba hacia

el punto de cierre de la cuenca o hasta el punto de aforo más aguas abajo, por lo que para realizar la calibración múltiple se siguieron los pasos expuestos en la Figura 7.

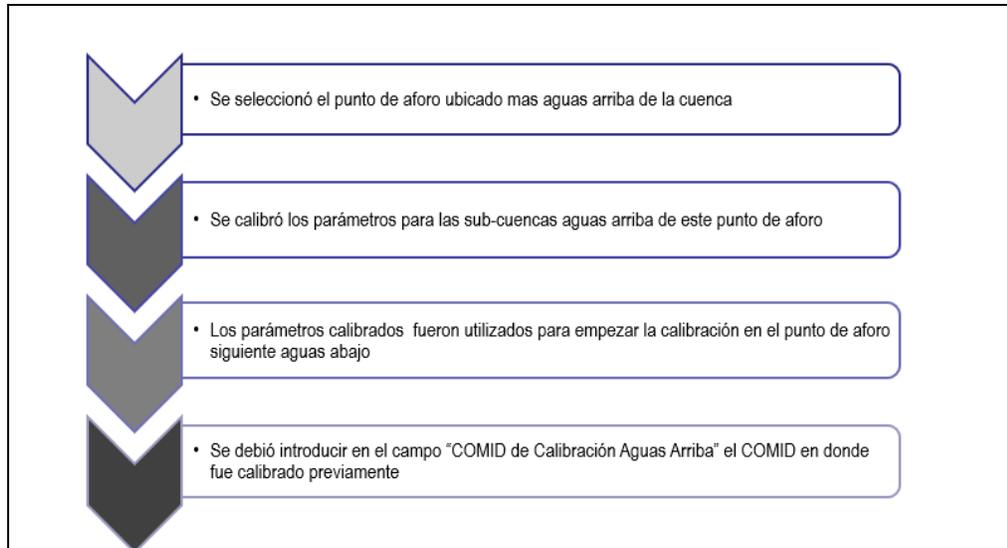


Figura 7. Pasos de calibración múltiple. Fuente:Elaboración propia.

Posteriormente se realizó la validación del modelo con la cuenca ya calibrada y se realizó la proyección a futuro tomando en cuenta variables de precipitación y temperatura, es decir la respuesta ante el cambio climático.

4.6 Análisis prospectivo en el manejo ambiental y socioeconómico de la cuenca.

Para el ejercicio de prospectiva tecnológica se tomó como base metodológica el estudio de prospectiva denominado: “El futuro ambiental de Mendoza” para construir escenarios futuros que sirvan para monitorear el estado del ambiente y construir así una estrategia básica para el desarrollo sustentable de la cuenca de estudio.

Inicialmente hubo una primera fase de pre-prospectiva (Cuadro 10), la cual refería a la preparación del estudio que integra las variables que a continuación se establecen

Cuadro 10. Parámetros de la pre-prospectiva

Objetivo	Organización Fortalecimiento de capacidades
Delimitación	
Horizonte Temporal	
Dimensión	
Foco	

Fuente: Blanco, Ragno, Ragno, & Vitale,(2015)

En segundo lugar, se prosiguió con una etapa de diagnóstico multidimensional y dinámico, entendiéndose dinámico por los diversos actores que tuvieron participación, diagnóstico que permitió explicar el pasado y el presente de la dimensión físico-ambiental de la provincia, es decir, realizar un estudio de los elementos sobre los procesos de cambio crítico que se visualizan a futuro. Para esto, se desarrolló un sistema de indicadores sintéticos del ambiente de la provincia, haciendo uso de la matriz arboleda, en cuanto a EIA, se determinó el ámbito hasta donde se pueden extender las consecuencias ambientales de la cuenca ante la respuesta del cambio climático, con el fin de identificar las herramientas necesarias para la construcción de escenarios futuros que sirvieran para monitorear el estado del ambiente y proponer recomendaciones en el ámbito ambiental y sociocultural, principalmente.

V. RESULTADOS

5.1 Caracterización de la cuenca del río Pejibaye

La cuenca del río Pejibaye tiene una superficie aproximada de 260 km² (Figura 8). El punto de aforo de la cuenca de estudio desemboca en la cuenca del Río Reventazón y esta constituye la tercera en importancia en cuanto al área del territorio nacional, es significativa debido a que es donde se concentran los poblados y se desarrollan la mayoría de las actividades productivas del país. Los poblados del Distrito de Pejibaye corresponden a Alto Humo, Cacao, Cantarrana, Casa de Teja, Ceiba, Chucuyo, Esperanza, Gato, Humo, Joyas, Juray, Omega, Oriente, San Gerardo, Selva, Taus, Tausito, Yolanda y Zapote.

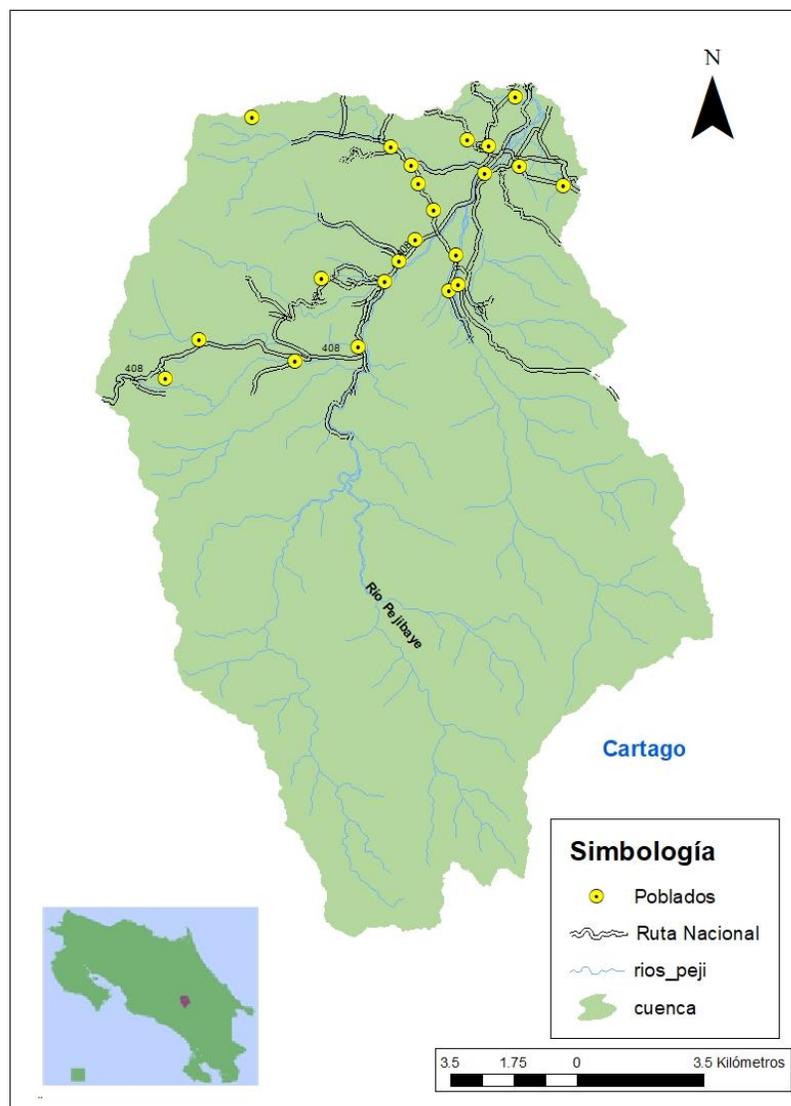


Figura 8. Ubicación de la cuenca del Pejibaye.

El río Pejibaye cuenta con una extensión de 56,08 km, sus afluentes son los ríos Pejibayito, Tepemechin, Vueltas, Cacao Humito Humo, Taus que recibe a Tausito; también el río Escopeta y su tributario Palmita; el Gato y su afluente Marta; y las quebradas Honda y Hamaca; lo mismo que por los ríos Turrialba, Colorado y la quebrada Esmeralda. Estos cursos de agua, excepto los ríos Reventazón y Atirro, nacen en el cantón de Jiménez; los cuales presentan un rumbo en diversas direcciones. Los ríos Reventazón, Turrialba, Colorado, Atirro, Maravilla, Pejibaye, Taus, Tausito y las quebradas Honda, Hamaca y Esmeralda son límites cantonales, los cuatro primeros y la quebrada Esmeralda con Turrialba; el quinto con Alvarado; y los otros con Paraíso. En el Cuadro 11, se detalla el nombre de los ríos y su longitud en m.

Cuadro 11. Descripción de la red de drenaje.

Nombre	Longitud del cauce (km)
Río Pejibaye	56,081
Río Pejibayito	7,726
Río Cacao	4,947
Río Escopeta	16,125
Quebrada Palmital	1,593
Río Vueltas	2,06
Río Humo	7,874
Río Taus	6,153
Quebrada Selva	1,546
Río Perlas	4,615
Río Tausito	3,126
Río Marta	5,758
Río Tepemechin	1,426
Quebrada Danta	2,788
Río Gato	15,935
Quebrada Noneco	2,526
Quebrada Nonequito	2,783
Quebrada Limones	1,445
Río Tausito	3,699
Quebrada Pistola	2,911
Quebrada Juray	0,930

Nombre	Longitud del cauce (km)
Quebrada Lajas	1,263
Río Humito	1,281
Quebrada Azul	1,936
Quebrada San Fernando	1,699
Río Palmita	0,861
Quebrada Delicias	1,45
Quebrada Honda	1,485
Quebrada el Cruce	1,454
Quebrada Zapote	0,084
Quebrada Pirisi	1,261
Río Noneco	2,455
Quebrada Chanchera	3,178
Quebrada Guaro	1,801
Quebrada los Tarros	1,088
Acequia	0,705

La cuenca tiene un relieve de llanura ondulado, con cotas que varían entre los 2400 m en la cabecera y 800 m en la desembocadura. La pendiente promedio es de 0,42 m/m, según se muestra en la Curva Hipsométrica (Figura 9), en su parte alta presenta un proceso de transición (de alto potencial erosivo a procesos erosivos estables) y en su parte inferior tiende a hacer una cuenca sedimentaria.

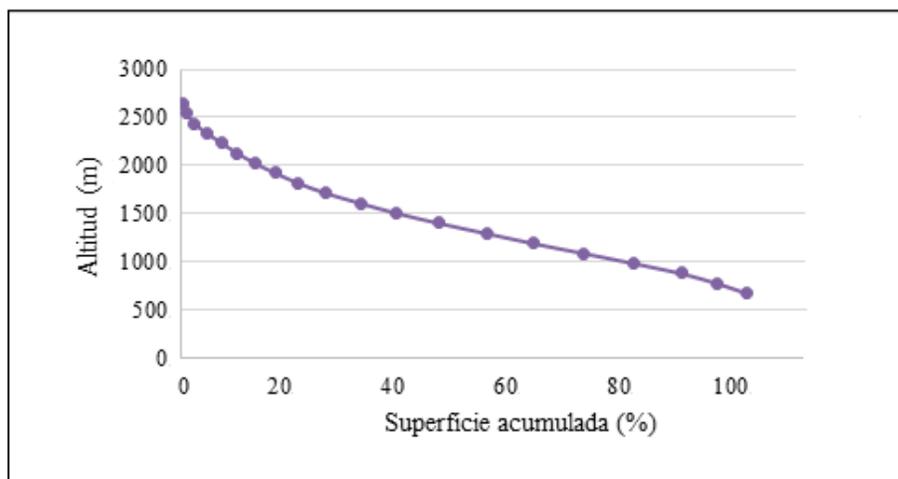


Figura 9. Curva hipsométrica

La cuenca en estudio, tiene cuatro zonas de vida: Bosque Pluvial Montano Bajo, Bosque Pluvial Premontano, Pluvial Montano y Montano Bajo (Figura 10).

