



Análisis de la oferta y demanda usando índices hídricos en las microcuencas: La Santa Elena; La Miel y La López, pertenecientes a la cuenca del río Aburra-Medellín.

Jhonny Alejandro Ramírez Medina

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniería Ambiental

Asesor

Francisco José Molina Pérez, Doctor en Ingeniería Química y Ambiental

Co asesora

Nora Elena Villegas Jiménez, MSc. Ing. Ambiental

Universidad de Antioquia

Escuela Ambiental

Ingeniería Ambiental

Medellín

2023

Cita	(Ramírez Medina, 2023)
Referencia	Ramírez Medina, J. A. (2023). <i>Análisis de la oferta y demanda usando índices hídricos en las microcuencas: La Santa Elena; La Miel y La López, pertenecientes a la cuenca del río Aburra-Medellín, 2023</i> [Trabajo de Grado]. Universidad de Antioquia, Medellín.
Estilo APA 7 (2020)	



Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental -GAIA.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loaiza.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

Quiero agradecer a la Universidad de Antioquia por las experiencias y conocimientos brindados. Además, a las personas que hacen parte de la escuela ambiental, ya que fueron un gran apoyo a lo largo de mi carrera.

También, expresar un agradecimiento al Área Metropolitana Del Valle de Aburra y el grupo de investigación Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental - GAIA por facilitar la información obtenida del proyecto 8 “Actualización e implementación del registro de usuarios del recurso hídrico en la cuenca Aburra-Medellín” y permitirme participar en este.

Adicionalmente, presentar un agradecimiento al profesor Francisco Molina Pérez por ser el asesor del trabajo de grado.

Por último, inmenso agradecimiento a la profesora Nora Villegas y Carolina Valencia, las cuales fueron un pilar fundamental en la construcción de este trabajo de grado, por su gran apoyo y asesoramiento en este. Además, darle las gracias a todo el equipo y personas que participaron en el desarrollo del proyecto 8 “Actualización e implementación del registro de usuarios del recurso hídrico en la cuenca Aburra-Medellín”.

Tabla de contenido

Resumen	11
Abstract	12
Introducción	13
1 Planteamiento del problema	15
2 Objetivos	16
<i>1.1 Objetivo general</i>	<i>16</i>
<i>1.2 Objetivos específicos</i>	<i>16</i>
2 Marco teórico	17
3 Metodología	20
<i>3.1 Localización y área de estudio.</i>	<i>20</i>
<i>3.2 Determinación de la disponibilidad hídrica en términos de cantidad.</i>	<i>24</i>
3.1.1 Modelo de disponibilidad hídrica	27
3.1.1.1 Modelo De Elevación Digital – DEM	29
3.1.1.2 Shapefiles de Captaciones, Vertimientos y Red hídrica	33
3.1.1.3 Mapa didáctico de caudal disponible.	37
<i>3.3 Determinación del Índice De Uso Del Agua – IUA</i>	<i>38</i>
<i>3.3 Escenarios Modelados Con El Modelo De Disponibilidad Hídrica.</i>	<i>49</i>
3.3.1 Escenario actual sin vertimientos.	49
3.3.2 Escenario actual con vertimientos.	50
3.3.1 Escenario con demanda proyectada sin vertimientos	53
4 Resultados	55
<i>4.1 Resultados del Modelo de Disponibilidad y el IUA para las diferentes cuencas con los escenarios planteados.</i>	<i>55</i>
4.1.1 Cuenca La Santa Elena.	55

4.1.2 Cuenca La Miel.	61
4.1.3 Cuenca La López	67
5 Análisis	76
6 Conclusiones	86
Referencias	87
Anexos	90

Lista de tablas

Tabla 1 Escenarios Planteados para aplicar el modelo de disponibilidad hídrica	14
Tabla 2 Didactización - Categoría de clasificación del caudal disponible en m ³ /s y su respectivo color de visualización para las 3 microcuencas	38
Tabla 3 Interpretación del IUA	40
Tabla 4 Proyección de usuarios de prestadores de servicio de acueducto a 10 años.	54

Lista de figuras

Figura 1 Mapa de la cuenca Aburrá-Medellín y las microcuencas La López, La Miel y La Santa Elena	20
Figura 2 % del caudal captado para cada uso en la Cuenca La Santa Elena	21
Figura 3 % del caudal captado para cada uso en la Cuenca La Miel	22
Figura 4 % del caudal captado para cada uso en la Cuenca La López	23
Figura 5 Modelo de Disponibilidad en ModelBuilder teniendo en cuenta los vertimientos	25
Figura 6 Modelo de Disponibilidad en ModelBuilder	26
Figura 7 Modelo de disponibilidad Hídrica - Calculo del Caudal Disponible	27
Figura 8 Proceso para el Quemado del DEM	29
Figura 9 DEM quemado de la Cuenca La Santa Elena	31
Figura 10 DEM quemado de la Cuenca La López	31
Figura 11 DEM quemado de la Cuenca La Miel	32
Figura 12 Mapa de la Red Hídrica, las captaciones y DEM pertenecientes a la cuenca La López	34
Figura 13 Mapa de la Red Hídrica, las captaciones y DEM pertenecientes a la cuenca La Miel	36
Figura 14 Mapa de la Red Hídrica, las captaciones y DEM pertenecientes a la cuenca La Santa Elena	36
Figura 15 Modelo de disponibilidad hídrica - Elaboración de Mapa disponibilidad hídrica didáctico	37
Figura 16 Modelo de IUA en ModelBuilder	38
Figura 17 Ráster de Caudal Ambiental de la quebrada La López	41
Figura 18 Ráster de Caudal Acumulado Captado de la Cuenca La López	42
Figura 19 Ráster de Caudal Mínimo de la Cuenca La López	43
Figura 20 Ráster de Caudal Ambiental de la Cuenca La Miel	44
Figura 21 Ráster de Caudal Acumulado Captado de la Cuenca La Miel	44

Figura 22 Ráster de Caudal Mínimo de la Cuenca La Miel	45
Figura 23 Ráster de Caudal Ambiental de la Cuenca La Santa Elena	46
Figura 24 Ráster de Caudal Captado Acumulado de La cuenca La Santa Elena	47
Figura 25 Ráster de Caudal Mínimo de La Cuenca La Santa Elena	48
Figura 26 Mapa de Vertimientos Cuenca La López	50
Figura 27 Mapa de Vertimientos Cuenca La Miel	51
Figura 28 Mapa de Vertimientos Cuenca La Santa Elena	52
Figura 29 Mapa didáctico de disponibilidad hídrica de La Cuenca La Santa Elena - Escenario Actual sin vertimientos	55
Figura 30 Mapa IUA de La Cuenca La Santa Elena- Escenario actual sin vertimientos	56
Figura 31 Mapa didáctico de disponibilidad hídrica de La Cuenca La Santa Elena - Escenario con demanda proyectada sin vertimientos	57
Figura 32 Mapa IUA de La Cuenca La Santa Elena- Escenario con demanda proyectada sin vertimientos	58
Figura 33 Mapa didáctico de disponibilidad hídrica de La Cuenca La Santa Elena - Escenario actual con vertimientos	59
Figura 34 Mapa IUA de La Cuenca La Santa Elena- Escenario actual con vertimientos	61
Figura 35 Mapa didáctico de disponibilidad hídrica de La Cuenca La Miel - Escenario actual sin vertimientos	61
Figura 36 Mapa IUA de La Cuenca La Miel - Escenario actual sin vertimientos	62
Figura 37 Mapa didáctico de disponibilidad hídrica de La Cuenca La Miel - Escenario con demanda proyectada sin vertimientos	63
Figura 38 Mapa IUA de La Cuenca La Miel - Escenario con demanda proyectada sin vertimientos	64
Figura 39 Mapa didáctico de disponibilidad hídrica de La Cuenca La Miel - Escenario actual con vertimientos	65
Figura 40 Mapa IUA de La Cuenca La Miel - Escenario actual con vertimientos	66
Figura 41 Mapa didáctico de disponibilidad hídrica de La Cuenca La López - Escenario actual sin vertimientos	67

Figura 42 Mapa IUA de La Cuenca La López – Escenario actual sin vertimientos	69
Figura 43 Mapa didáctico de disponibilidad hídrica de La Cuenca La López - Escenario con demanda proyectada sin vertimientos	70
Figura 44 Mapa IUA de La Cuenca La López - Escenario con demanda proyectada sin vertimientos	72
Figura 45 Mapa didáctico de disponibilidad hídrica de La Cuenca La López – Escenario actual con vertimientos	73
Figura 46 Mapa IUA de La Cuenca La López - Escenario actual con vertimientos	75
Figura 47 Resultado IUA de la Microcuenca La López en los diferentes escenarios planteados	76
Figura 48 Resultado Caudal Disponible de la Microcuenca La López en los diferentes escenarios planteados	76
Figura 49 Resultados de caudal disponible de la Microcuenca La Santa Elena en los diferentes escenarios planteados	78
Figura 50 Resultados del IUA de la Microcuenca La Santa Elena en los diferentes escenarios planteados	80
Figura 51 Resultados del IUA de la Microcuenca La Miel en los diferentes escenarios planteados	82
Figura 52 Resultados del caudal disponible de la Microcuenca La Miel en los diferentes escenarios planteados	83

Siglas, acrónimos y abreviaturas

AMVA	Área Metropolitana del Valle de Aburra
DANE.	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DEM	Modelo de Elevación Digital
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IUA	Índice de Uso del Agua
POMCA	Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Hidrográfica
PORH	Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico
RURH	Registro de Usuarios del Recurso Hídrico
SHP	Shapefile
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SIRH	Sistema de Información del Recurso Hídrico
UdeA	Universidad de Antioquia
UNAL	Universidad Nacional de Colombia

Resumen

En el presente trabajo de grado se hace uso de la información levantada por el proyecto 8 “Actualización e implementación del registro de usuarios del recurso hídrico en la cuenca Aburra-Medellín”, además de una metodología y modelo para el cálculo de disponibilidad hídrica propuesto por Valencia Tobón (2015), el cual se adapta y modifica con el fin de aplicar unas correcciones que permitan disminuir los errores del modelo, también para adicionarle otras opciones para la obtención de un resultado espacial del caudal disponible en tres escenarios diferentes (Escenario actual sin vertimientos, Escenario con demandas proyectadas a 10 años y Escenario actual con vertimientos) a lo largo de las microcuencas La Santa Elena; La Miel y La López, para lo cual se usan herramientas SIG (Sistema de Información Geográfica) como ArcGIS y MapWindow. adicionalmente, con estos resultados obtenidos se calcula el índice del Uso Del Agua - IUA propuesto por el IDEAM (2020), con el fin de realizar un análisis de disponibilidad hídrica en términos de cantidad para estas tres microcuencas con los tres escenarios planteados, y así facilitar la gestión del recurso hídrico.

Palabras clave: SIG, caudal disponible, modelo, cuencas

Abstract

In this degree work, data was taken from Proyecto 8 “Actualización e implementación del registro de usuarios del recurso hídrico en la cuenca”, in addition to some methodologies and models for the calculation of water flow availability proposed by Valencia Tobón (2015), which are adapted and modified to be able to apply some corrections, in addition to adding other options to obtain a spatial result of the flow available in 3 different scenarios (Current Scenario Without waste water discharges scenario, scenario with projected demand for 10 years, and Current Scenario with waste water discharges) through the micro-watersheds La Santa Elena; La Miel and La López, using software tools like ArcGIS and MapWindow. In addition, with these results it's obtained IUA proposed by IDEAM (2020). In order to carry out an analysis of water flow availability in terms of quantity for these 3 micro-watersheds with the 3 proposed scenarios, and thus facilitate the management of water resources.

Keywords: gis, Water flow availability, arcGIS, models, watershed

Introducción

En la gestión del recurso hídrico es importante tener en cuenta la disponibilidad hídrica del territorio, conociendo la demanda actual del recurso, las condiciones necesarias para mantener el ecosistema, la variabilidad y características climáticas de las corrientes oferentes, ya que facilita conceder el agua requerida por los diferentes usuarios que la necesitan sin agotar el recurso (Valencia Tobón, 2015; Red-Rio, 2016). Sin embargo, se tiene poca información de los usuarios del recurso hídrico en la cuenca del río Aburrá-Medellín, dado que según Red-Rio y UdeA (2018) de 2206 probables usuarios con captaciones superficiales identificados en la formulación del PORH (Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico), solo se cuenta con 1216 registrados en las bases de datos de las autoridades ambientales, y en 2017 solo 148 usuarios estaban registrados en el SIRH (Sistema de Información del Recurso Hídrico). En el caso de los vertimientos, se tiene una situación similar, de los 8000 posibles usuarios identificados, solo se tiene reportes de 1183, y de estos, en el año 2017 había 38 registrados en el SIRH (Red-Rio & UdeA, 2018). También, en escalas más locales como las microcuencas pertenecientes a la cuenca del río Aburrá-Medellín el conocimiento del recurso hídrico es parcial, debido a que se tienen datos de oferta y demanda poco actualizados y en una baja cantidad, esto por diferentes motivos como: bajo nivel de participación en los procesos de registro y legalización de usuarios; al diagnóstico deficiente del registro de usuarios existentes; al levantamiento escaso de información en campo y al bajo nivel de registro de la información (Red-Rio & UdeA, 2018). Por este motivo, se planteó el proyecto 8 “Actualización e implementación del registro de usuarios del recurso hídrico en la cuenca Aburra-Medellín” el cual tiene como propósito obtener una base de información actualizada de los usuarios del recurso hídrico de la cuenca del río Aburrá-Medellín, para ponerla a disposición de las autoridades ambientales.