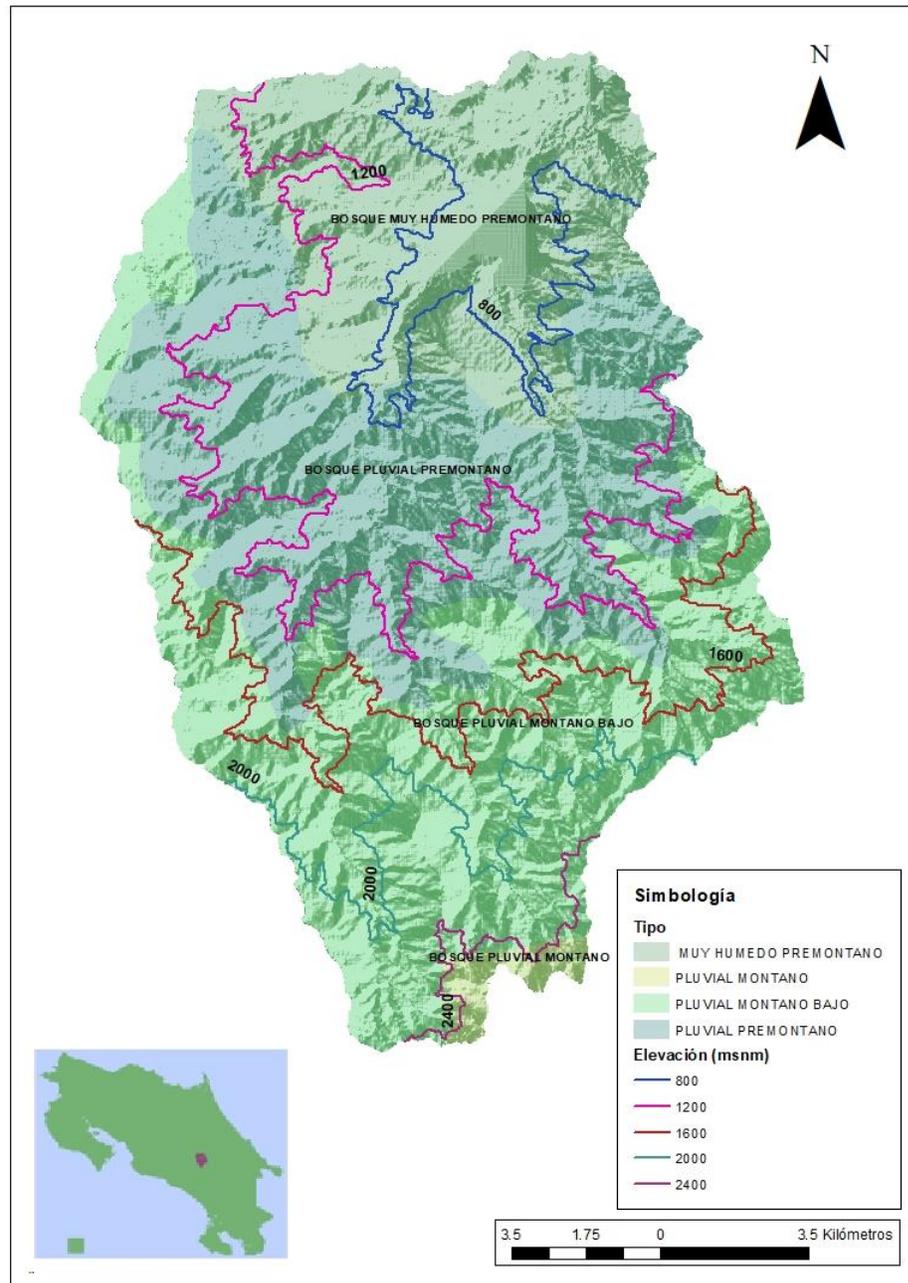


Figura 10. Diversidad de bosque en la cuenca del río Pejibaye.

5.2 Clasificación de uso de suelo

Al realizar la clasificación del suelo se muestra las diferencias en cuanto resolución por los distintos grupos de satélites para los años en análisis (Figura 11). En general se evidencia que los cambios más notorios se dan entre los años 2000 al 2008 como el uso de bosque y cultivo muestra un incremento entre los años 2000 y 2008. En cuanto a los asentamientos urbanos se muestra un decremento, y esto se liga al descenso demográfico indicado por el Instituto Nacional de Encuesta y Censo (INEC). Respecto a los cuerpos de agua se indica una disminución, sin embargo, observando el mapa (Figura 12), se aprecia como el modelo para esta clasificación asignó espacios de sombras como cuerpos de agua, ante esto visualmente la variación cromática observada en la composición en color mostró que pese a tener imágenes libres de nubes se identificaron elevaciones como regiones de tonalidad oscura, que fueron asociadas a sombras provocadas por la orografía de la cuenca.

Con respecto a los resultados de los años 2008, 2013 y 2018, se provee información de fácil identificación (cultivo, suelo seco, infraestructura, etc.) y el comportamiento lineal responde a pequeños cambios en la superficie. La Figura 13, siendo obtenida con el satélite Landsat 7, muestra identificación robusta en comparación a las imágenes del sensor Sentinel, del año 2013 (Figura 14) y 2018 (Figura 15) que detallan mayormente por la resolución espacial en las bandas comprendidas.

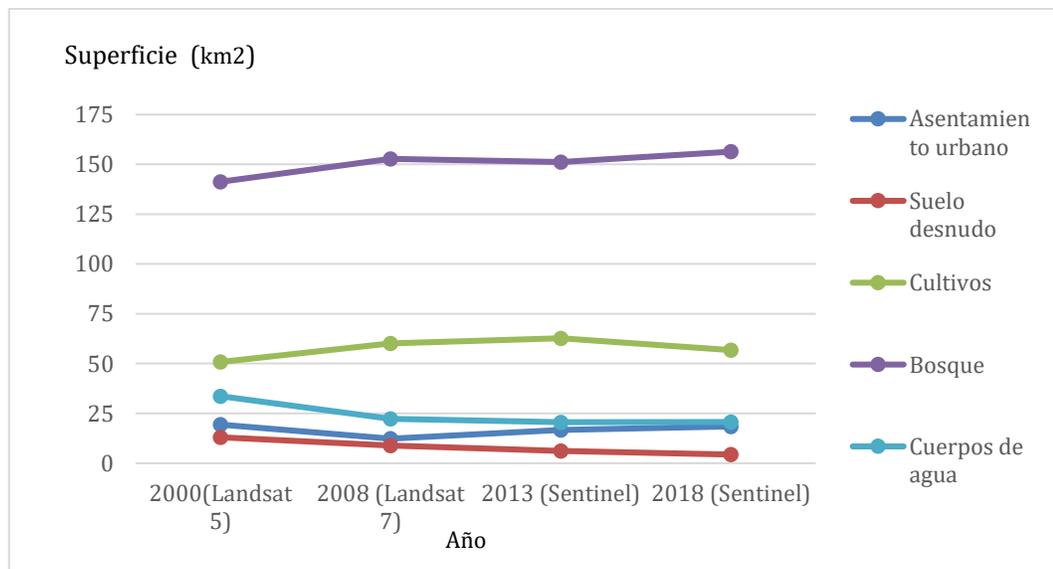


Figura 11. Clasificación de uso de suelo obtenida para los años propuestos.

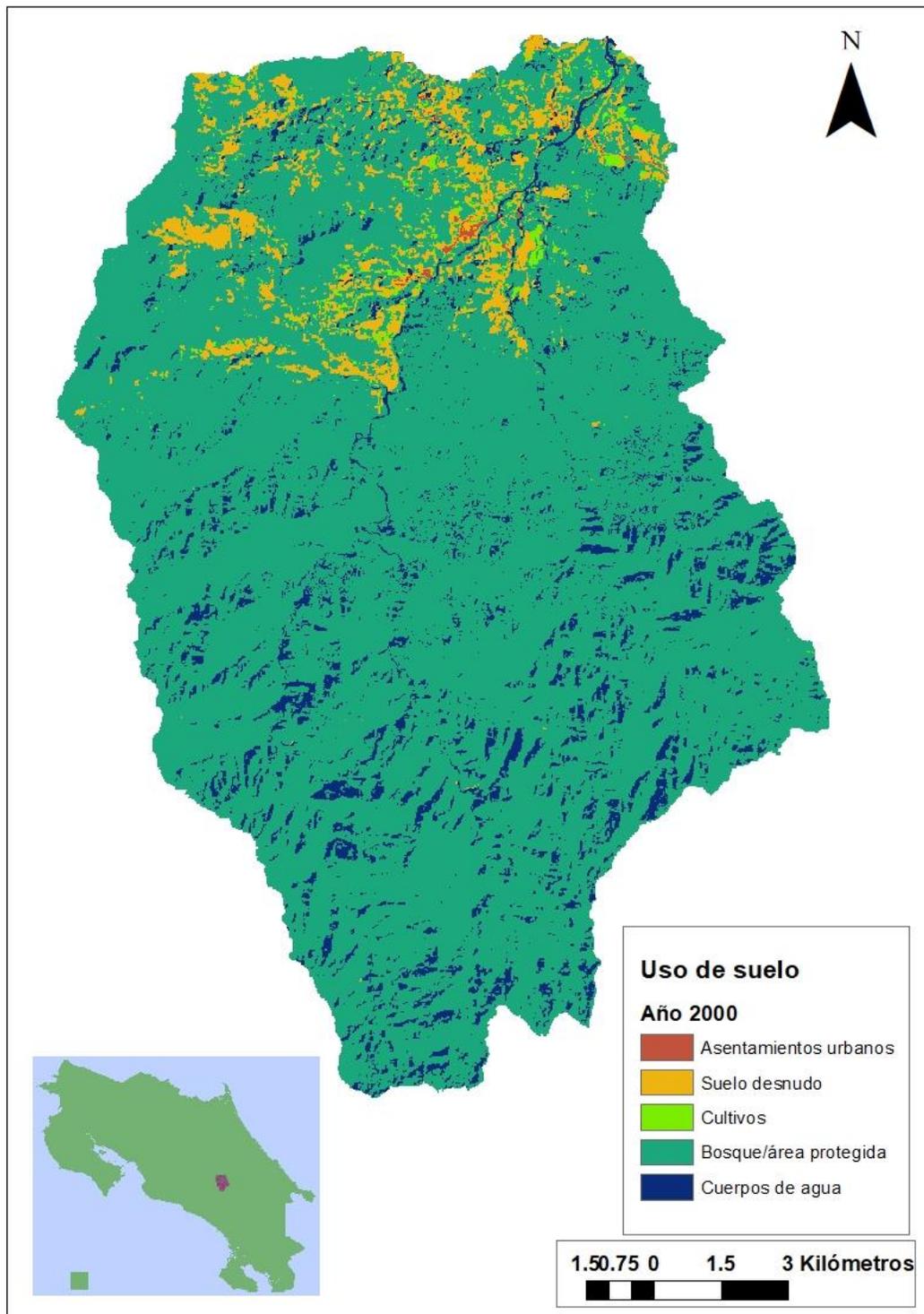


Figura 12. Clasificación de uso de suelo obtenida mediante satélite Landsat 7, para el estado de la cuenca en el año 2000.

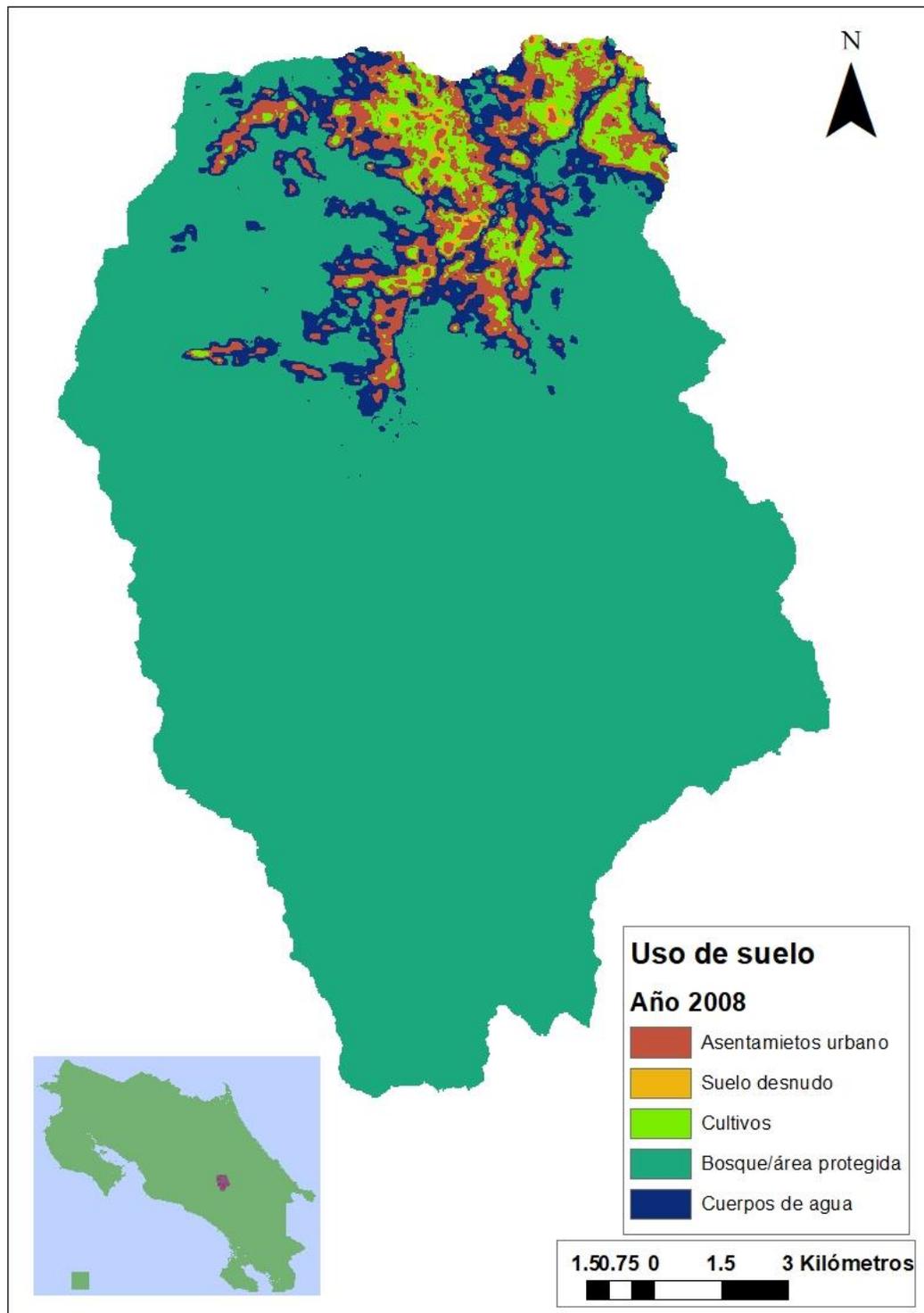


Figura 13. Clasificación de uso de suelo obtenida mediante satélite Landsat 5, para el estado de la cuenca en el año 2008.

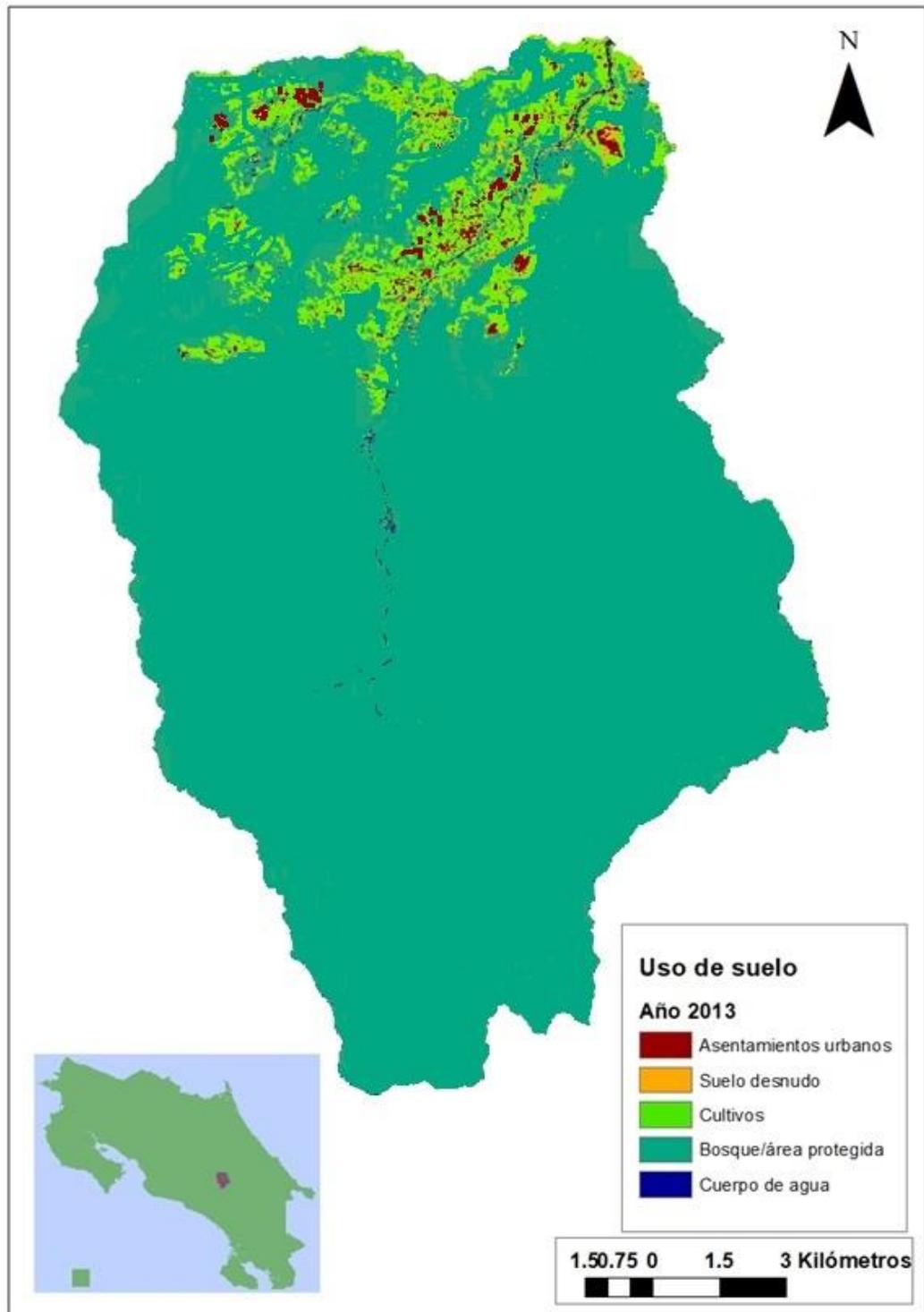


Figura 14. Clasificación de uso de suelo obtenida mediante satélite Sentinel, para el estado de la cuenca en el año 2013.

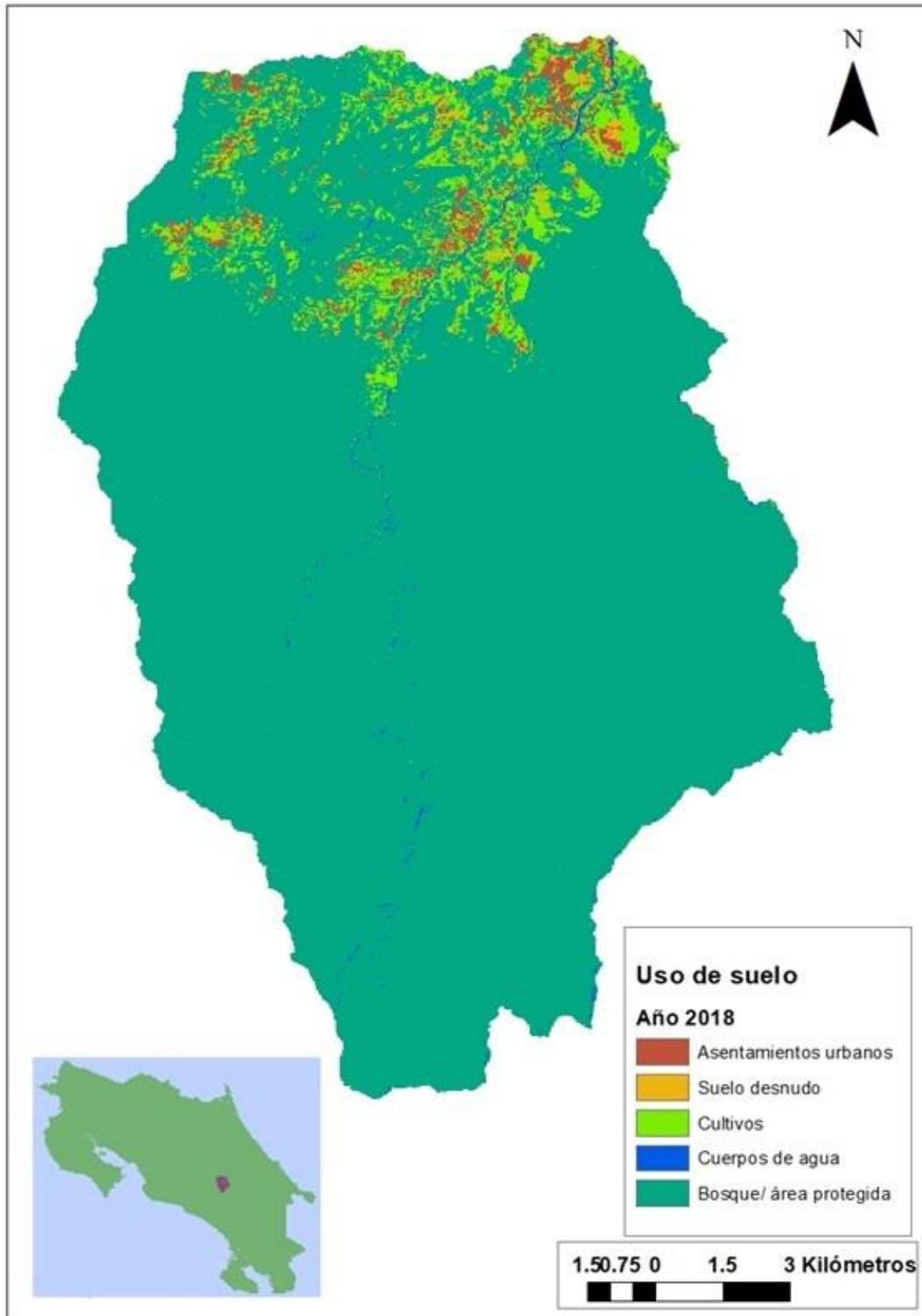


Figura 15. Clasificación de uso de suelo obtenida mediante satélite Sentinel, para el estado de la cuenca en el año 2018.