Entonces, se conoce que la información desactualizada y/o limitada supone un problema en la gestión integral del recurso en las microcuencas, ya que dificulta el uso de herramientas como modelos de oferta y demanda e índices hídricos, que mejoran y facilitan la gestión del recurso. Por eso, el presente trabajo, aprovecha la información levantada en el desarrollo del Proyecto 8 del PORH del río Aburrá – Medellín (AMVA, 2022), en el cual se actualizó la base de datos de usuarios existentes y se generó nueva información mediante levantamiento de campo. A partir de esta información se realizó un análisis hídrico de demanda y oferta a escala local en las microcuencas

La Santa Elena, La Miel y La López, las cuales se encuentran priorizadas por diferentes instrumentos de planificación, como el Plan Quebradas del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (<https://www.metropol.gov.co/ambiental/Paginas/Plan-Quebradas.aspx>), y el PORH (AMVA, 2018). Asimismo, se hizo el análisis en 3 escenarios diferentes para las microcuencas, uno con la situación actual de las microcuencas sin tener en cuenta las aguas por vertimientos, otro teniendo en cuenta las aguas descargadas por vertimientos, y uno con una demanda proyectada a 10 años sin tener en cuenta los vertimientos.

Este análisis hídrico de demanda y oferta se llevó a cabo usando el modelo de disponibilidad hídrica propuestos por Valencia Tobón (2015), además teniendo en cuenta el módulo de disponibilidad planteado por Red-Rio (2016) para AMVA (Área metropolitana del Valle de Aburra). También, se aplicó el indicador hídrico Índice de Uso del Agua- IUA propuestos por el IDEAM (2020). Todo estos usando el software ArcGIS y MAPWINDOWS, obteniendo como resultado mapas de oferta, demanda y disponibilidad hídrica a lo largo de las cuencas, para así facilitar el análisis de disponibilidad hídrica, el cual es fundamental tener en cuenta en la gestión del recurso hídrico.

Tabla 1

Escenarios Planteados para aplicar el modelo de disponibilidad hídrica

Escenarios	Suposiciones
Situación Actual sin Vertimientos	En este escenario se plantea modelar la situación actual encontrada en la información del proyecto 8, solo teniendo en cuenta las captaciones de agua, y sin tener en cuenta los vertimientos de agua residual como agua disponible
Situación Actual con Vertimientos	En este escenario se plantea modelar la situación actual encontrada en la información del proyecto 8, pero teniendo en cuenta tanto captaciones como vertimientos de aguas doméstica, para esto se supone varias cosas explicadas en la metodología, en el Escenario Actual Con Vertimientos
Situación con demanda proyectada sin vertimientos	En este escenario se plantea modelar la situación con una demanda proyectada a 10 años, en la cual los usuarios de los prestadores de servicio de acueducto incrementan según una tasa de crecimiento de la zona, además, no se tiene en cuenta los vertimientos (Explicación completa en metodología Escenario con Demanda Proyectada sin vertimientos)

1 Planteamiento del problema

En las microcuencas pertenecientes a la cuenca del río Aburrá-Medellín el conocimiento del recurso hídrico es parcial, debido a que se tienen datos de oferta y demanda poco actualizados y en baja cantidad por diferentes motivos como: bajo nivel de participación en los procesos de registro y legalización de usuarios; al diagnóstico deficiente del registro de usuarios existentes; al levantamiento escaso de información en campo y al bajo nivel de registro de la información (Red-Rio & UdeA, 2018). Esta falta de información supone un problema en la gestión integral del recurso a lo largo de las microcuencas de alta prioridad para las autoridades ambientales competentes, ya que la información insuficiente y fragmentaria de usuarios del recurso hídrico existentes en las bases de datos de las autoridades ambientales y el incumplimiento de la normatividad vigente dificulta la toma de decisiones con respecto al recurso hídrico. Además, entorpece el uso de herramientas como modelos e índices hídricos, que mejoran y facilitan la gestión del recurso. Por ello se propone realizar un análisis hídrico de demanda y oferta con datos actualizados y en mayor cantidad obtenidos por medio del proyecto 8 del PORH de la cuenca Aburra-Medellín, usando esto en un análisis a escala local en tres microcuencas de alta prioridad, usando como herramientas modelos de disponibilidad hídrica y SIG, con el fin de contribuir con un aumento del conocimiento de las unidades hidrológicas de estudio y así facilitar la gestión del recurso hídrico.

2 Objetivos

1.1 Objetivo general

Analizar la oferta y demanda del recurso hídrico a escala local en tres microcuencas priorizadas del valle de Aburrá: quebradas La Santa Elena, La Miel y La López; por medio del cálculo y análisis del índice hídrico IUA y metodologías propuestas para el cálculo de la oferta y demanda hídrica, usando información del Registro de usuarios del recurso hídrico RURH de las autoridades ambientales con jurisdicción en la cuenca del río Aburrá–Medellín, con el fin de contribuir a la gestión del recurso hídrico.

1.2 Objetivos específicos

Analizar los datos depurados de los usuarios del recurso hídrico de las bases de datos de las autoridades ambientales con jurisdicción en la cuenca del río Aburrá-Medellín y levantados a través del proyecto 8 “Actualización e implementación del registro de usuarios del recurso hídrico en la cuenca Aburra-Medellín” para caracterizar los usuarios y demandas de agua.

Determinar la disponibilidad hídrica en las tres microcuencas priorizadas mediante la aplicación de un modelo hidrológico que permita identificar dicha disponibilidad, al aplicar las metodologías aceptadas por el IDEAM y usando como base, modelos anteriores de disponibilidad hídrica implementados en las microcuencas del río Aburrá-Medellín.

Analizar el índice hídrico IUA a lo largo de las tres microcuencas a partir de los resultados obtenidos.

2 Marco teórico

En la gestión del recurso hídrico, los modelos de la oferta y la demanda hídrica se hacen indispensables para la toma de decisiones actuales y futuras, ya que permite tener un registro, concepto y/o proyección de escenarios planteados para la disponibilidad hídrica de una región (Red-Rio, 2016; Valencia Tobón, 2015). Por esto, es importante que las autoridades ambientales competentes cuenten con un inventario de la información de la oferta natural de la cuenca, la cantidad de agua necesaria para la subsistencia del ecosistema y la cantidad de extracciones (concesiones) o aportes presentes (trasvases, vertimientos, etc.) en esta (Red-Rio, 2016; Red-Rio & UdeA, 2018), este inventario de información de demanda es facilitando gracias a herramientas como al Registro de Usuarios del Recurso Hídrico-RURH. El cual, ayuda con el objetivo de determinar la disponibilidad hídrica actual o proyectada, además de contribuir con información de valor importante en la toma de decisiones con respecto a la gestión del recurso hídrico (Red-Rio & UdeA, 2018).

Para determinar la disponibilidad espacial de agua se utiliza el método de balance hídrico a largo plazo, en el cual se supone que el almacenamiento en el suelo y en la atmosfera es nimio en un periodo de tiempo largo (décadas) (Vélez el al., 2008; Valencia Tobón, 2015; Red-Rio, 2016), y este se determina restando la demanda y el caudal ambiental de la oferta natural de agua de la microcuenca (Valencia Tobón, 2015; Red-Rio, 2016).

El caudal ambiental, de acuerdo al Decreto 3930 del 2010 [MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE] lo define como “Volumen de agua necesario en términos de calidad, cantidad, duración y estacionalidad para el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos y para el desarrollo de las actividades socioeconómicas de los usuarios aguas abajo de la fuente de la cual dependen tales ecosistemas”. Entonces, para determinar este caudal ambiental, en la resolución 865 del 2004 del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, se proponen diferentes metodologías, entre las cuales está la de Porcentaje de Descuento, en la cual el IDEAM acoge como caudal ambiental un valor aproximado del 25% del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente en estudio. Por otro lado, también hay otra metodología propuesta por el IDEAM (2020) en la cual se toma como referencia el índice de Regulación Hídrica –IRH, esta metodología se aplicó en el contexto del Estudio Nacional del Agua-ENA 2018 (IDEAM, 2017;

IDEAM, 2020; IDEAM, 2018; IDEAM, 2020). Se debe escoger la metodología a usar de acuerdo con la información disponible y las características particulares de la región. (MinAmbiente, 2010).

En el ENA, la Demanda Hídrica se entiende como la cantidad de agua sustraída del sistema hídrico en un periodo determinado, para abastecer los requerimientos de consumo humano, las actividades económicas y necesidades propias de los ecosistemas de la región (IDEAM, 2018; IDEAM, 2020). Además, para la estimación de la Demanda Hídrica de las actividades socioeconómicas, se mencionan los usos del agua definidos en la resolución 3930 de 2010 como Doméstico, industrial, preservación, agrícola, recreativo, pecuario, estético, acuícola, navegación y transporte acuático.

Para determinar el caudal disponible Valencia Tobón (2015) propuso un modelo discreto aplicado en SIG, partiendo del balance hídrico y la definición de Caudal Disponible planteada en la Resolución 865 de 2004 [MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE] como: “El volumen disponible para satisfacer la demanda generada por las actividades sociales y económicas del hombre, al cuantificar la escorrentía superficial a partir del balance hídrico de la cuenca, se está estimando la oferta de agua superficial de la misma”. para la estimación del caudal mínimo se utilizó unas ecuaciones de regionalización propuestas por UNAL et al. (2004) y a partir un modelo lluvia-escorrentía de parámetros físicos agregados diarios denominado modelo de tanques desarrollado por Vélez (2001) calibrado en zonas estratégicas del Río Aburra-Medellín hasta obtener un ajuste lineal con el área de la microcuenca La Doña María (Vélez et al., 2008).

Los sistemas de información geográfica (SIG) son indispensables a la hora de conocer la disponibilidad del recurso hídrico en el territorio, ya que facilita el recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica del recurso hídrico (Recalde Aza, 2015; Red-Rio, 2016). Para esto, se pueden usar software SIG como ArcGIS y MapWindow (Valencia Tobón, 2015; Red-Rio, 2016), por ejemplo, MapWindow cuenta con una extensión llamada HydroSIG, desarrollada por la Universidad Nacional de Colombia-UNAL, con esta herramienta se puede realizar estimaciones y análisis de variables hidrológicas, facilitando el manejo del recurso hídrico (UNAL, 2014). Los SIG emplean dos formas de representar la información, un ráster que consiste en una matriz de píxeles ordenados en una cuadrícula en donde cada uno tiene un valor que representa información (ESRI, 2021). Por otro lado, el modelo vectorial no fracciona la

información de la zona en una matriz, sino que la representa mediante una serie de elementos geométricos como puntos, líneas y/o polígonos, a los que se le asocia un valor (Qgis, 2020; ESRI, 2016). Entonces, tanto ArcGIS como MapWindow aceptan para ráster un formato conocido como TIFF (por sus siglas en inglés de Tagged Image File Format (Valencia Tobón, 2015; ESRI, 2020) Para el modelo vectorial el formato usado en ArcGIS es Shapefile (SHP), también compatible en MapWindow GIS (UNAL, 2014; Valencia Tobón, 2015; ESRI, 2016).

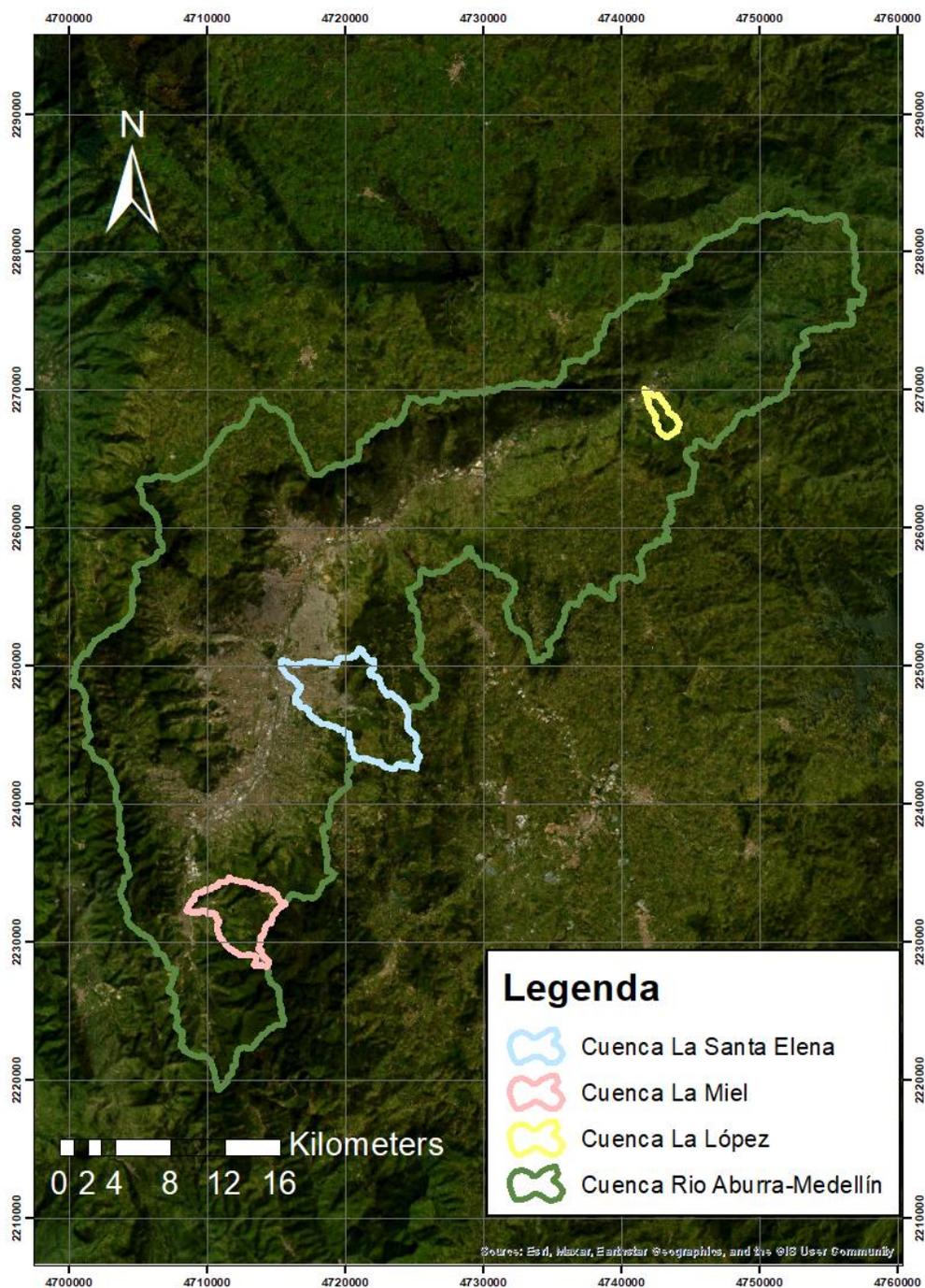
Otra herramienta importante a la hora de la gestión del recurso hídrico son los Índices Hídricos, ya que permiten tener una perspectiva más amplia de la situación o estado de las unidades hidrológicas (IDEAM, 2018). El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (2020) elaboró unos indicadores de presión por usos de agua, entre los cuales está el índice de Uso del Agua - IUA para el que se definió una metodología (versión 1.2 del año 2020), con el objetivo de mostrar el grado de presión de la demanda socioeconómica de agua sobre la oferta hídrica superficial disponible en una región hidrográfica, ensayando la relación directa entre uso del agua y su disponibilidad, contribuyendo al análisis sobre la vulnerabilidad (IDEAM, 2020). Y así, poder tener una referencia que permita explicar las relaciones entre la oferta y la demanda de agua, y relacionar la transformación y variabilidad de las actividades antrópicas con la vulnerabilidad hídrica en los ecosistemas o restricciones de aprovechamiento en algunos cuerpos de agua superficiales. (IDEAM, 2020; IDEAM, 2018).