5.3 Modelación de cambio de uso de suelo.

Se evalúan diferentes eventos de cambio en el periodo de estudio, en este caso como se mencionó, fueron tomados los insumos de las clasificaciones de uso de suelo del año 2013 y del 2018, importante mencionar que a pesar de que se cuenta con imágenes más longevas (como la del año 2000 y 2008), las tomadas son las únicas con información compartida respecto a número de celdas y cantidad de pixel, entre otros elementos. En la Figura 16 se aprecian los cambios. Visualmente se evidencia como el aumento se da principalmente en el uso de suelo perteneciente al área de bosque y área protegida, situación que es racional dado que la cuenca cuenta con más de un 50% en su superficie de área boscosa. Por otra parte, se aprecia como los cuerpos de agua han disminuido y los cultivos también, con respecto al decremento del uso de suelo desnudo es casi proporcional al aumento del urbanismo.

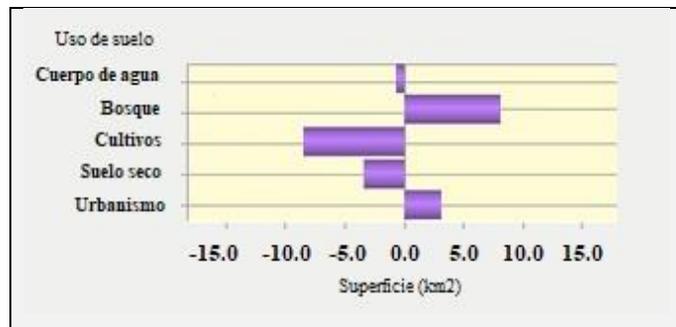


Figura 16. Cambio neto entre el uso del suelo entre los años del 2013 al 2018.

El cambio de uso de suelo expresado anteriormente, se encuentra numéricamente en la columna (b), del Cuadro 12. A su vez, se compara los resultados obtenidos con el complemento SCP del software QGIS en columna (a) del mismo cuadro. Pese a que el complemento no genera un cambio entre dos tiempos distintos, para este caso se obtuvo haciendo la sustracción por área de clasificación y año de estudio, permitiendo así realizar la comparativa. Los resultados obtenidos indican que, en ambos casos, los cambios son similares en un 96%. La diferencia más representativa corresponde al bosque y área protegida, esto se explica ya en el caso de la recolección mediante el complemento SCP, se parte de la selección por pixeles manuales, mientras que el caso de LCM, automáticamente los pixeles se relacionan a los contribuyentes que sufrieron o generaron las unidades de cobertura aplicadas a una cobertura específica, en donde su valor positivo afirma que dicha unidad invadió el área de la cobertura especificada,

mientras que un valor negativo indica que la cobertura especificada es invasora de dicha unidad, generando así la propuesta de cambios.

Cuadro 12. Comparación del cambio de uso de suelo mediante la herramienta SCP Y LCM

Clase	Mediante complemento SCP- QGIS (a)	Mediante complemento LCM-Idrisi (b)
	Área (km ²)	Área (km ²)
Asentamientos urbanos	1,82	2,23
Suelo desnudo	2,78	3,10
Cultivo	6,02	7,39
Bosque/área protegida	5,17	8,04
Cuerpo de agua	0,09	0,36

Además, se obtiene la persistencia del modelo, es decir, aquellas unidades que no generaron cambio entre las fechas estudiadas. Las persistencias se muestran a nivel de cuenca en la Figura 16.

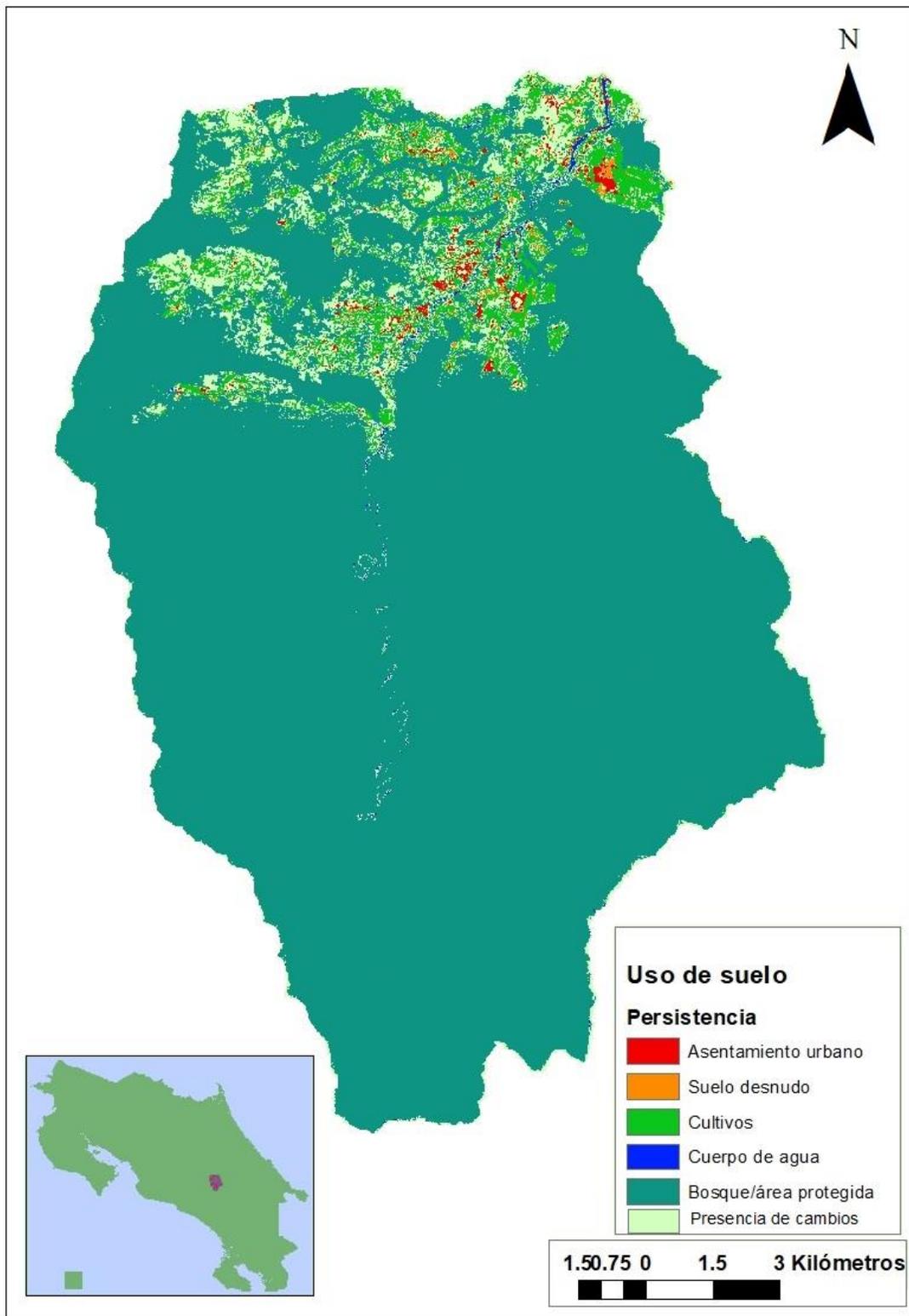


Figura 17. Persistencia entre el año 2013 y 2018 para la cuenca del río Pejibaye.

5.4 Probabilidad de cambios de suelo para el año 2025.

De acuerdo con el análisis de cadenas de Markov, los sitios que reflejan mayor probabilidad de cambio de uso que implicaría la pérdida de cultivos y bosques, se ubican en la zona alta. La primera matriz de área de transición (Cuadro 13), que propone Idrisi expresa el área total (en celdas) que se espera cambie en el próximo periodo, es decir, para el año 2025.

Cuadro 13.Resultado de probabilidad de transición de cambio según Markov.

	Asentamientos urbanos	Suelo desnudo	Cultivo	Bosque/área protegida	Cuerpo de agua
Asentamientos urbanos	52937	9590	107	372	1553
Suelo desnudo	62	2298	748	18158	6086
Cultivo	28177	6741	61001	76267	863
Bosque/área protegida	648	197	30054	2198829	0
Cuerpo de agua	0	145	254	71421	9844

Además, se obtiene la matriz de probabilidad de transición (Cuadro 14), expresando la posibilidad de que un pixel de cierta clase cambie a cualquier otra clase (o permanezca en la misma) en el próximo periodo de tiempo.

Se proyecta que para el año 2025 habrá una probabilidad de cambio con un máximo de 46% que pasará de ser suelo desnudo a componer un área boscosa. Esto refleja la gran dinámica de estos sistemas, al igual que en el caso de cultivos que reemplazaran los suelos desnudos en un 44%. Respecto a los cuerpos de agua se percibe un decremento de un 24% sobre el bosque, la posible reducción se debe al agua subterránea en recarga debido a la precipitación pluvial. También se indica que la mayor probabilidad de urbanización se mantendrá presente en la zona media de la cuenca y que no tendrá variación significativa.

Cuadro 14.Resultado de probabilidad de cambio según Markov, para el año 2025.

	Asentamientos Urbanos	Suelo desnudo	Cultivo	Bosque/área protegida	Cuerpo de agua
Asentamientos Urbanos	0,82	0,149	0,002	0,006	0,023
Suelo desnudo	0,002	0,284	0,031	0,464	0,223
Cultivo	0,102	0,439	0,053	0,301	0,105
Bosque/área protegida	0	0	0,014	0,986	0
Cuerpo de agua	0	0,002	0,003	-0,24	0,755

En la Figura 18, se muestra la probabilidad de cambio de uso de suelo para el año 2025 en la cuenca del río Pejibaye, a partir de la tendencia de cambio en el periodo 2013-2018 y el modelaje de cadenas de Markov.

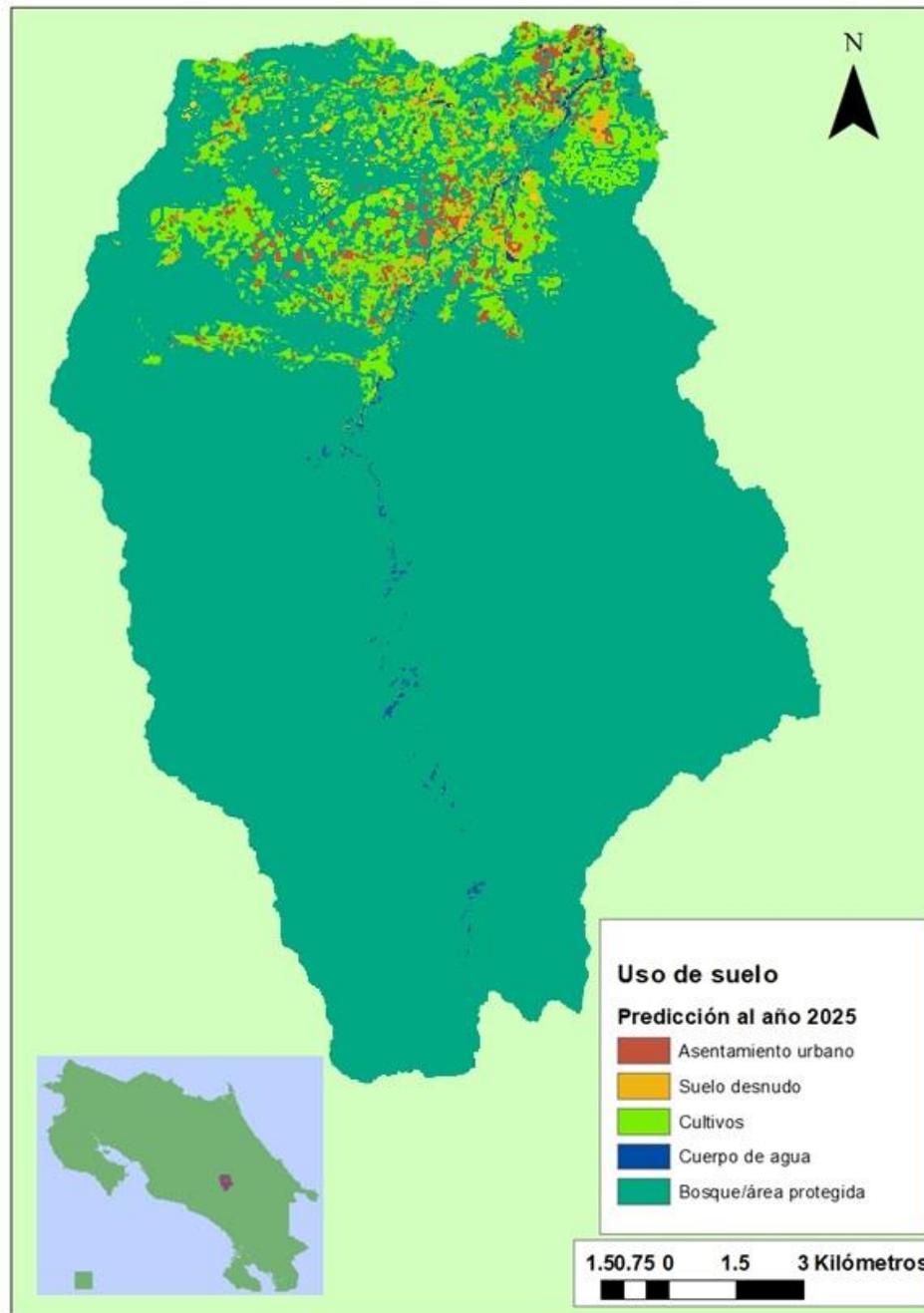


Figura 18. Representación visual de la proyección de uso de suelo para el año 2025 en la cuenca del río Pejibaye.

5.5 Obtención de escorrentía superficial.

5.5.1 Tipo de suelo.

Mediante la información de la capa universal de la FAO, para el tipo de suelo se identificó que la cuenca cuenta con los siguientes tipos de suelo: Franco arcilloso en 173,3 km² correspondiente a aguas abajo donde predomina el bosque y el área protegida de la Reserva Tapantí, además 62,9 km² pertenece al Franco arenoso y en menor superficie está presente el suelo Franco con 23,54 km².

5.5.2 Interpolación de datos climáticos.

Para la obtención y ubicación de elementos esenciales del periodo de 10 años (del 2000 al 2009); como lo son los datos de COMID, precipitación y temperatura para utilizar la herramienta de Hydrobid se muestran en la Figura 19. Como se aprecia para el caso de las estaciones de precipitación se contaba con 7 estaciones sin embargo la estación de Navarro presentaba gran cantidad de datos faltantes, por lo que se descartó y solamente se implementaron las estaciones Taus, La Esperanza, Condorcilal, Alto Gato y Destierro. Las estaciones de caudal fueron 3: El Humo, Oriente y Pejibaye.

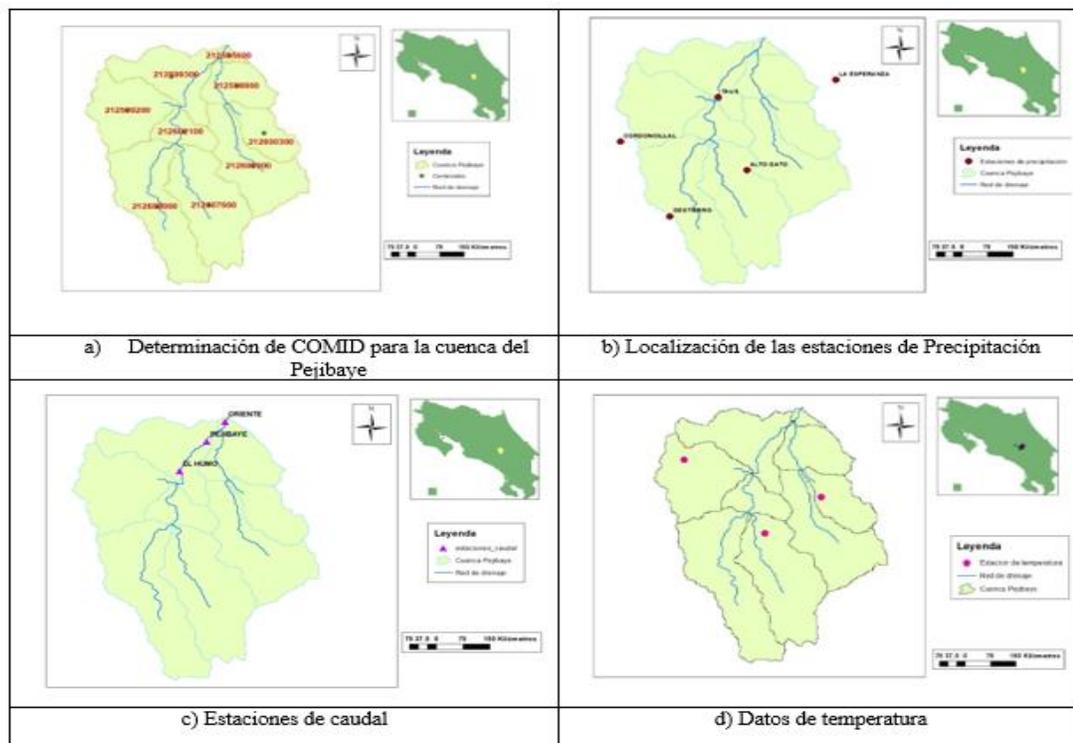


Figura 19. Insumos necesarios para la implementación del modelo Hydrobid

De los archivos abiertos en formato .csv se obtiene el primer cuadro que contiene la Interpolación de datos climáticos (CDIT), información necesaria que alimenta el programa. (Anexo 4).

5.5.3 Herramienta de parametrización.

Mediante las clasificaciones de uso de suelo del año 2008 y la capa de textura, en conjunto con la capa (catchments) de Hydrobid, se obtuvo automáticamente en la base de datos (SQLite) el nuevo cuadro para el número de curva que se implementó en la calibración de cuenca (Anexo 5).

5.5.5 Calibración y validación.

En cuanto a la calibración, en Hydrobid, la calibración como se mencionó, se lleva a cabo manualmente realizando comparaciones entre series de datos de caudales en puntos específicos de la cuenca y los caudales simulados, para este caso el periodo de años para la simulación, fue de 10 años, concretamente desde 01/01/2000 al 31/12/2009.

Además, se va calibrando la cuenca entera de aguas arriba hacia el punto de cierre de la cuenca o hasta el punto de aforo aguas abajo (Figura 20). Dado que se cuenta con tres estaciones de caudal, se realizó una calibración en dos COMID, el 212599300 (aguas arriba) y el 212595600 (aguas abajo). El criterio de selección de COMID se basó en que el COMID 212602300, está intersecando y asociando información (de caudal principalmente) de distintos de COMID, caso contrario que ocurriría si solamente seleccionaba el COMID superior, es decir el del código 212601200.

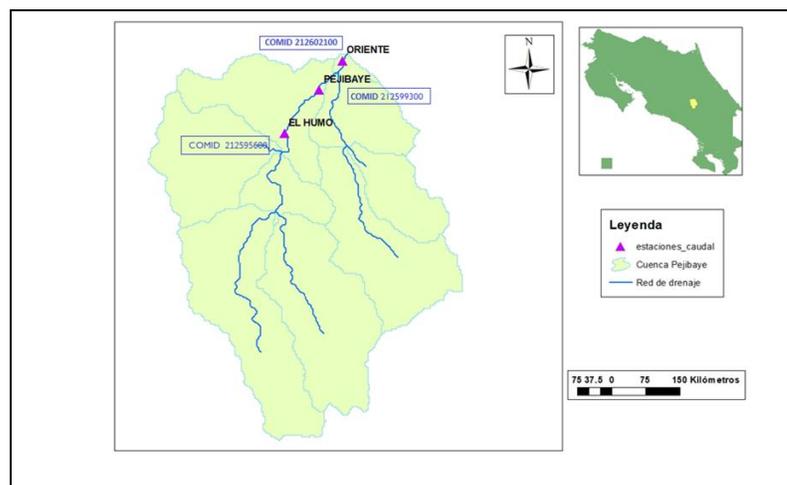


Figura 20.COMID involucrados en la corrida del modelo.

En el Cuadro 15, se muestra el valor final de los parámetros de calibración del modelo para ambos puntos. Como se aprecia la cuenca representada es más sensible a los coeficientes de recesión y al coeficiente de percolación. En el caso del coeficiente de recesión se está caracterizando el flujo de agua procedente de la zona saturada que contribuye a los caudales de los ríos pertenecientes en la cuenca, por lo que se interpreta que la calibración es sensible en este parámetro debido a que hay extensión de área protegida y distintas áreas boscosas.