3 Metodología

3.1 Localización y área de estudio.

Figura 1

Mapa de la cuenca Aburrá-Medellín y las microcuencas La López, La Miel y La Santa Elena



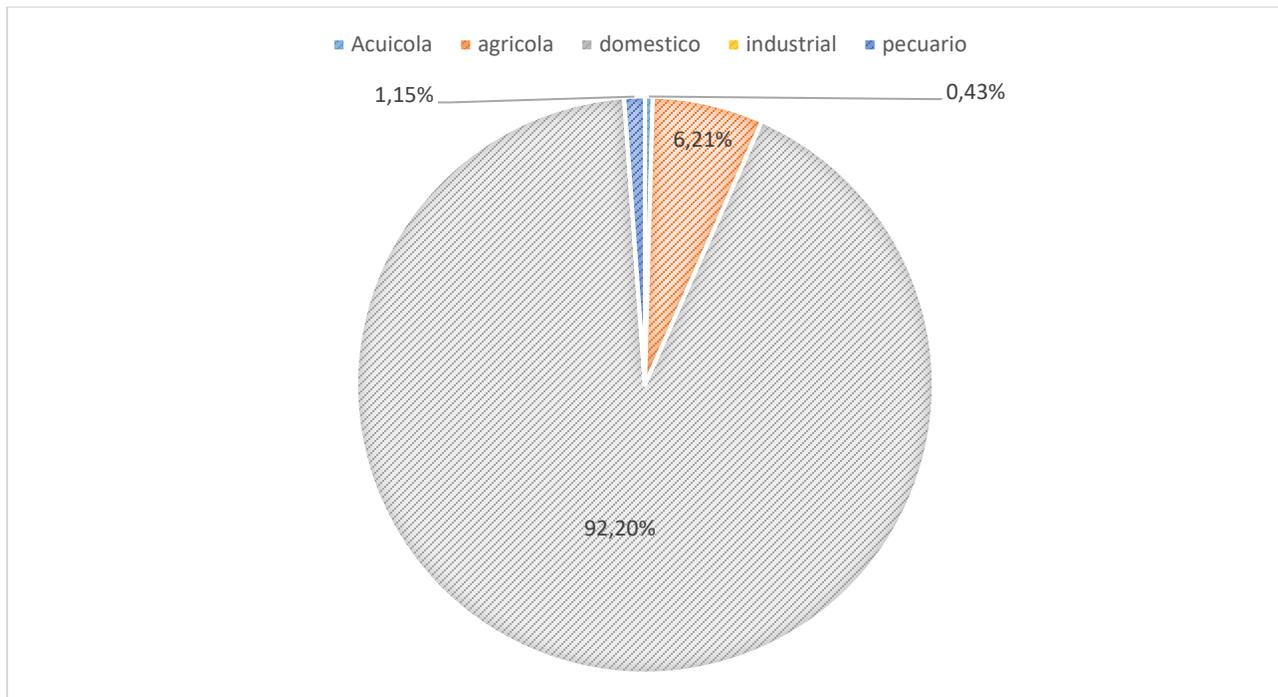
Nota. Se muestra las ubicaciones de las microcuencas La Santa Elena, La Miel y La López dentro de la cuenca Aburrá-Medellín.

Las microcuencas La López, La Miel y La Santa Elena se encuentran con zonas cada vez más contaminadas y vulnerables, con un incremento considerable de población y con pocos espacios naturales, por eso se encuentran priorizadas en El Plan Quebradas del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, el cual es un instrumento de planificación y gestión del recurso hídrico que busca la recuperación integral de 19 microcuencas priorizadas pertenecientes a la cuenca Aburra-Medellín (Área Metropolitana del Valle de Aburrá -AMVA, s.f.; Red-Rio, 2016). Estas tres microcuencas se encuentran en el departamento de Antioquia, Colombia, La microcuenca La López se ubica en el municipio de Barbosa y cuenta con un área de 3,76 km², La Miel en el municipio de Caldas y tiene un área de 22,29 km², y La Santa Elena en el municipio de Medellín y presenta un área de 44,60 km² (AMVA, s.f.).

Las tres microcuencas hicieron parte del proceso realizado por el Proyecto 8 “Actualización e implementación del registro de usuarios del recurso hídrico en la cuenca Aburrá-Medellín” obteniendo gran cantidad de datos e información (**Anexos 1** Tabla de captaciones de las tres microcuencas con usos de agua y caudal captado), donde se encontró que la microcuenca La Santa Elena es la que tiene mayor demanda de agua con un caudal total captado cercano a 104 L/S, Seguida de la Miel con un caudal total captado de 53 L/S y finalmente la Microcuenca la López con 29 L/S. Además, a lo largo de las cuencas se presentan diferentes usos de agua, unos con mayor demanda que otros.

Figura 2

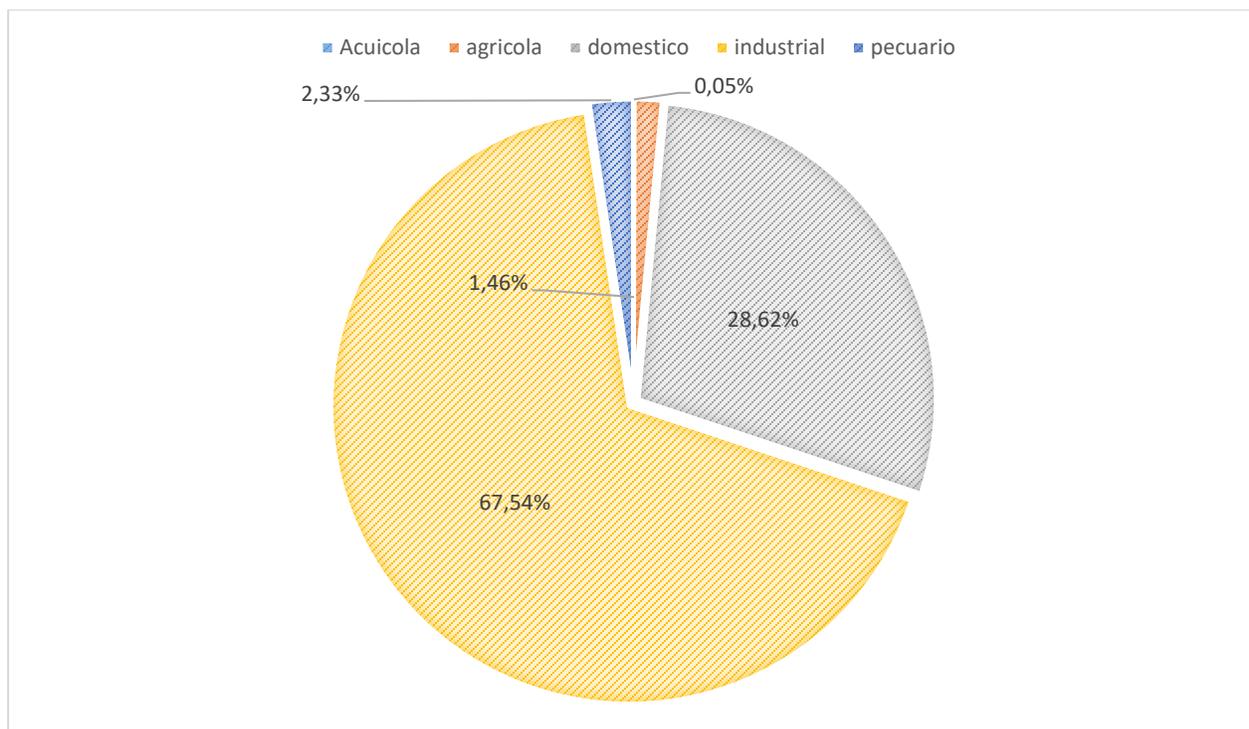
% del caudal captado para cada uso en la Cuenca La Santa Elena



Nota. La gráfica e información se obtuvo en base a los datos proporcionados por el proyecto 8 “Actualización e implementación del registro de usuarios del recurso hídrico en la cuenca Aburrá-Medellín”, los cuales están plasmados en el *Anexo 1*.

Por ejemplo, en la microcuenca La Santa Elena el principal uso para el agua es el doméstico, como se muestra en la *Figura 2*, con cerca del 92,2% del caudal total captado. A este, le sigue el uso agrícola con 6,21% del caudal total captado. Y, por último, usos menos comunes son acuícola y pecuario, con 0,43% y 1,15% respectivamente.

Figura 3
% del caudal captado para cada uso en la Cuenca La Miel

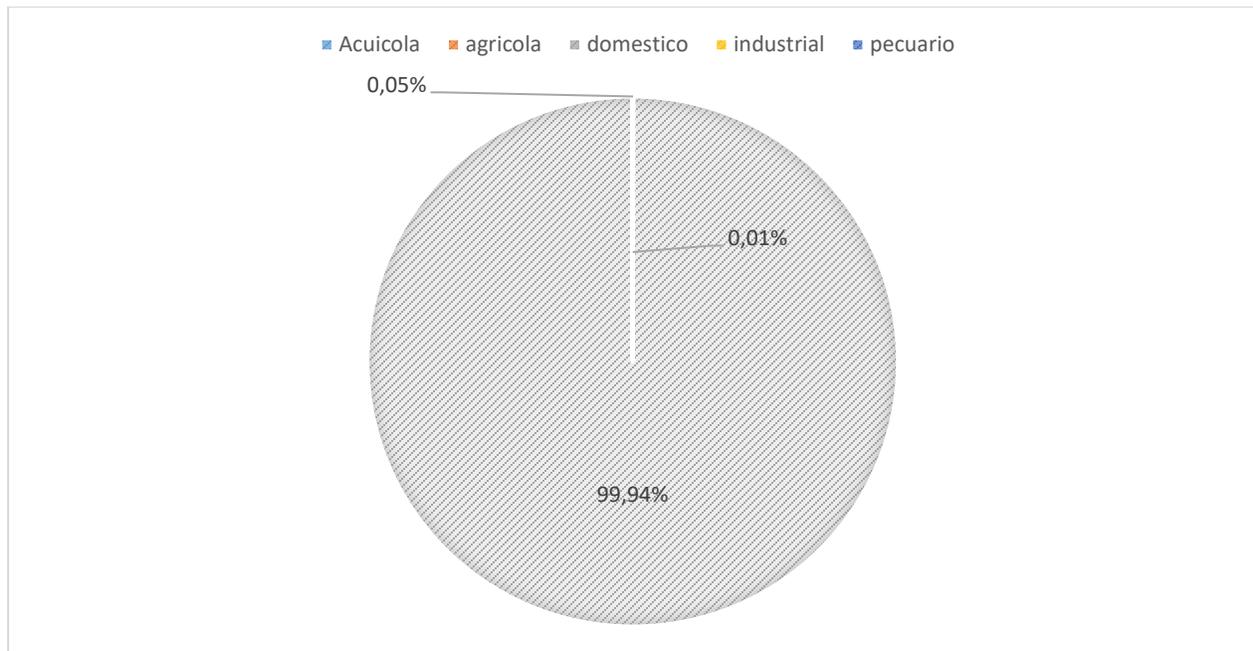


Nota. La gráfica e información se obtuvo en base a los datos proporcionados por el proyecto 8 “Actualización e implementación del registro de usuarios del recurso hídrico en la cuenca Aburrá-Medellín”, los cuales están plasmados en el *Anexo 1*.