Cuadro 15. Parámetros de calibración del modelo

Parámetro	Tipo	COMID parámetro calibración	
		212599300	212595600 (perteneciente a la calibración múltiple)
Numero de curva (NC)	Calibrado	0,5	0,5
Contenido disponible de agua (CDA)	Multiplicador	2,5	1,5
Coefficiente de Recesión(r.)	Valor único	0,14	0,10
Coefficiente de Percolación (s)	Valor único	0,001	0,002
Factor de ET en temporada del cultivo	Valor único	0,02	0,02
Factor de ET en temporada latente	Valor único	0,01	0,01
Porcentaje de Cobertura Impermeable	Valor único	1	1
Umbral de temperatura	N/A	1	1
Factor de fusión	N/A	1	1

A su vez el comportamiento del coeficiente de percolación está ligado al coeficiente de recesión, el leve cambio de la calibración consistió de esta manera aumentar la infiltración y disminuir la escorrentía, para obtener una variación en volumen y un mejor ajuste en la calibración (Figura 21)

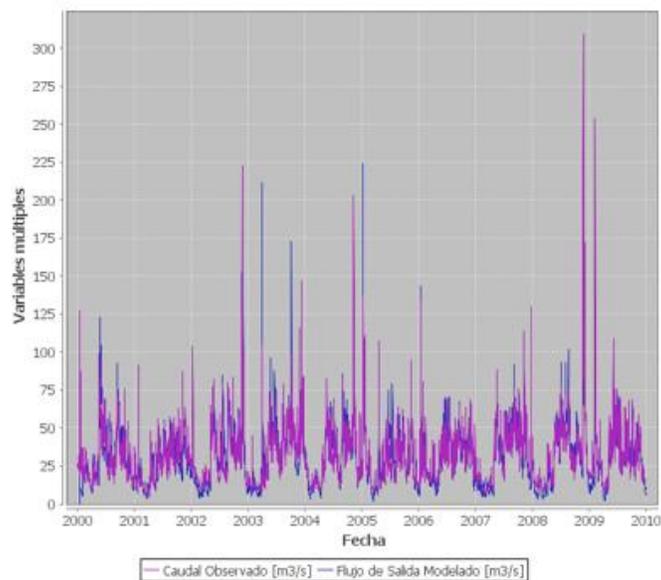


Figura 21. Obtención del caudal diario observado y calibrado.

Las estadísticas obtenidas fueron satisfactorias, sobrepasando los valores aceptables de calibración en todas las estadísticas medidas de error general de volumen, correlación, correlación modificada y el coeficiente de Nash, entrando así en el rango de bueno a excelente, como se puede apreciar en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Estadísticas de rendimiento de la modelación

Estadístico	COMID 212602300		COMID 212595600 (perteneciente a la calibración múltiple)	
	Valor diario	Valor mensual	Valor diario	Valor mensua l
Error general de volumen, ove (%)	-1,32	-1,21	0,98	0,95
Correlación, r (-)	0,76	0,85	0,79	0,89
Correlación modificada, rmod	0,75	0,73	0,74	0,82
Coefficiente de Nash - Sutcliffe, NSE	0,52	0,72	0,68	0,84

En la Figura 22 se muestran la de duración de flujo y en la Figura 23, la escorrentía de salida para el COMID obtenido en la calibración múltiple. Como se aprecia en el periodo wcomprendido de simulación, la escorrentía diaria en promedio ronda 3 mm /día y el año que

indica mayor escorrentía es el 2004, donde su promedio anual corresponde a 4 mm/ día, donde además se muestra un pico de elevación con 3 cm/día. Con respecto al cuadro de duración de flujo se aprecia como la calibración gráficamente se observa satisfactoria, a pesar que levemente se encuentre subvalorado respecto a lo calibrado

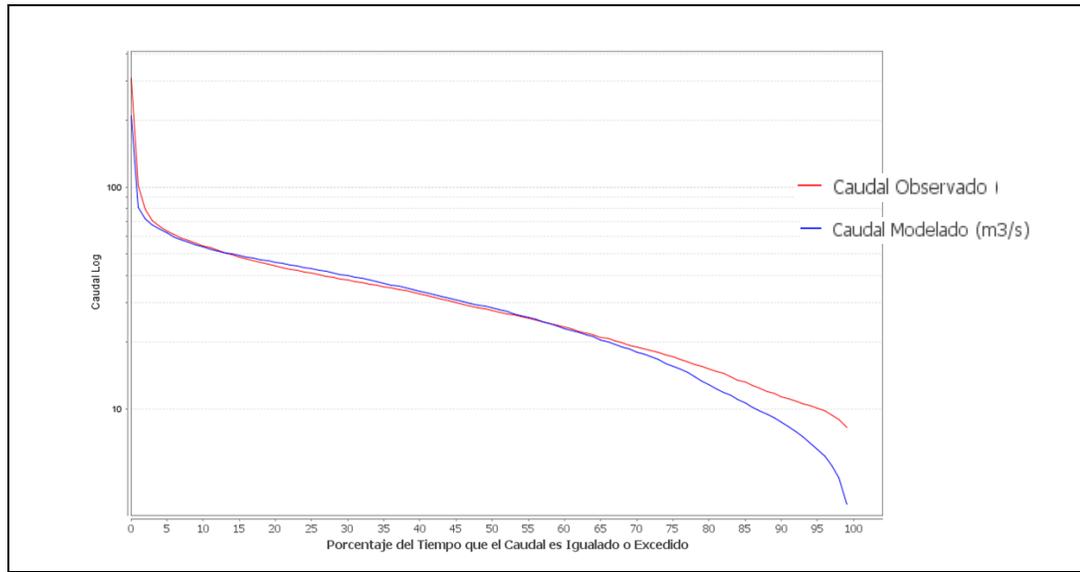


Figura 22. Curva de duración de flujo obtenido en la modelación

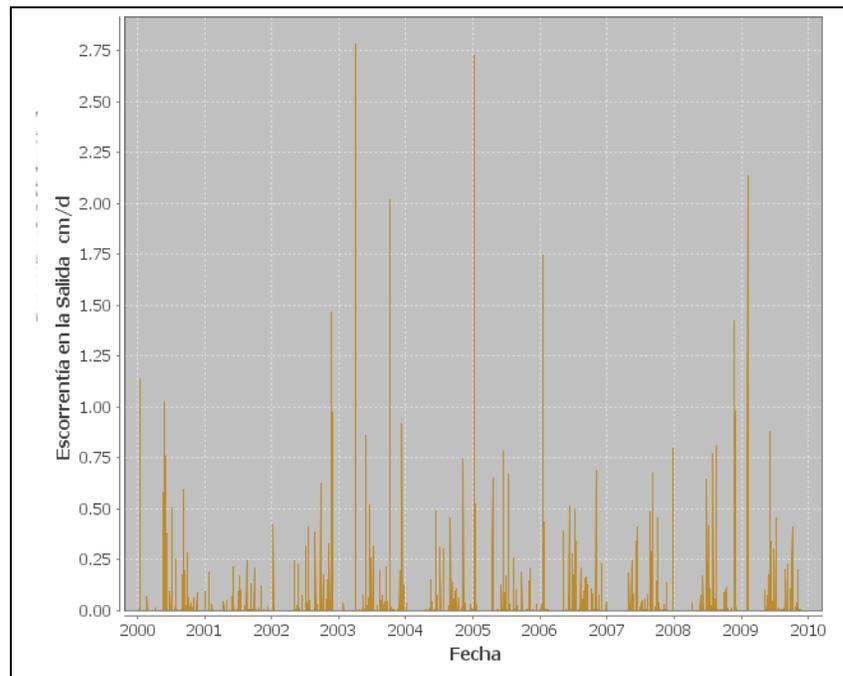


Figura 23. Escorrentía presente en el lapso del año 2000 al 2009

La proyección utilizando el modelo hidrológico de la cuenca del río Pejibaye calibrado, se genera bajo un escenario tomando en cuenta los efectos que se predicen en la cuenca para el año 2025, basándose en las estadísticas del Instituto Meteorológico Nacional sobre un incremento del 2° C en temperatura y un decremento del 8% en precipitación. Sobre las cuales, se calcularon los caudales promedios diarios y se compararon contra el régimen hídrico calculado a partir del modelo calibrado. Los resultados se representan en la Figura 24, en donde, se muestran la disminución de la oferta hídrica de la cuenca. Se aprecia como los caudales responden al comportamiento de las precipitaciones, presentando los valores mínimos en febrero y marzo, además el periodo lluvioso que inicia en marzo, genera un aumento en el caudal, y que nuevamente disminuirá en el mes de noviembre.

Es importante entender que Hydrobid simula para la proyección la misma serie temporal de datos de temperatura y precipitación que se encuentra en la simulación original pero los resultados representarán en este caso el escenario propuesto para el año 2025. En este caso el valor de caudales observados con los que se construye la curva de duración de los caudales para tener una buena imagen del posible cambio de comportamiento de la cuenca debido a los efectos del cambio climático. En la figura 24 se presenta visualmente el decremento esperado para el año 2025.

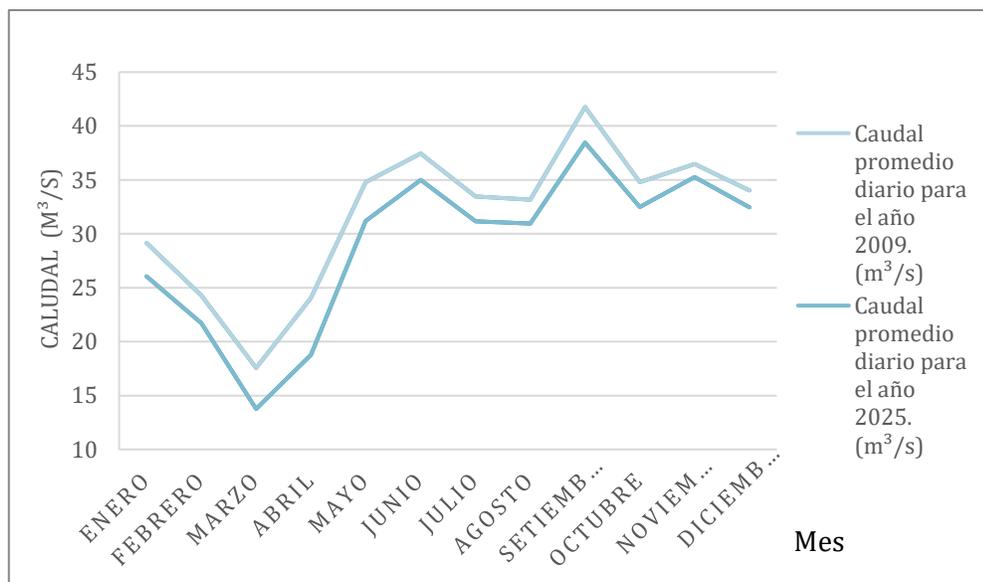


Figura 24. Decremento del caudal para el año proyectado.

Con respecto a la escorrentía promedio, el año que muestra mayor valor es el 2003, (Cuadro 17) y refiriéndose a la estimación del año 2025, se asocia con respecto al análisis de cambio de uso de suelo, es decir valores menores de escorrentía que coinciden con la mayor presencia y desarrollo de plantaciones forestales y área boscosa.

La disminución del caudal se explicaría por una disminución del flujo base o aguas subsuperficiales, dado que la disminución de la escorrentía superficial no es proporcional a la disminución del caudal.

Cuadro 17. Escorrentía promedio diaria estimada y proyectada.

Año	Escorrentía Promedio (mm/d)
2000	3,948
2001	0,787
2002	3,934
2003	5,773
2004	2,073
2005	4,168
2006	3,586
2007	2,535
2008	3,861
2009	4,166
2025- proyección	4,037

5.6 Análisis prospectivo en el manejo ambiental y socioeconómico de la cuenca.

El análisis prospectivo sirve de apoyo para los tomadores de decisiones, por lo que son los actores los que deciden que desean modificar en determinado escenario y el método presenta posibles escenarios, con el fin de seleccionar el mejor futuro posible, esto va asociado a la predicción, que como se ha aplicado, utiliza modelos matemáticos como en las disciplinas de econometría, demografía, meteorología y geografía. En el caso de la cuenca de Pejibaye, se busca crear una estrategia básica para el desarrollo sustentable de la cuenca de estudio. Basado en la literatura se propone un plan de prospectiva (Cuadro 18), que pueda ser de utilidad para aplicar en la cuenca.

Cuadro 18. Plan general de prospectiva como propuesta aplicable en la cuenca de estudio.

Plan de prospectiva aplicable en la cuenca del río Pejibaye		
Objetivo: Crear una estrategia básica para el desarrollo sustentable de la cuenca de estudio		
Delimitación: Área de la cuenca del Pejibaye	Horizonte Temporal: proyectado al año 2025.	
Etapas 1. Diagnóstico u evaluación técnica:		
La cuenca presentará un decremento en el caudal y se predice un aumento de área boscosa		
Etapas 2. Organización		
Aspectos evaluativos	Componentes	
	Análisis de la cuenca	Planificación participativa
Impacto Uso actual del suelo/Oferencia hidrica actual y proyectada	Herramientas tecnológicas de bajo costo (ejemplo QGIS- Idrisi- Hydrobid)	Competencia ingenieril
Identificación de externalidades ambientales	Herramientas tecnológicas de bajo costo	Competencia ingenieril
Impacto Uso potencial sobre externalidades ambientales y dinámica socioeconomica	Modelos de optimización	Competente social/ ingenieril (agricola, ambiental)
Plan de acción	Asociar entidades involucradas: Municipalidades, Asadas	Trabajo integra que permita la focalización de acciones: Metas, responsables, indicadores
Alianzas Estrategicas	Análisis de prefactibilidad	Armonización de pedidos entre actores
Cuantificación de indicadores biofisicos y economicos	Consecución de recursos	Revisión participativa de indicadores
Verificación del impacto	Cuantificación de indicadores ambientalesy socioeconomicos	
Evaluación	Impacto marginal por cambios de uso cada año	Seguimiento
Retroalimentación	Revision del impacto de uso del suelo e identificación	Autoevaluaciones
Etapas 3. Ejecución del plan		

Basado en el plan propuesto y tomando como el cambio climático el ente a estudiar, se muestra a un nivel macro las afectaciones que la cuenca de estudio tendrá (Cuadro 19), basándose en la matriz arboleda. Cabe indicar que la matriz se propone ante evaluaciones de proyectos y su viabilidad. Sin embargo, en este caso es una buena aplicación, para indicar los impactos que se darán bajo la proyección del año 2025.

Cuadro 19. Evaluación ambiental por medio de la matriz Arboleda sobre la variabilidad climática

Evaluación	Descripción del impacto	Factor	Clase	Presencia	Duración	Evolución	Magnitud	Ca	Impacto ambiental
C a m b i o c l i m a t i c o	Decremento en el caudal	Físico	1	1	1	1	1	10	Grave
	Precipitación	Físico	1	1	1	0,7	1	7,9	Grave
	Temperatura	Físico	1	1	1	0,7	1	7,9	Grave
	Humedad relativa	Físico	1	1	1	0,7	1	7,9	Grave
	Erodabilidad	Físico	1	0,8	1	0,7	1	6,32	Severo
	Red de drenaje	Físico	1	1	1	0,7	1	7,9	Grave
	escorrentía	Físico	1	1	1	0,4	1	5,8	Severo
	pH	Físico	1	0,7	1	0,7	1	5,53	Severo
	Disponibilidad de agua	Físico	1	1	1	0,8	1	8,6	Grave
	Demanda de agua	Físico	1	1	1	1	1	10	Grave
	Cambios en la producción agrícola	Social	1	0,4	1	0,7	1	3,16	Moderado
	Estrés térmico	Físico	1	1	1	0,5	1	6,5	Severo
	Calidad visual de paisaje	Biótico	1	0,8	1	0,6	1	5,76	Severo
	Diversidad	Biótico	1	0,5	1	0,4	1	2,9	Moderado
	Nichos ecológicos	Biótico	1	1	1	0,5	1	6,5	Severo
	Salud: enfermedades, mortalidad, esperanza de vida	Social	1	0,5	1	0,5	1	3,25	Moderado
	Dieta alimentaria	Social	1	0,2	1	0,19	1	0,866	Irrelevante
	Oportunidades de trabajo	Social	1	0,01	1	0,2	1	0,044	Irrelevante
	Densidad de población	Social	1	0,2	1	0,2	1	0,88	Irrelevante
	Niveles de productividad	Social	1	0,5	1	0,7	1	3,95	Moderado
Cobertura y calidad de servicios públicos	Social	1	0,3	1	0,3	1	1,53	Irrelevante	
Reducción área agropecuaria	Social	1	1	1	0,4	1	5,8	Severo	

En el Cuadro 20, se observa el resumen de las afectaciones que podrían generarse en la cuenca, se aprecia como la mayoría de afectaciones se consideran graves y severos, pese a que la cuenca de estudio es pequeña, el cambio climático y sus afectaciones generarán grandes cambios principalmente físicos y bióticos

Cuadro 20. Resumen de afectación para el año 2025 en la cuenca del Río Pejibaye.

Resumen de afectación					
	Grave	Severo	Moderado	Irrelevante	Sumatorias
Físico	7	4			11
Biótico		2	1		3
Social		1	3	4	8

Dando seguimiento al plan establecido y por lo analizado en la literatura, se conoce que para un buen aprovechamiento de la aplicación de análisis prospectivo se requiere recurso humano capacitado, recurso financiero y voluntad política para la continuidad prolongada. Dado que la finalidad de este objetivo es fomentar la objetividad de los insumos para la toma de decisiones, se plantean algunos criterios:

- a. Es necesario la implementación de capacidades lo suficientemente flexibles como para ser capaces de realizar estudios sobre una gran variedad de cuestiones con marcos temporales de corto, medio y largo plazo, para dar el seguimiento a la cuenca.
- b. Imprescindible la combinación de distintas disciplinas para lograr complementarse y entender de manera global el problema, aquí podría existir la contribución sistemática de expertos de la academia, la sociedad civil y el sector privado.
- c. El desarrollo una cultura de prospectiva y pensamiento estratégico, no sólo desde el punto de vista del ejecutivo, sino también desde el punto de vista de instituciones, empresas y sociedad civil. Este impulso transversal del pensamiento estratégico es de menester para una aplicación apropiada de la metodología.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El río Pejibaye, es el más extenso de la red de drenaje, contando con una longitud de 56,08 km.
- Entre el 2013 y 2018 hubo una reducción de aproximadamente 6 km en cultivos y aumentó el área boscosa en 8 km²
- En un 69,56 % equivale a área protegida y el 56% corresponde al corredor biológico del parque Nacional Tapantí.
- Para obtener clasificaciones de uso de suelo mediante sensores pasivos, se recomienda utilizar preferiblemente imágenes satelitales del sensor Sentinel, ya que genera mayor detalle y resultados con mayor precisión.
- Se proyecta que para el año 2025 habrá una probabilidad de cambio con un máximo de 46% que pasará de ser suelo desnudo a componer un área boscosa.
- En cuanto a la persistencia del uso de suelo, la urbanización se mantendrá presente en la zona media de la cuenca y que no tendrá variación significativa.
- Planteando un decremento del 8% en precipitación y aumento de 2° C, el promedio diario del caudal en el año 2025 se reducirá en un 9%.
- La modelación con Idrisi, indica en su proyección que en la cuenca del río Pejibaye se dará un aumento en el área boscosa y esto tiene coherencia con la escorrentía promedio diaria obtenida con el programa HydroBid ya que para el año 2025 se estima una escorrentía de 4,04 mm/d siendo este levemente menor al último año simulado.
- La herramienta de parametrización que permite incluir el número de curva permite obtener resultados más cercanos a la realidad simulada.
- En cuanto a la calibración del modelo con Hydrobid, los elementos de mayor cambio fueron el coeficiente de recesión y de permeabilidad.
- Los caudales responden al comportamiento de las precipitaciones, presentando los valores mínimos en febrero y marzo, además el periodo lluvioso que inicia en marzo, genera un aumento en el caudal, y que nuevamente disminuirá en el mes de noviembre.
- Se proyecta para el año 2025, un decremento importante en el caudal, producto del cambio climático, además se da por una disminución del flujo base.

- La utilización del programa Hydrobid resulta una muy útil, para el preproceso, el modelo es acompañado por una serie de herramientas que facilitan la generación e identificación de los requerimientos de entrada. La calibración se puede realizar rápidamente, pero este tiempo estará sujeto a la experiencia del usuario y comprensión del proceso de precipitación y escorrentía. En el post proceso Hydro-BID permite obtener estadísticos de rendimiento, cuadros y generación de figuras, pero además genera automáticamente archivos CSV que contienen los resultados obtenidos facilitando la exportación de los mismos hacia otras plataformas.
- Se recomienda aumentar la información disponible y la capacidad técnica para contribuir con la socialización de los análisis de cuenca, de tal forma que puedan ser utilizados en la planificación participativa y contribuyan a la formulación e implementación de los Planes de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca.
- En cuanto a la prospectiva como propuesta de ordenamiento de cuenca es necesario la alineación de capacidades mediante la institución pública, para que en temas de prospectiva se disponga de un equipo técnico o de recurso humano especializado en el proceso de desarrollo e implementación de los estudios, esto es posible mediante la formación de capacidades locales o por un convencimiento de las instituciones públicas.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguayo, M; Azócar, G; Wiegand, T.; Wiegand, K; Vega, C. (2006). Revealing driving forces of mid-cities urban growth patterns using spatial modeling: a case study of los angels. Recuperado de: Prensa Ecology and Society. Santiago, Chile.
- Alonso, A. (2013). Fundamentos de teledetección. Recuperado de <https://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/node69.html>
- Atlas Digital. (2013). Disponibilidad de capas vectoriales. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/286671626_Atlas_Digital_del_Plan_GAM_2013
- Arce, R. (2004). “Resumen diagnóstico cuenca Reventazón”. Recuperado de: <https://www.cne.go.cr/CEDORiesgo/docs/2655/2655.pdf>
- Ballestero, M; López, L. (2017). El Nexa entre el agua, la energía y la alimentación en Costa Rica: El caso de la cuenca alta del río Reventazón. Recuperado de: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/42507/S1701032_es.pdf?isAllowed=y&sequence=2
- Branch, J; Arango, M; Botero, V. (2005). Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes digitales de sensores remotos: “landsat – etm+”. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v58n1/a04v58n1.pdf>
- Canty, M. (2010). “Image analysis, classification, and change detection in remote sensing: with algorithms for ENVI/IDL”, CRC Press Taylor & Francis Group, Florida, United States of America, 2010.
- Chaparro, H. (2017) Análisis multitemporal de cambios en la cobertura vegetal mediante el uso de sistemas de información geográfica. Recuperado de <https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/1958/1/TGT-593.pdf>
- Chow, V.; Maidment, D; Mays, L. (1994). Hidrología Aplicada. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Comisión Nacional de Emergencia (CNE). Plan regulador para las zonas de Turrialba y Jimenez, afectados por el evento sísmico del 10 de Julio, 1993. Recuperado desde <https://www.cne.go.cr/CEDO-CRID/pdf/spa/doc59/doc59.htm>
- Eastman, R. (2012). IDRISI Selva: Guía para SIG y procesamiento de imágenes. Recuperado de <https://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/10/IDRISI-Selva-Spanish-Manual.pdf>
- ESA. (2015). El programa Copérnico. Recuperado de https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/El_programa_Copernico
- Fasciolo, G; Buccheri, M; Gudiño, M; Medalla, A; Papú, O; Vitale, J. (2010). “El futuro ambiental de Mendoza: escenarios”. Recuperado de: <http://www.ediunc.uncu.edu.ar/catalogo/ficha/98/Futuro-ambiental-de-Mendoza-escenarios>
- FAO. (2011). Conservación de suelos y aguas en América Latina y el Caribe. Recuperado de <http://www.fao.org/americas/prioridades/suelo-agua/es/>