Por otro lado, en la Microcuenca La Miel el principal uso que se le da al agua es el uso industrial como muestra la *Figura 3*, con cerca del 67,54% del caudal total captado. A este, le sigue el uso doméstico con el 28,62%. Y los que presentan un menor uso son el pecuario con el 2,33%, el agrícola con 1,46% y el acuícola con el 0,05%.

Figura 4

% del caudal captado para cada uso en la Cuenca La López



Nota. La gráfica e información se obtuvo en base a los datos proporcionados por el proyecto 8 “Actualización e implementación del registro de usuarios del recurso hídrico en la cuenca Aburrá-Medellín”, los cuales están plasmados en el *Anexo 1*.

También, en la microcuenca La López el principal uso es el doméstico, como se muestra en la *Figura 4* es cerca del 99,94%. Y, por último, los usos agrícolas con el 0,05% y el pecuario con 0,01%. Además, se encontró que en los datos disponibles no se registraba uso acuícola o industrial en la zona.

3.2 Determinación de la disponibilidad hídrica en términos de cantidad.

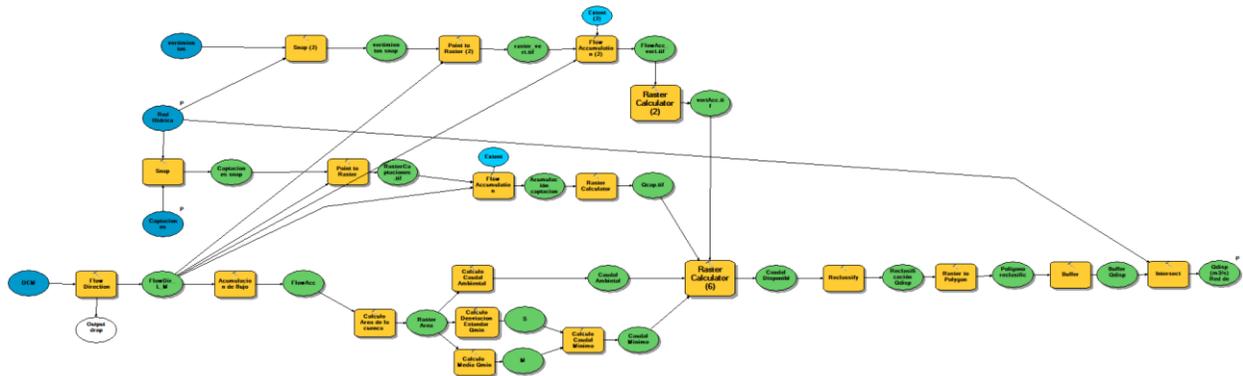
Para el análisis de disponibilidad hídrica se usó un modelo de disponibilidad hídrica propuestos por Valencia Tobón (2015), además de unos módulos desarrollados por Red-Río (2016) y Valencia Tobón (2015), los cuales se modificaron. Estos módulos son muy similares, consisten en un flujo de geoprocementos elaborado en la herramienta modelbuilder del software ArcGIS, que se usa para elaborar y manejar modelos, los cuales consisten en flujos de trabajo que unen series de herramientas de geoprocementamiento y facilitar la salida de una herramienta a otra como entrada (ESRI, 2016). El módulo de Red-Río (2016) (*Anexos 2* Módulo de disponibilidad hídrica propuesto por Red-Río) fue elaborada como propuesta para el AMVA (Área Metropolitana del Valle de Aburrá) y requiere como insumos, dos archivos

shapefiles de puntos, uno para las captaciones de agua y otra de descargas de los vertimientos, sin embargo, este último solo se tiene en cuenta si se plantea incluir en el balance hídrico los vertimientos como entradas de agua. Además, se requiere de 3 archivos ráster, uno que represente las direcciones de flujo, otro el caudal mínimo, y por último un ráster de caudal ambiental. Por otro lado, el modelo y modulo propuestos por Tobón (2015) (*Anexos 3* Módulo de disponibilidad hídrica propuesto por Tobón (2015)), en el cual se necesita como insumos dos shapefiles, uno de puntos que represente las captaciones y otro de líneas que represente la red de drenaje, también, es necesario dos ráster, uno para la dirección de flujo y otro para la acumulación de flujo, además, se propone una metodología donde se discretiza los resultados del modelo con el fin de que se puedan apreciar de una forma más didáctica por medio de colores relacionados a unos intervalos con los valores de los resultados, agregado a todo esto, este modelo propone usar unas ecuaciones de regionalización donde se relaciona el caudal ambiental o el caudal mínimo con el área de la cuenca, este modelo se aplicó a la microcuenca Quebrada Doña María del Valle de Aburrá, ubicada en Antioquia Colombia (Valencia Tobón ,2015).

Teniendo estos módulos en cuenta, se modificó el modelo propuesto por Valencia Tobón (2015) agregándole la función “Snap” de ArcGIS, lo que permite editar el Shapefiles de los puntos de las captaciones y/o vertimientos, esta función hace que los puntos se muevan a la red de drenaje más cercana de la microcuenca, ya que por diferentes factores los puntos de las captaciones pueden estar fuera de la red de drenaje, esto se aplicó con el objetivo de que el modelo de disponibilidad hídrica realice el cálculo sobre la red hídrica, que es donde está la mayor acumulación de flujo. También, se cambió el modelo para que los insumos requeridos solo sean: el DEM, la red de drenaje y los Shapes de las captaciones y/o vertimientos de la microcuenca, esto se logró haciendo que el mismo modelo realice la dirección y acumulación de flujo a partir del DEM, logrado con las funciones de ArcGIS “Flow Direction” y “Flow Accumulation” el cual es un ráster, donde cada pixel representa un valor acumulado según la dirección de flujo en las zonas de estudio (Valencia Tobón, 2015).

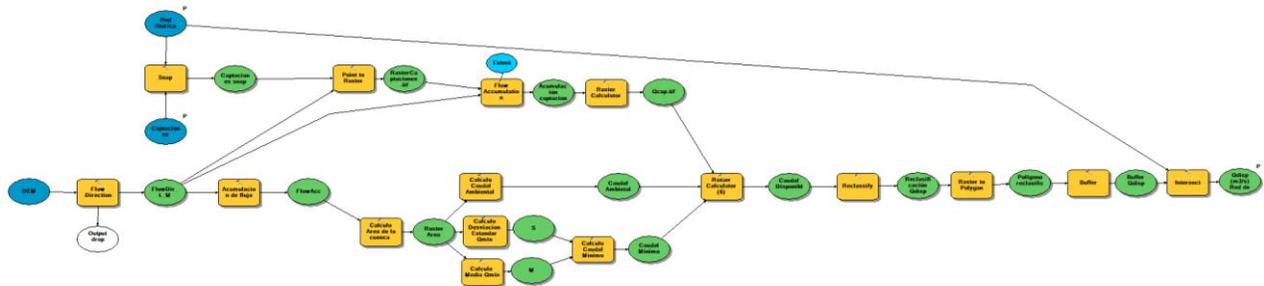
Figura 5

Modelo de Disponibilidad en ModelBuilder teniendo en cuenta los vertimientos



Nota. Se presenta el modelo de disponibilidad en el cual se puede tener en cuenta los vertimientos. Adaptado de Valencia Tobón (2015).

Figura 6
Modelo de Disponibilidad en ModelBuilder



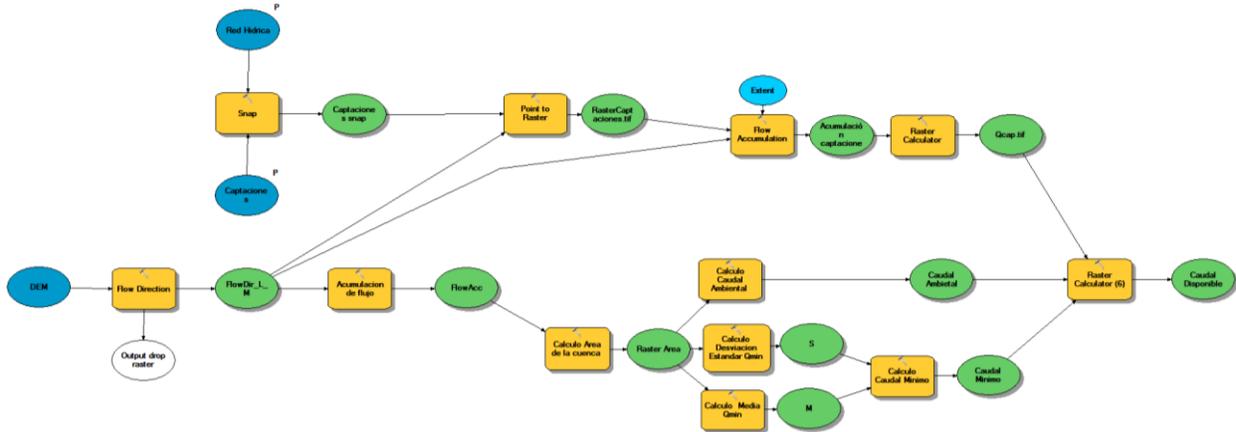
Nota. Se presenta el modelo de disponibilidad en el cual no se tiene en cuenta los vertimientos, solo las captaciones. Adaptado de Valencia Tobón (2015).

Finalmente, el modelo de disponibilidad hídrica queda como en la **Figura 5** y **Figura 6**, en donde se ve que los óvalos con azul más oscuro son las entradas del modelo (DEM, Red Hídrica y SHP de Captaciones y/o vertimientos), los rectángulos naranjados son las funciones o geoprocamos que se están dando dentro del modelo (“flow accumulation”; “Flow direction;” raster calculator” y “point to raster”), en color azul claro, esta los condicionales, en este caso “Extend” que obliga que el geoprocamos se de a lo largo de toda la cuenca. Y finalmente, los óvalos verdes son los resultados de ese geoprocamos (Caudal Ambiental, Caudal Mínimo, Caudal Disponible, y finalmente el Caudal disponible reclasificado).

3.1.1 Modelo de disponibilidad hídrica

Figura 7

Modelo de disponibilidad Hídrica - Calculo del Caudal Disponible



Nota. Se muestra la primera parte del modelo de disponibilidad hídrica, en donde se calcula el caudal disponible en M³/S. Adaptado de Valencia Tobón (2015).

En la primera parte del modelo se determina el caudal disponible, donde en el lugar superior se calcula la demanda de agua en la microcuenca con el caudal captado por los usuarios, iniciando el proceso con trasladar los puntos a la red hídrica más cerca. Posteriormente, se pasa los puntos de formato SHP a formato Ráster usando la función de ArcGIS “Point to Raster”, teniendo como valor de pixel el caudal captado, ya con este ráster se acumula los valores de los caudales captados a lo largo de toda la cuenca siguiendo la dirección de flujo que se elaboró con el DEM. Después, con la función de ArcGIS “Raster Calculator” se pasa el Ráster que representa la acumulación de las captaciones de litros por segundo a metros cúbicos por segundo. Finalmente, este Ráster de acumulación de Captaciones en M³/S pasa con el nombre de Qcap.tif a otra función “Raster Calculator”, en la que se realiza la geometría de mapas que aplicar la **Ecuación 1** (Balance hídrico).

$$Dh = OhQmin - Qamb - Qcap + Qver \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde Dh es la disponibilidad hídrica; OhQmin es la oferta hídrica, y para prevenir la escasez y además garantizar el flujo de agua constante sobre las corrientes, Red-Rio (2016) y Valencia Tobón (2015) sugieren adoptar como oferta hídrica el caudal más bajo presente en la cuenca durante un tiempo de sequía importante, para la región Andina Colombiana, es el caudal mínimo presente durante un evento El Niño, que por convención hidrológica es el caudal mínimo

con un periodo de retorno de 10 años (Red-Rio, 2016); Q_{amb} es el caudal ambiental; Q_{cap} es el caudal captado o extraído y Q_{ver} el caudal vertido sobre la corriente u otros trasvases.

Simultáneamente, con el DEM se elabora la dirección de flujo de la microcuenca, y como siguiente paso se realiza una acumulación de flujo (ya que no se le especifico un valor al pixel el programa lo toma como 1). Con este ráster de acumulación de flujo se usa la función “Raster Calculator” en la cual se multiplica el ráster por la resolución del DEM (10 x 10 Metros), con el objetivo de obtener un ráster con el área acumulada a lo largo de toda la microcuenca.

Después, con este ráster de área acumulada se pasa a otras 3 funciones “Raster Calculator”, en una se calcula el caudal Ambiental teniendo en cuenta la **ecuación 2** propuesta por Vélez et. Al. (2008) (Calibrando el modelo de tanques), y la definición de la resolución 865 del 2004 propuesta por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, en la cual el IDEAM lo toma como el 25% del caudal mensual multianual más bajo en la cuenca, que para el caso del río Aburrá - Medellín y sus afluentes se presenta durante los meses de enero o febrero (Red-Rio, 2016; Valencia Tobón, 2015). Esta ecuación relaciona el caudal ambiental (Q_{amb}) y el área de la cuenca (A).

$$Q_{Amb} = 6.1922A \quad \text{Ecuación 2}$$

Además, en las otras dos funciones “Raster Calculator” se calcula el caudal medio con la **ecuación 3** y desviación estándar con la **ecuación 4**, propuestas por UNAL et al. (2004), en donde se estiman a partir de unas relaciones con el área de la cuenca (A) en Km².

$$\mu_{min} = 0.01358A \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\sigma_{min} = 0.003648A \quad \text{Ecuación 4}$$

Posteriormente, con los dos ráster obtenidos para el caudal medio y la desviación estándar, se calcula el caudal mínimo (L/S) teniendo en cuenta la **ecuación 5** propuesta por Chow, et al. (1994) y tomando como valor K igual a 1.23, que es el resultado de la **ecuación 6** para un periodo de retorno de 10 años.

$$OhQ_{min10} = \mu_{min} + K\sigma_{min} \quad \text{Ecuación 5}$$

En donde k es un factor de frecuencia que depende de un periodo de retorno T_r y la función de distribución de probabilidad de valores extremos Gumbel.

$$K = \frac{-\sqrt{6}}{\pi} \{0.5772 + \ln[-\ln(\frac{1}{T_r})]\} \quad \text{Ecuación 6}$$

Finalmente, estos dos ráster de caudal ambiental y caudal mínimo pasan a la misma función donde va el $Q_{cap.tif}$, en la cual se determina el caudal disponible usando la **ecuación 1**, arrojando como resultado un ráster con el caudal disponible en M^3/S .