- FAO. (2014). Suelos de América Latina y el Caribe, integrados en un atlas. Recuperado de <http://www.fao.org/americas/prioridades/suelo-agua/es/>
- Fernández, L; Herrero, E. (2001). El satélite Landsat. Análisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+ satélite Landsat. Valladolid, España: Universidad de Valladolid.
- Hernández, R; Fernández, C; Baptista, P. (2010). Metodología de la investigación. Editorial Mc GrawHill. Estados Unidos.
- Hydro-BID. (2014). Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos.
- Hough, M. (1984) City Form and Natural Processes. London: Croom Helm Publishers.
- Hong, Y; Adler, R; Hossain, F; Curtis, S; Huffman, G. (2007). A first approach to global runoff simulation using satellite rainfall estimation. Water Resour. Recuperado de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2006WR005739>
- INDER. (2014). Informe de Caracterización Integral Básica Territorio Turrialba-Jiménez. Recuperado de <https://www.inder.go.cr/turrialba-jimenez/Caracterizacion-Turrialba-Jimenez.pdf>
- INDER. (2016). Plan de desarrollo rural territorial territorio Paraíso-Alvarado 2016-2021. Recuperado de <https://www.inder.go.cr/proyectos/>
- León, A. (2015). Producto Sentinel 2. Recuperado de <https://es.slideshare.net/AlejandroLeon31/guia-sentinel2-espaol>
- López, A., Alanoca, J., e Infantas. K. (2016). El análisis prospectivo y las tendencias tecnológicas. Caso estudio sector de tecnologías de información y comunicación. Universidad de Santa Cruz, Bolivia. Recuperado de <https://es.slideshare.net/kinfantas/el-analisis-prospectivo-y-tendencias-documento-final-v39-jalopeze>
- Maidment, D. R. (1996). "GIS and Hydrologie Modeling - an Assessment of Progress", Proceedings Third International Conference/ Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, NM, Santa Barbara, CA: NCGIA. Recuperado de http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/main.html
- Martínez, R. (2005). CEPAL: Evaluación de programas y proyectos sociales. Recuperado de <https://www.cepal.org/ilpes/noticias/paginas/0/22990/rodrigomartinezpres.pdf>
- Ramírez, L; Alvarado, A; Pujol,R; Brenes L.(2008). Caracterización física de la cuenca media del río Reventado, Cartago, Costa Rica. Recuperado de <https://core.ac.uk/reader/25647927>
- Refsgaard, J; Knudsen, J. (1996). "Operational validation and intercomparison of different type of hydrological models". Water Resources Research, Vol. 32, No. 7, Pages 2189–2202, July 1996.

- Reynoso, R; Valdez, J; Escalona, M; Posadas, H; Perez, M. (2016). Cadenas de Markov y autómatas celulares para la modelación de cambio de uso de suelo. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382016000100006
- Red Iberoamericana de Bosques Modelo (RIABM). (2013). Publicaciones y documentos: Ficha Bosque Modelo Reventazón RIABM. Recuperado de: http://www.bosquesmodelo.net/categories/costa_rica
- Strauss, A; Corbin, J (2002). “Bases de la investigación cualitativa. Técnicas y procedimientos para desarrollar la teoría fundamentada”. Antioquia, Colombia: Editorial de la Universidad de Antioquia.
- Quesada, R. (2007). Centro de Investigación Integración Bosque Industria: Los bosques de Costa Rica. Recuperado de <http://www.cientec.or.cr/exploraciones/ponencias2007/RupertoQuesada.pdf>
- Vega, B; Rodríguez ,F. (2018). Dinámica de la estructura del paisaje en el ecosistema de páramo y su relación con factores climáticos e incendios: Cerro de la Muerte (Buena Vista) 1992 y 2012. Recuperado de https://www.repositorio.una.ac.cr/bitstream/handle/11056/14868/TFG_Baleska%20Vega%20Mena.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Weng, Q. (2001). Modeling Urban Growth Effects on Surface Runoff with the Integration of Remote Sensing and GIS. Environmental Management, 2001, N° 28, Vol. 6, p. 737-748.
- Zabaleta, A; Uriarte, J. (2019). ¿Cómo afecta el cambio climático a los ríos?. Recuperado de <https://theconversation.com/como-afecta-el-cambio-climatico-a-los-rios-126849>

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Preparación de archivos .csv para el uso de suelo, necesarios para implementar la herramienta de parametrización de Hydrobid.

Uso de suelo	símbolo	nlcd_id
Tierras Urbanas y asentamientos humanos	aa	1
Tierras agrícolas secas	bb	2
Tierras agrícolas Irrigadas y pastizales	cc	3
Bosque	dd	13
Cuerpos de agua	eet	16

Anexo 2. Asignación de grupos hidrológicos mediante archivo .csv necesarios para implementar la herramienta de parametrización de Hydrobid

Permeabilidad	Grupo hidrológico
Rapida	A
Moderadamente rapida	B
Moderadamente rapida	B
Moderada	C

The image shows the 'Hydro-BID Custom Parameterization' dialog box. It contains several dropdown menus and text fields. Red arrows point from callout boxes to specific elements:

- Top-left callout:** Points to the 'Catchments layer' dropdown menu, which is set to 'Basins'. The text reads: 'Shapefile con el subconjunto de las cuencas AHD' and 'Incluyendo solo aquellas cuencas cuyos parámetros fueron cambiados'.
- Bottom-left callout:** Points to the 'Soils' dropdown menu, which is set to 'Soils'. The text reads: 'Shapefiles de los usos de la tierra y tipo de suelo'.
- Right callout (top):** Points to the 'COMID' dropdown menu, which is set to 'COMID'. The text reads: 'Campo en el shapefile de "Catchments layer" que incluía los COMIDs'.
- Right callout (bottom):** Points to the 'Land-use field' dropdown menu, which is set to 'uso'. The text reads: 'Campo en el shapefile que contenía las clasificaciones de cobertura'.
- Bottom callout:** Points to the 'Soil field' dropdown menu, which is set to 'textura1'. The text reads: 'Campo en la tabla de atributos que contenía las clasificaciones del suelo'.

Other visible elements in the dialog include: 'Land-use layer' (set to 'LandUse'), 'Database' (set to 'ecuador_2017.sqlite'), and 'New CN Table name' (set to 'CN1').

Anexo 3. Entrada de datos en el complemento de QGIS para obtener número de curva.

Anexo 4. Valores obtenidos con herramienta de Interpolación de Datos Climáticos

comid	measured_date	avg_temp	avg_precip
212595600	20000101	19,209	0,715
212595600	20000102	19,407	0,505
212595600	20000103	18,319	0,815
212595600	20000104	18,498	0,850
212595600	20000105	19,034	1,085
212595600	20000106	19,351	0,990
212595600	20000107	19,609	0,745
212595600	20000108	20,015	0,795
212595600	20000109	19,034	0,670
212595600	20000110	18,346	0,235
212595600	20000111	18,080	0,235
212595600	20000112	19,403	4,090
212595600	20000113	19,317	11,515
212595600	20000114	18,791	9,665
212595600	20000115	18,138	5,465
212595600	20000116	18,168	0,390
212595600	20000117	18,332	3,770
212595600	20000118	18,479	0,235
212595600	20000119	18,567	0,235
212595600	20000120	18,698	0,280
212595600	20000121	19,201	1,885
212595600	20000122	18,917	0,555
212595600	20000123	19,650	0,280
212595600	20000124	19,463	0,235
212595600	20000125	19,600	0,350
212595600	20000126	19,300	1,655
212595600	20000127	18,744	0,610
212595600	20000128	18,342	0,235
212595600	20000129	18,234	0,310
212595600	20000130	18,195	0,455
212595600	20000131	18,661	0,235
212595600	20000201	19,388	1,135
212595600	20000202	19,331	0,255
212595600	20000203	20,378	0,475
212595600	20000204	20,063	2,670
212595600	20000205	19,252	2,215
212595600	20000206	19,698	1,440
212595600	20000207	19,362	0,235
212595600	20000208	19,264	1,170

Anexo 5. Generación de numero de curva mediante la herramienta de parametrización

Nuevos valores de número de curva (algunos datos)					
Comid	Nlcd_id	Número de curva	hydgrp	k_factor	ls_factor
212286500	13	36	A	0,182	2,028
212286900	2	64	A	0,182	3,255
212286900	13	36	A	0,182	5,555
212297900	2	64	A	0,181	1,403
212297900	10	49	A	0,181	1,533
212297900	13	36	A	0,182	1,127
212298000	2	64	A	0,182	5,439
212298000	10	49	A	0,182	3,163
212298000	13	36	A	0,182	4,944
212302500	2	64	A	0,182	2,013
212302500	10	49	A	0,182	1,086
212302500	13	36	A	0,182	1,948
212302600	2	64	A	0,182	1,912
212302600	13	36	A	0,182	2,070
212306800	2	64	A	0,178	1,205
212306800	10	49	A	0,181	1,764
212306900	10	49	A	0,182	7,445
212307200	2	64	A	0,182	0,794
212307200	10	49	A	0,182	0,998
212307300	2	64	A	0,182	1,392
212307300	10	49	A	0,182	1,397
212311100	10	49	A	0,181	1,525
212311200	10	49	A	0,182	1,413
212311700	2	64	A	0,182	0,736
212311700	10	49	A	0,182	1,274
212311800	10	49	A	0,182	0,337
212313300	10	49	A	0,182	0,292
212313700	2	64	A	0,182	0,561
212313700	10	49	A	0,182	0,530
212314300	10	87	D	0,175	0,327
212314400	10	49	A	0,182	0,324
212315000	10	49	A	0,178	0,358
212316100	10	49	A	0,181	0,231
212317900	10	49	A	0,179	0,404
212319300	10	49	A	0,182	1,164