3.1.1.1 Modelo De Elevación Digital – DEM

Algo muy usado en los estudios hidrológicos es el Modelo de Elevación Digital (DEM), el cual representa una superficie continua en modelo ráster que normalmente es la superficie de una zona (ESRI, s.f.; Vélez et al., 2008; Chow et al., 1994; Recalde Aza, 2015; Red-Rio, 2016). Con esto, usando la extensión “Watershead Delineation” del software MAPWINDOW a los DEM se les puede realizar un proceso denominado “Quemado”, el cual consiste en reducir el valor de elevación de los pixeles del DEM por donde pasa la red de drenaje, con el objetivo de aumentar los gradientes y facilitar la estimación de la dirección del flujo del agua (Valencia Tobón, 2015).

Es importante que al DEM se le realice el proceso de quemado, esto permite que en algunos pozos o zonas donde la pendiente sea muy baja la dirección de flujo se vea más marcada (Valencia Tobón, 2015). El DEM se obtuvo de los insumos usados por el proyecto 8 “Actualización e implementación del registro de usuarios del recurso hídrico en la cuenca Aburrá-Medellín”, el cual tiene una resolución de pixel de 10 x 10 Metros, a este se le aplicó el proceso denominado quemado del DEM, se usó la herramienta MapWindow y su extensión Watershead delineation,. Posteriormente, se cambió el DEM quemado de formato. *dgb* a *.tif* usando la extensión Change Grind Format de MapWindows, con el objetivo de llevar el archivo *.tif* al software ArcGIS. Esto se hizo siguiendo el procedimiento en la **figura 8**.

Figura 8

Proceso para el Quemado del DEM

Watershead delineation >> automatic >> Run
En el lugar azul se coloca el DEM de la microcuenca en formato .tif , en el rojo la Red de drenaje en formato SHP y después se le da click al botón "Run"

DEM quemado
El DEM quemado se encuentra en la misma ubicación (carpeta) donde se encuentra el DEM de la microcuenca con el nombre similar al DEM pero seguido de "_burn.bgdb"

GIS Tools>>Raster>> change Grind Format
El DEM quemado se encuentra en formato .dgb, se pasa a formato .tif usando la extensión "Gis tools" de MapWindow

.dgb a .tif
En el lugar azul se coloca el formato al cual se desea transformar el DEM, en este caso .tif , en el lugar rojo se especifica la ubicación donde se quiere guardar el resultado, y finalmente se le da click en "Finish"

DEM quemado en formato TIFF
Finalmente se obtiene el DEM quemado de la microcuenca en formato .tif, el cual es compatible con el software ArcGIS y mas cómodo de utilizar

Nota. Se presenta el proceso para el quemado del DEM en MapWindow, en esta figura se muestra los diferentes pasos a seguir

Figura 9

DEM quemado de la Cuenca La Santa Elena

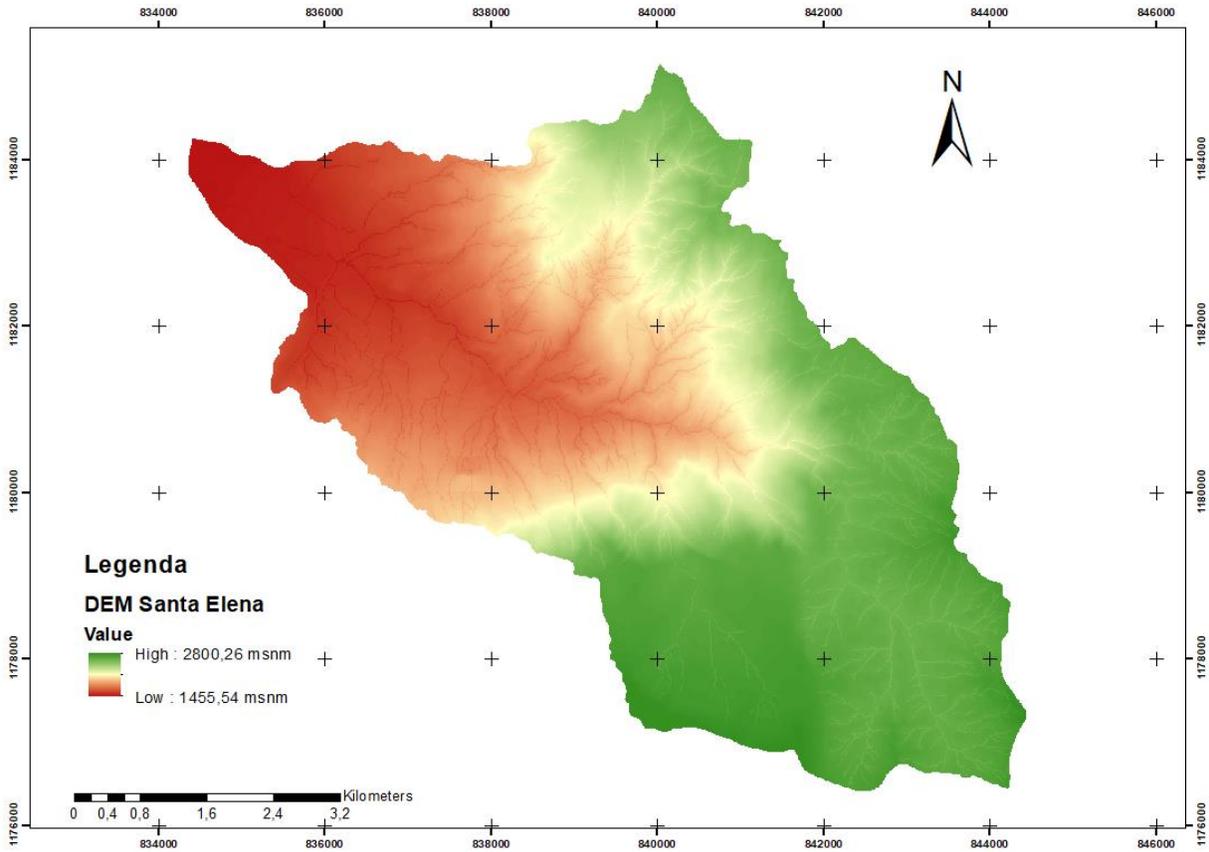


Figura 10

DEM quemado de la Cuenca La López

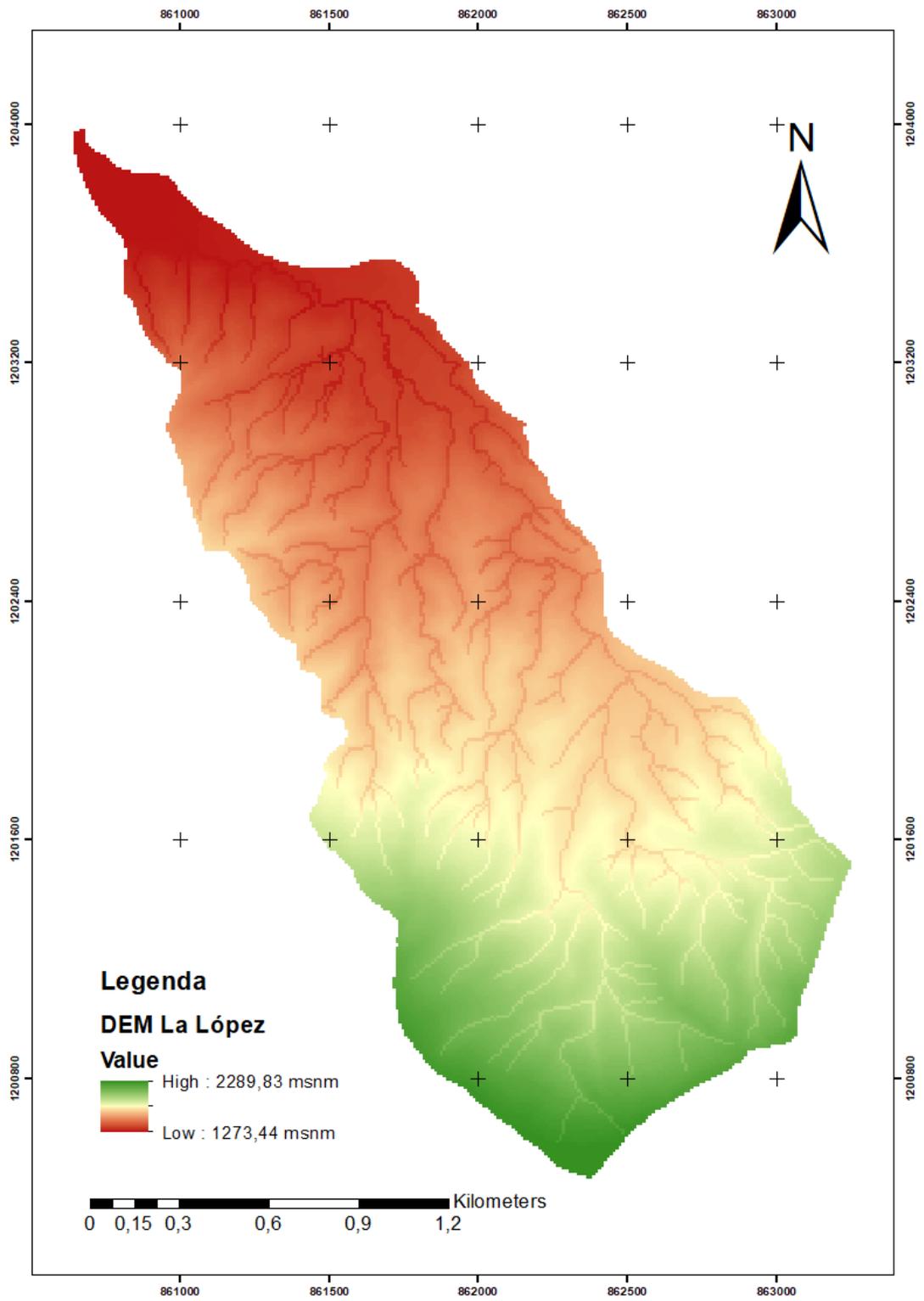
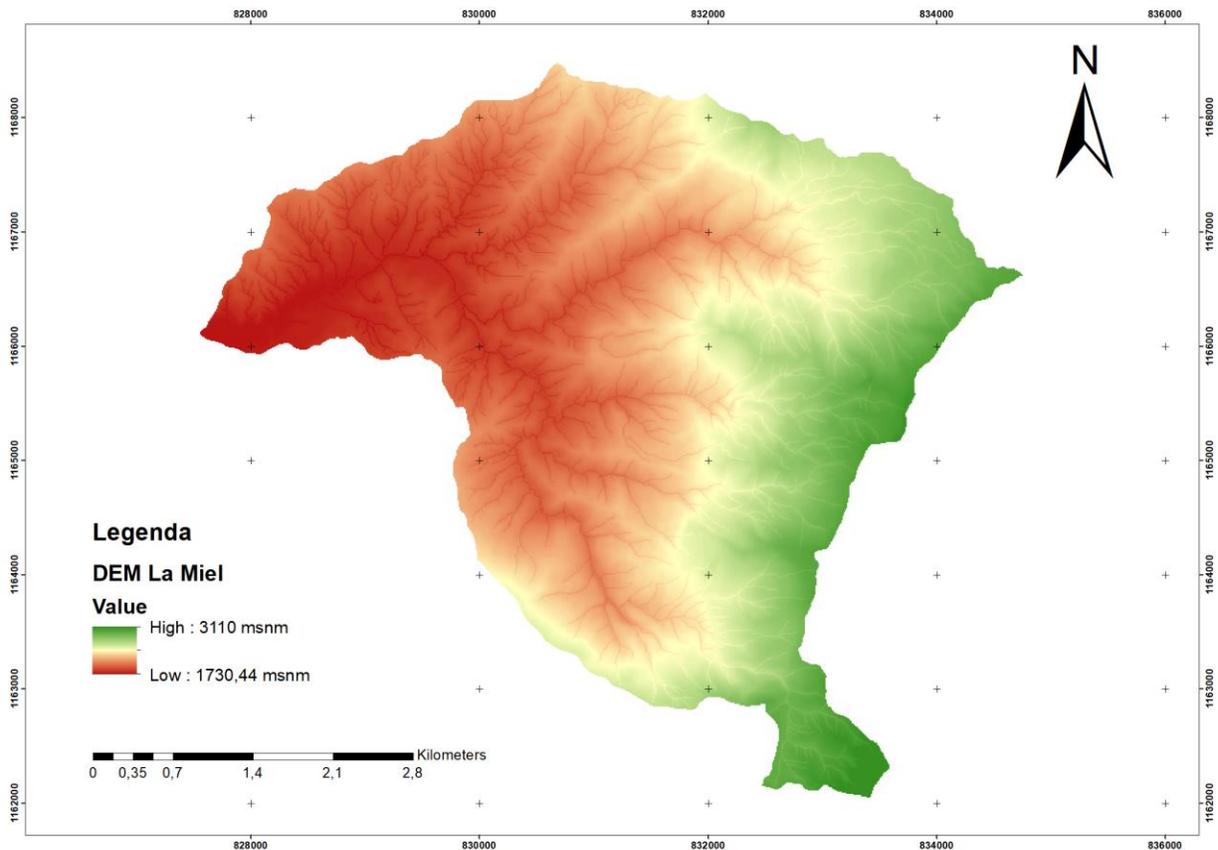


Figura 11
DEM quemado de la Cuenca La Miel



3.1.1.2 Shapefiles de Captaciones, Vertimientos y Red hídrica

A las microcuencas La Santa Elena, La Miel y La López se les obtuvo datos en el Proyecto 8 “Actualización e implementación del registro de usuarios del recurso hídrico en la cuenca Aburra-Medellín” del PORH de la cuenca Aburrá-Medellín, los cuales se obtuvieron con visita in situ por medio de una aplicación móvil llamada “kobocollect”, en la cual se contaba con una encuesta que registraba diferentes datos de uso del agua, vertimientos y las geolocalizaciones de las captaciones de agua y descargas de los vertimientos. Además, se levantó la información que reposa en las diferentes corporaciones ambientales con respecto a los expedientes que albergan las concesiones de agua y permisos de vertimientos otorgados por estas. Por otro lado, con la información que se recolectó in situ se identificó que en ocasiones se desconocía el dato del caudal captado del cuerpo de agua, esto por diferentes factores, como que algunos usuarios no contaban con concesión de aguas y por ende no se tenía un caudal concedido a captar o desconocían cuánta agua captaban, para complementar este dato de caudal captado, se usó uno de los insumos que se realizó en el

proyecto “Actualización e implementación del registro de usuarios del recurso hídrico en la cuenca Aburra-Medellín” , el cual fue un módulo de consumo, que se elaboró en EXCEL en base a la resolución 0330 de del 8 de junio de 2017 y el Reglamento Técnico Del Sector De Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017), con el resultado de este módulo de consumo se complementó la información faltante para así terminar de consolidar la base de datos a usar en el análisis de disponibilidad hídrica de las 3 microcuencas, dando como resultado un EXCEL (Anexos 1 Tabla de captaciones de las tres microcuencas con usos de agua y caudal captado) donde se cuenta con datos del caudal total captado y para los diferentes usos del agua.

Ahora, para el modelo de disponibilidad hídrica es necesario conocer la ubicación de los puntos en los cuales se capta agua de las corrientes (Captaciones Superficiales) y la cantidad que es captada, al igual que saber la ubicación de los sitios y cantidad de agua vertida a los cauces naturales. Para lo cual, se debe generar un shapefile de captaciones superficiales y otro para vertimientos, estos se elaboraron en ArcGIS a partir de la información (*Anexo 1*) producida, recolectada y depurada en el proyecto 8.

Por otro lado, la Red hídrica o Red de Drenajes, es importante que sea de buena calidad, es decir que las líneas sean continuas y no se presenten discontinuidades, ya que puede causar errores o cálculos erróneos en el modelo (Valencia Tobón, 2015), en este caso se usó como insumo la red de drenajes utilizada en el proyecto 8.

La red de drenaje, las captaciones y el DEM quemado pertenecientes a las 3 microcuencas se presentan en las siguientes figuras.

Figura 12

Mapa de la Red Hídrica, las captaciones y DEM pertenecientes a la cuenca La López

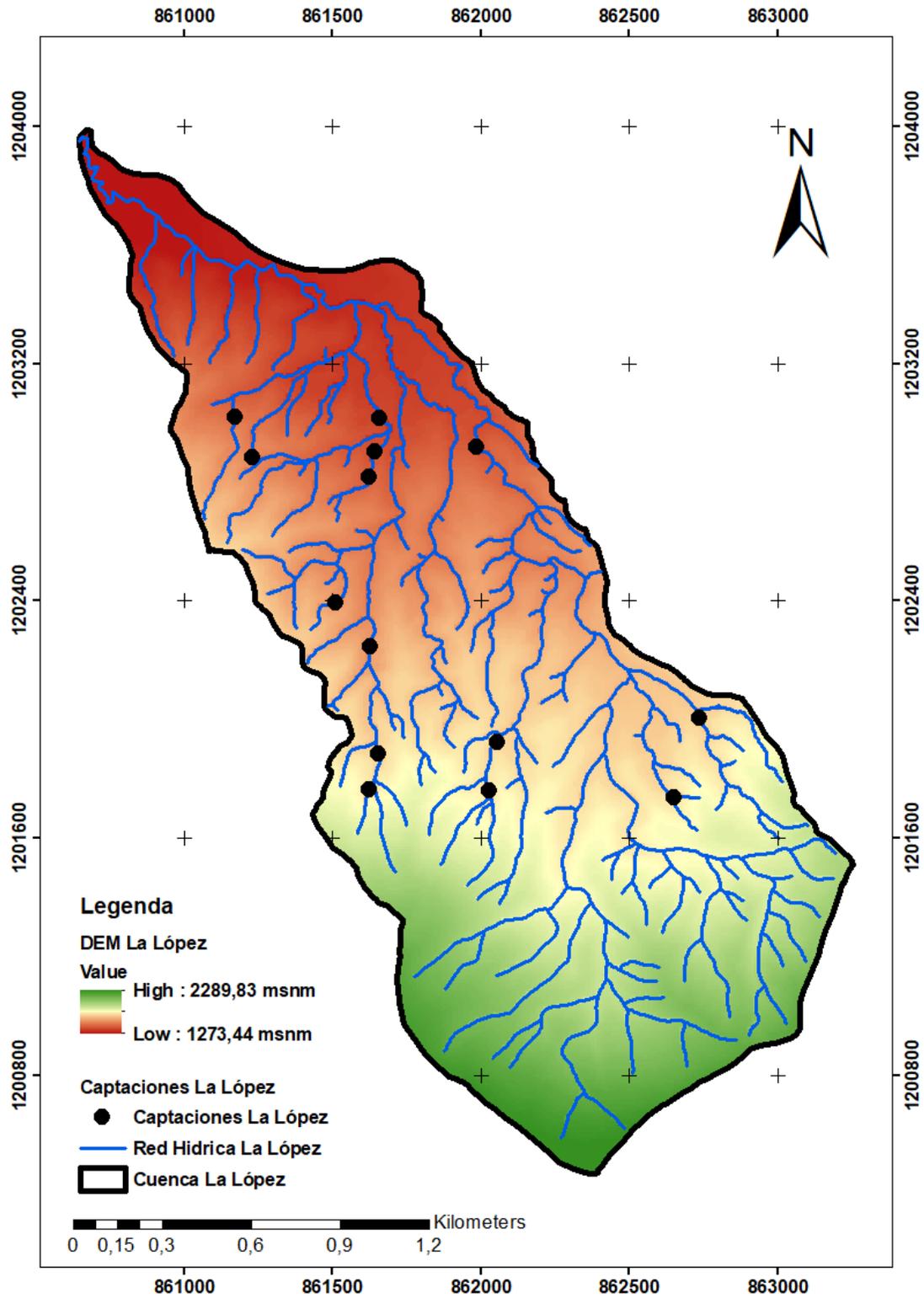


Figura 13

Mapa de la Red Hídrica, las captaciones y DEM pertenecientes a la cuenca La Miel

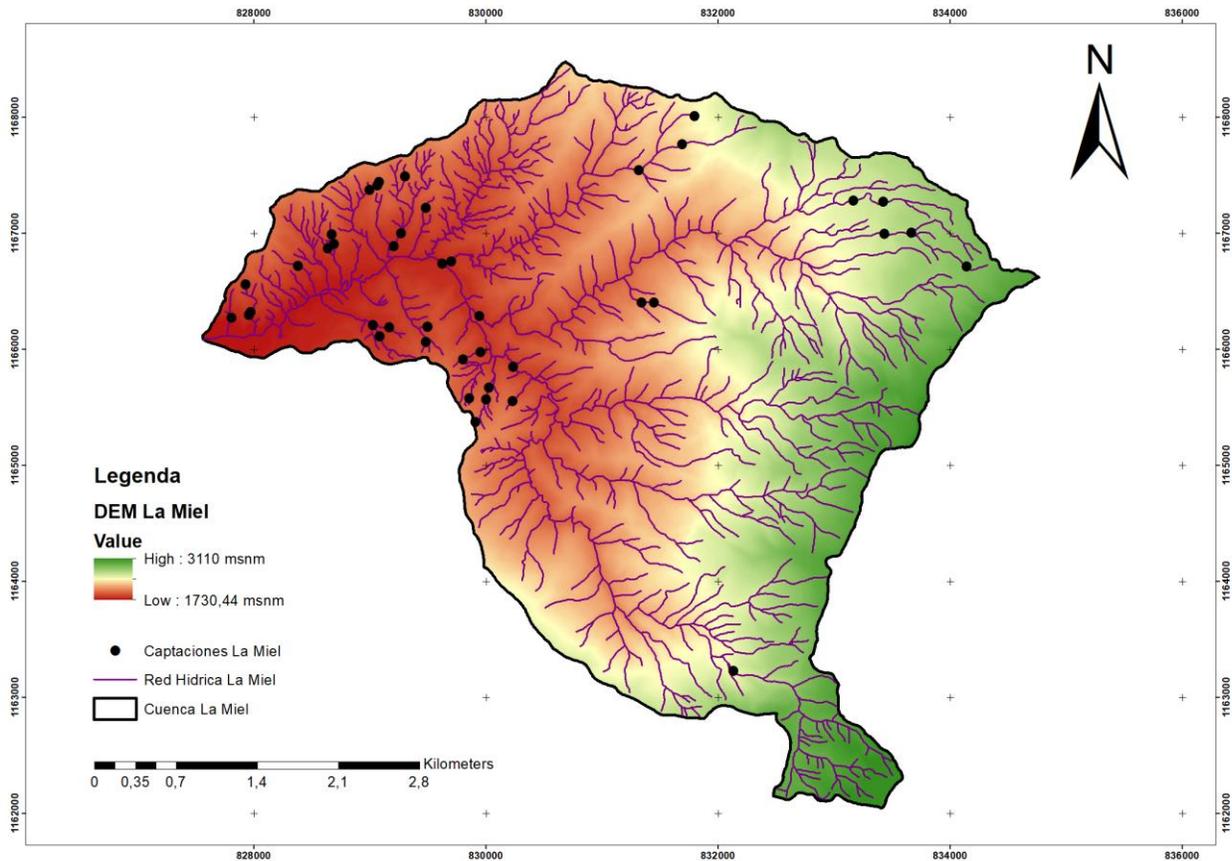
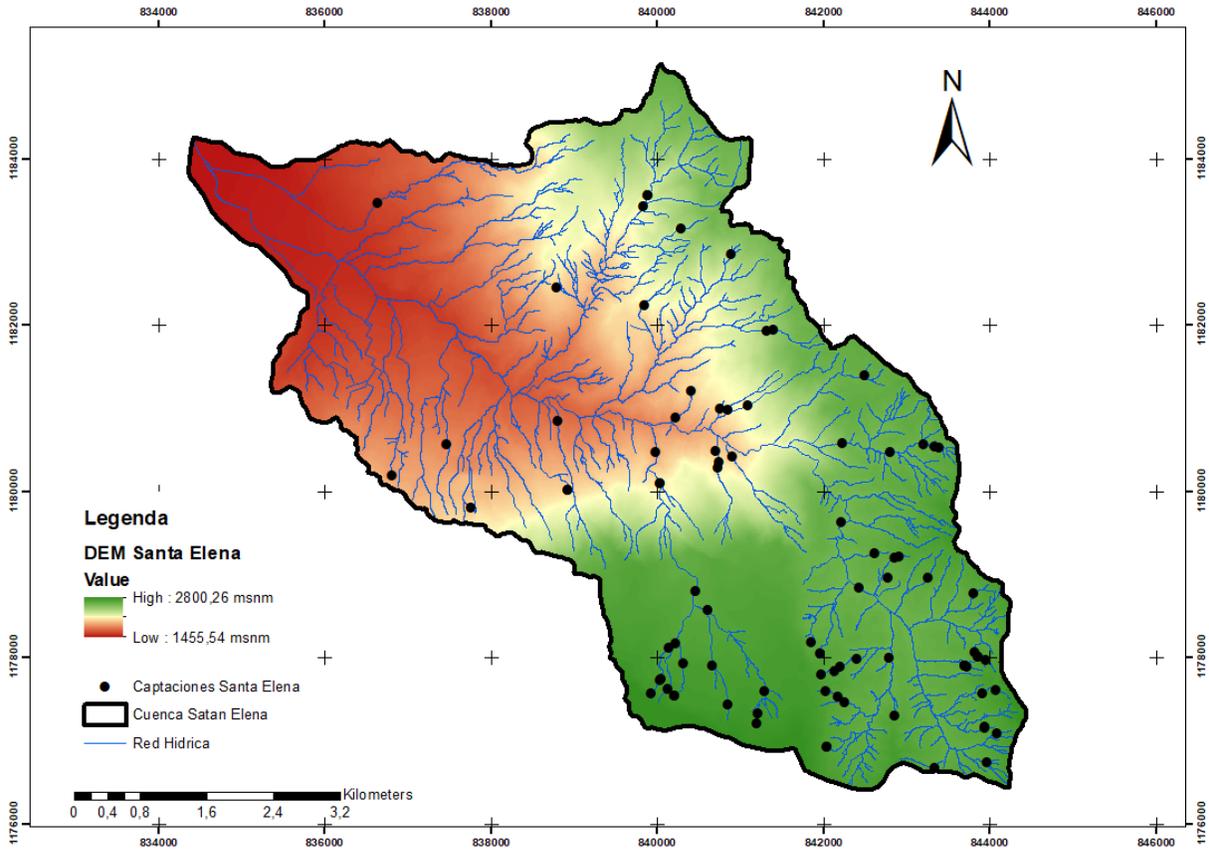


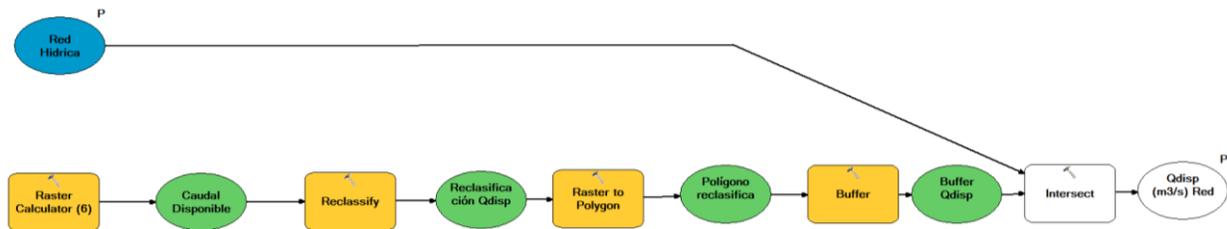
Figura 14

Mapa de la Red Hídrica, las captaciones y DEM pertenecientes a la cuenca La Santa Elena



3.1.1.3 Mapa didáctico de caudal disponible.

Figura 15
Modelo de disponibilidad hídrica - Elaboración de Mapa disponibilidad hídrica didáctico



Nota. En la figura se muestra la última parte del modelo de disponibilidad hídrica, con la cual se realiza el proceso para la elaboración de un mapa didáctico a partir del ráster de disponibilidad hídrica. Adaptado de Valencia Tobón (2015).

Para obtener un mapa didáctico a partir del ráster del caudal disponible, esto se da en la segunda parte del modelo, el cual consiste en reclasificar los valores del ráster de caudal disponible en cinco intervalos dependiendo de la microcuenca utilizando la función de ArcGIS “reclassify”.

Después, se pasa este ráster reclasificado a un archivo SHP usando la función “Raster to polygon” al cual se le aplica una función “Buffer” para prevenir que haya discontinuidad en las líneas, a este se le realiza una intersección con la red hídrica para asignarle los valores de la reclasificación a la red hídrica. Como resultado, se obtiene un mapa en formato SHP, el cual es la red hídrica con unos valores asignados a lo largo de toda la cuenca relacionados con los intervalos, y a estos valores se les puede asignar un color como se muestra en la **Tabla 2** para así obtener un mapa más didáctico.

Tabla 2

Didactización - Categoría de clasificación del caudal disponible en m3/s y su respectivo color de visualización para las 3 microcuencas

Color	Santa Elena (M3/s)	La López (M3/s)	La Miel (M3/S)
	-0,046179 - 0,00001	-0,020963 - 0,000001	-0,009237 - 0,000001
	0,00001 - 0,001753	0,000001 - 0,00004	0,000001 - 0,002284
	0,001753 - 0,004722	0,00004 - 0,000822	0,002284 - 0,005353
	0,004722 - 0,0093	0,000822 - 0,002015	0,005353 - 0,011436
	0,0093 - 0,517631	0,002015 - 0,004251	0,011436 - 0,031862

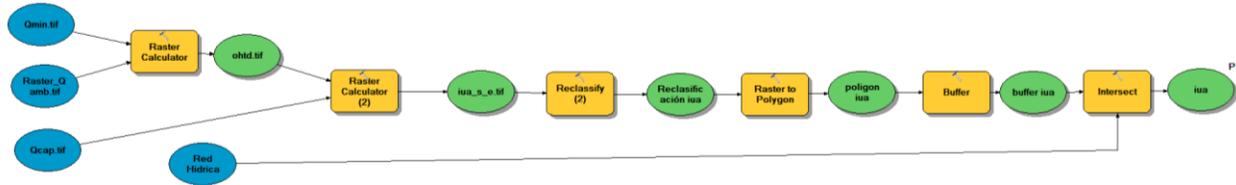
Nota. Se muestra los rangos de los caudales disponibles en M³/S para las diferentes microcuencas y el color correspondiente a cada intervalo; Los intervalos de color rojo, son caudales disponible negativos, lo que quiere decir que se capta un caudal mayor a la oferta hídrica superficial total disponible (se capta caudal que hace parte del caudal ambiental). Adaptado de Valencia Tobón (2015).

3.3 Determinación del Índice De Uso Del Agua – IUA

Para el cálculo del Índice de uso del agua (IUA), se usa la metodología propuesta por el IDEAM (2020). Esta se aplicó con la ayuda de la herramienta modelbuilder de ArcGIS, en la cual se realiza un modelo para automatizar los procesos, este necesita como insumos un Raster para Caudal Ambiental (Raster_Aamb.tif), otro de Caudal Mínimo (Qmin.tif), y otro para caudal Captado (Qcap.tif) que representa la demanda hídrica a lo largo de la microcuenca (DH), los cuales son un subproducto del modelo de disponibilidad hídrica anteriormente expuesto. Además, se requiere un archivo SHP el cual contenga la Red hídrica de la microcuenca.

Figura 16

Modelo de IUA en ModelBuilder



Nota. Se muestra el modelo de IUA realizado en ModelBuilder en base a la metodología propuesta por el IDEAM (2020), en este se toma como insumos 3 ráster subproductos del modelo de disponibilidad hídrica anteriormente explicado.

En la primera parte del modelo IUA, se aplica la función “Raster Calculator”, la cual le resta al Caudal Mínimo el Caudal Ambiental, este resultado representa la Oferta hídrica superficial total disponible (OHTD). Posteriormente, este ráster ohtd.tif pasa a otra función “Raster Calculator” en la que se aplica la *ecuación 7*.

$$IUA = \frac{DH}{OHTD} * 100 \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde, *IUA* es el Índice de Uso del Agua en la unidad espacial de referencia para condición hidrológica promedio o de año seco (%), *DH* es la demanda hídrica de la cuenca, *OHTD* es el volumen de agua que resulta de restarle a la oferta hídrica total superficial el caudal ambiental (IDEAM, 2020).

En los últimos procesos del IUA, al resultado se le aplica un proceso parecido al de la elaboración del mapa didáctico antes mencionado, pero en este caso se toma los intervalos propuestos por el IDEAM (2020) y mostrados en la **Tabla 3**. En la cual, se definió que los resultados del IUA van en un rango de valores mayores a 0 a los cuales se les asigna unas categorías de interpretación de muy bajo a crítico. Esto da como resultado, un mapa en formato SHP el cual es el IUA a lo largo de la Red Hídrica de la microcuenca.

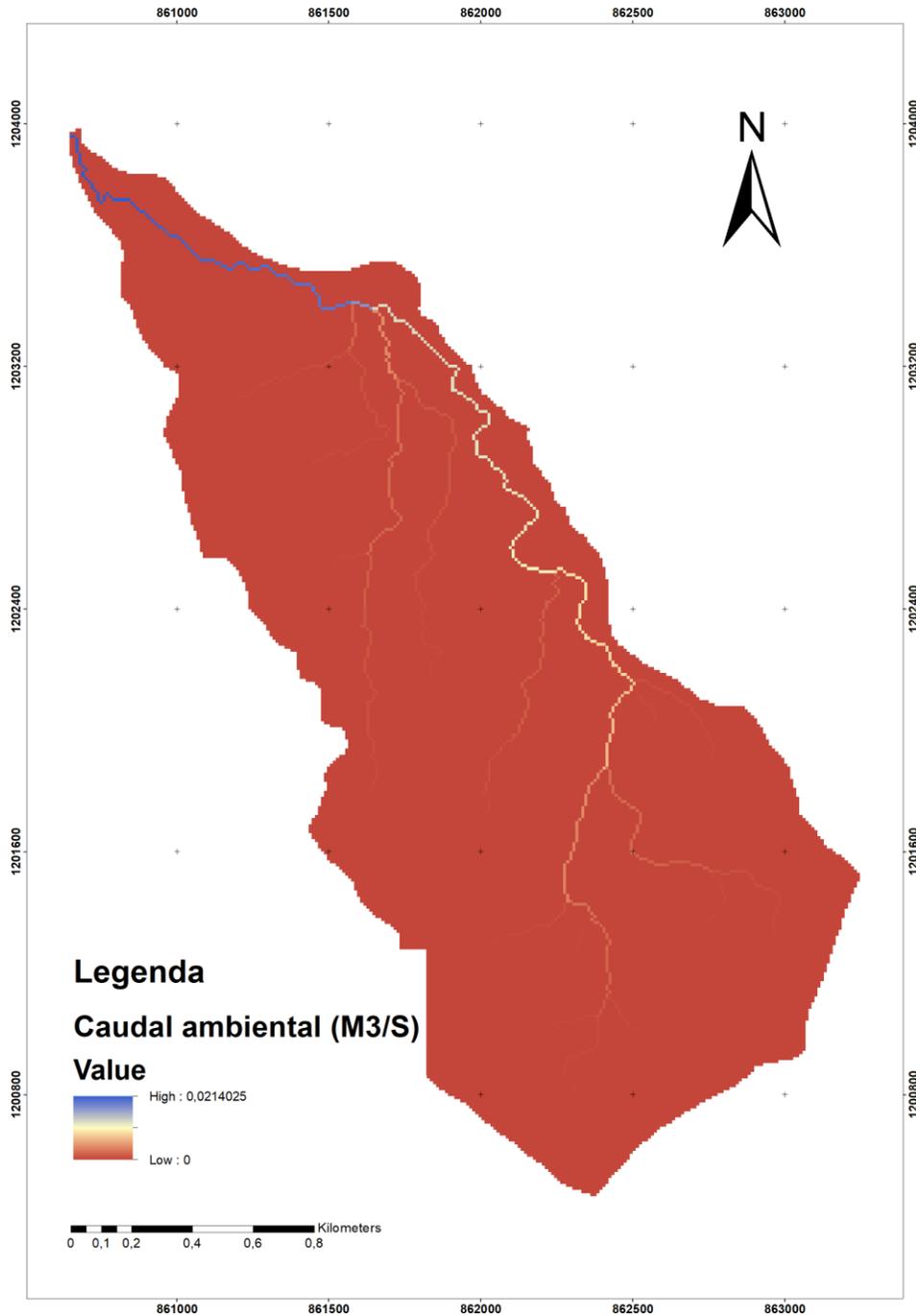
Tabla 3
Interpretación del IUA

Rango Índice de Uso del Agua	R	G	B	CATEGORIA	INTERPRETACIÓN ÍNDICE DE USO DEL AGUA
> 100	170	0	0	CRITICO	La presión supera las condiciones de la oferta superficial disponible
50-100	255	0	0	MUY ALTO	La presión de la demanda es muy alta respecto a la oferta superficial disponible
20-50	255	170	0	ALTO	La presión de la demanda es alta respecto a la oferta superficial disponible
10-20	255	255	0	MODERADO	La presión de la demanda es moderada respecto a la oferta superficial disponible
1-20	150	230	0	BAJO	La presión de la demanda es baja respecto a la oferta superficial disponible
≤ 1	0	160	170	MUY BAJO	La presión de la demanda no es significativa respecto a la oferta superficial disponible

Fuente. (IDEAM, 2020).

Los insumos necesarios o la información necesaria para el cálculo del IUA, son Ráster que se generaron al momento de correr el Modelo de disponibilidad hídrica, por eso se les llama subproductos. Entonces, en las diferentes corridas del modelo siempre queda para las diferentes microcuencas un raster con el caudal captado acumulado a lo largo de la microcuenca (Demanda hídrica de la microcuenca), un ráster de caudal ambiental y otro ráster de caudal mínimo (Oferta hídrica superficial natural). A continuación, se presenta los diferentes raster anteriormente mencionados para las 3 diferentes microcuencas.

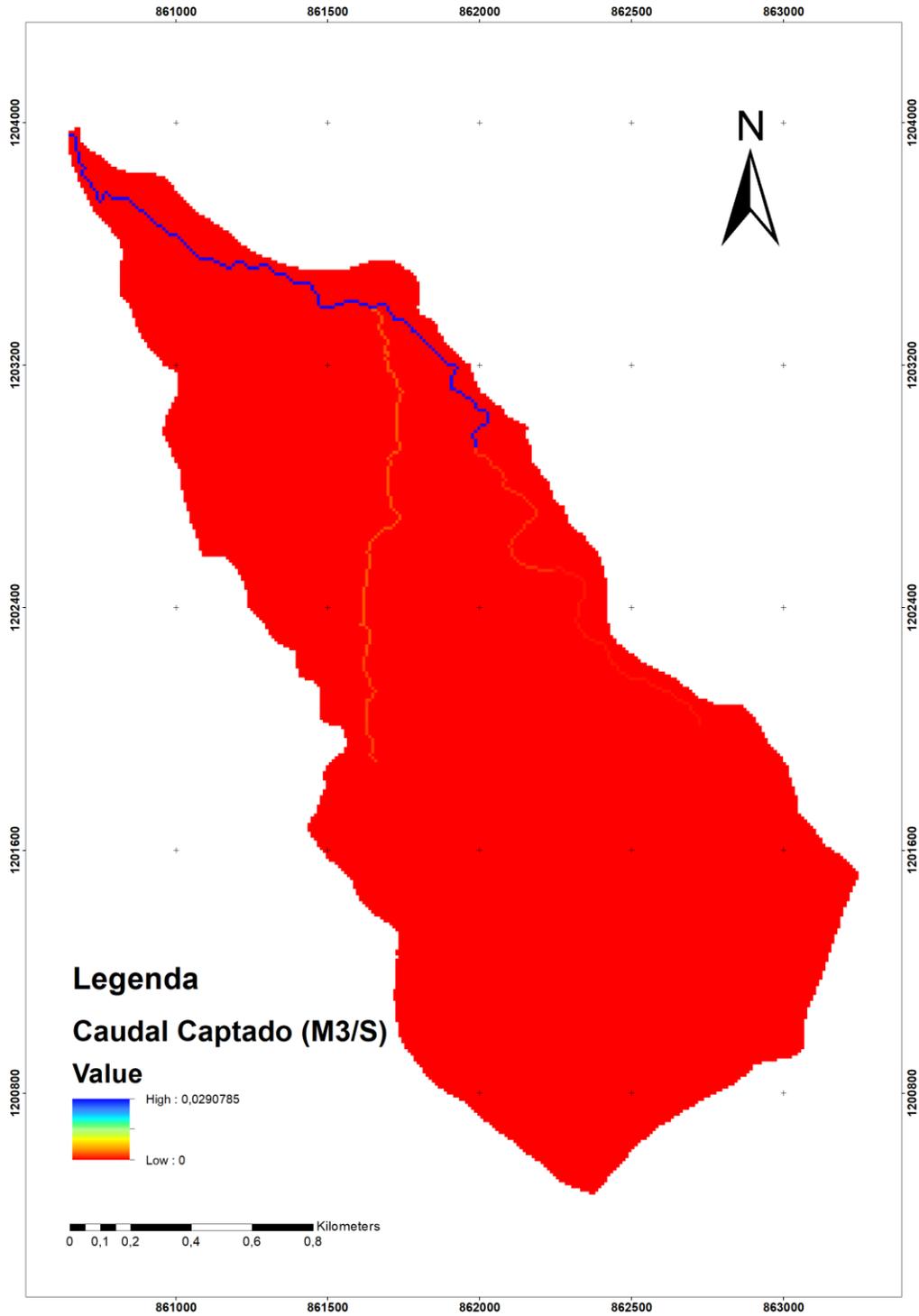
Figura 17
Ráster de Caudal Ambiental de la quebrada La López



Nota. Se muestra el ráster del Caudal ambiental a lo largo de la microcuenca, el cual es un subproducto del Modelo de disponibilidad hídrica.

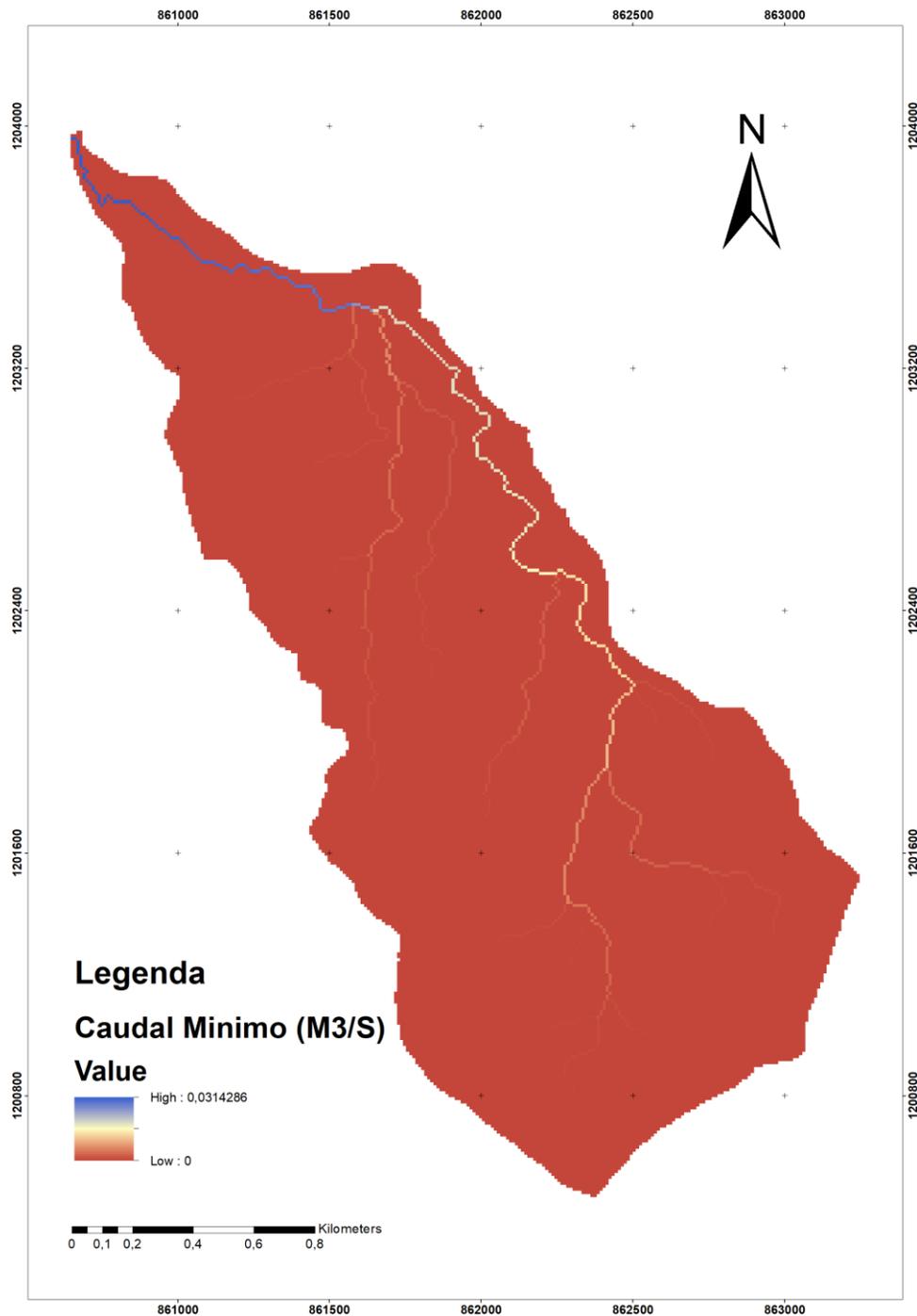
Figura 18

Ráster de Caudal Acumulado Captado de la Cuenca La López



Nota. Se muestra el ráster del Caudal captado acumulado a lo largo de la microcuenca, el cual es un subproducto del Modelo de disponibilidad hídrica.

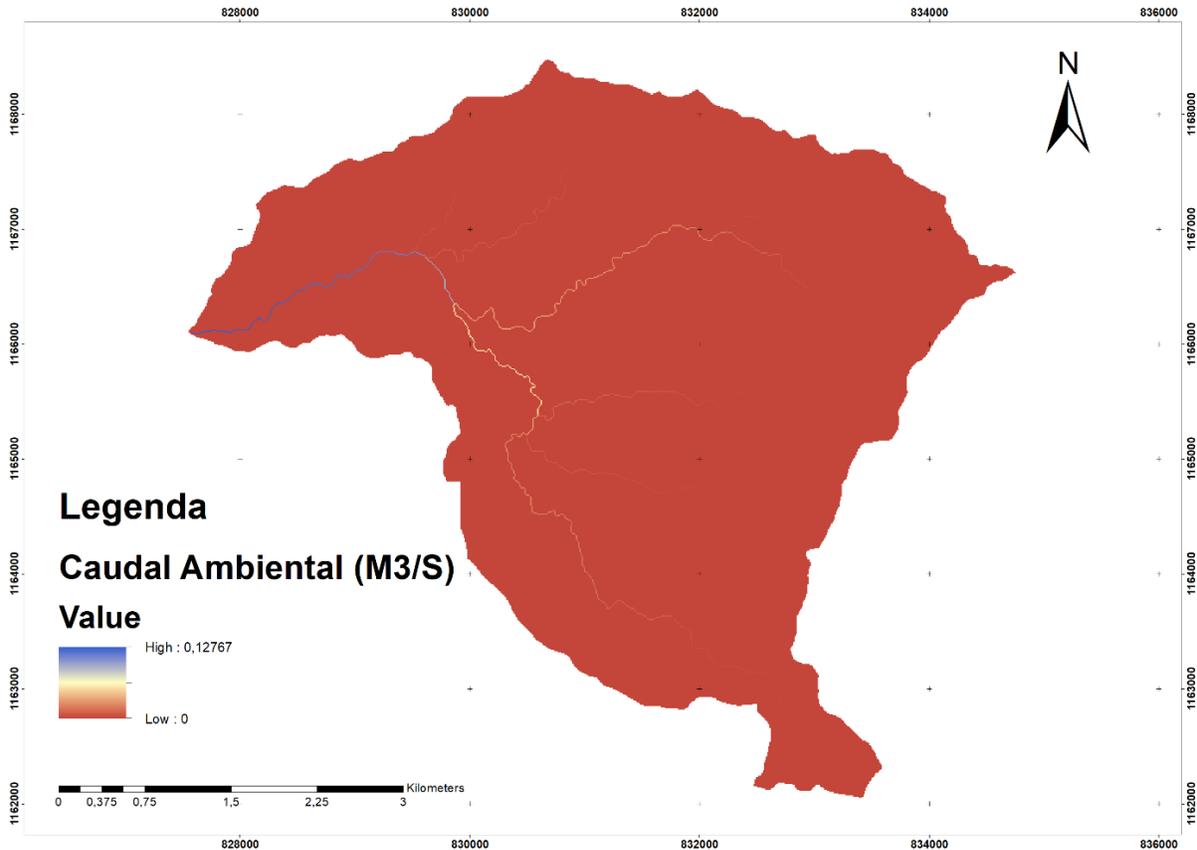
Figura 19
Ráster de Caudal Mínimo de la Cuenca La López



Nota. Se muestra el ráster del Caudal Mínimo a lo largo de la microcuenca, el cual es un subproducto del Modelo de disponibilidad hídrica.

Figura 20

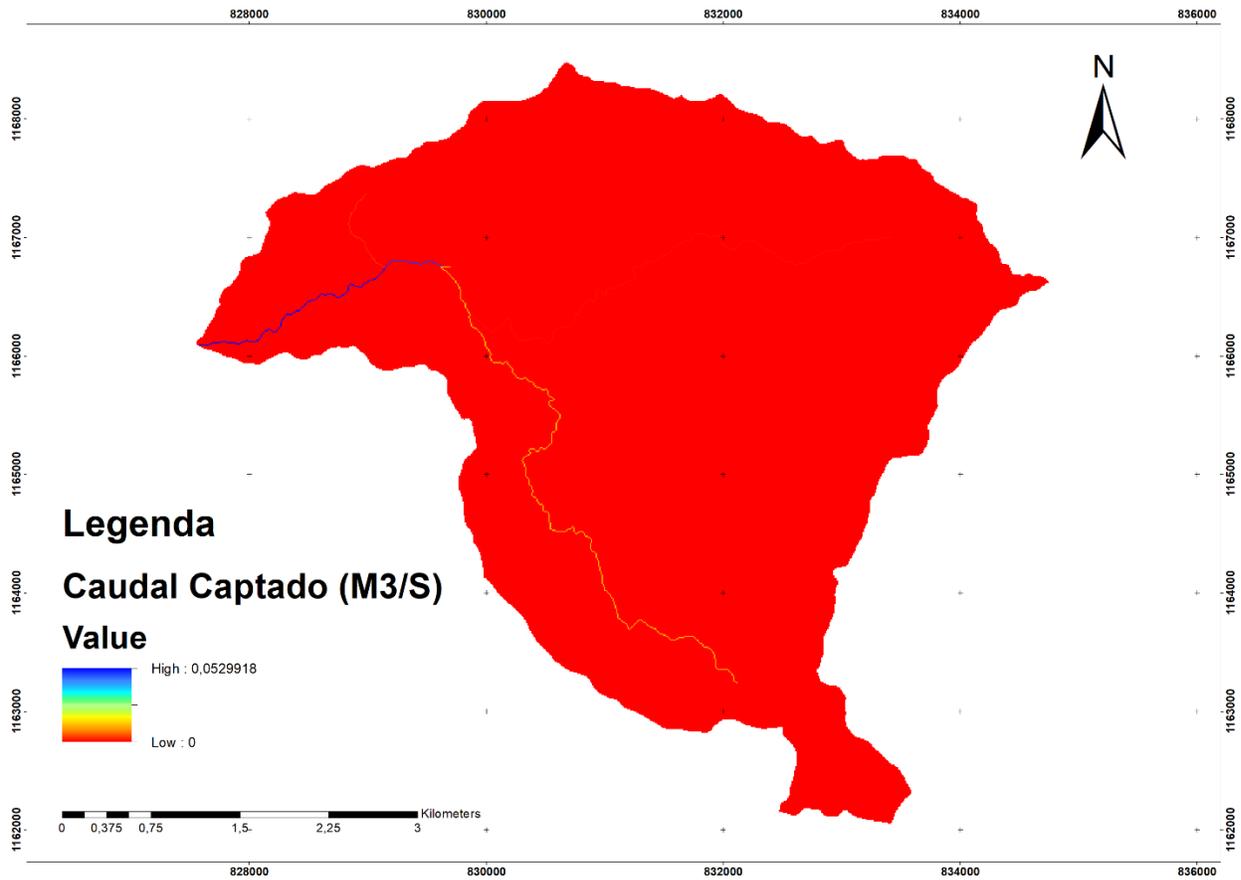
Ráster de Caudal Ambiental de la Cuenca La Miel



Nota. Se muestra el ráster del Caudal Ambiental a lo largo de la microcuenca, el cual es un subproducto del Modelo de disponibilidad hídrica.

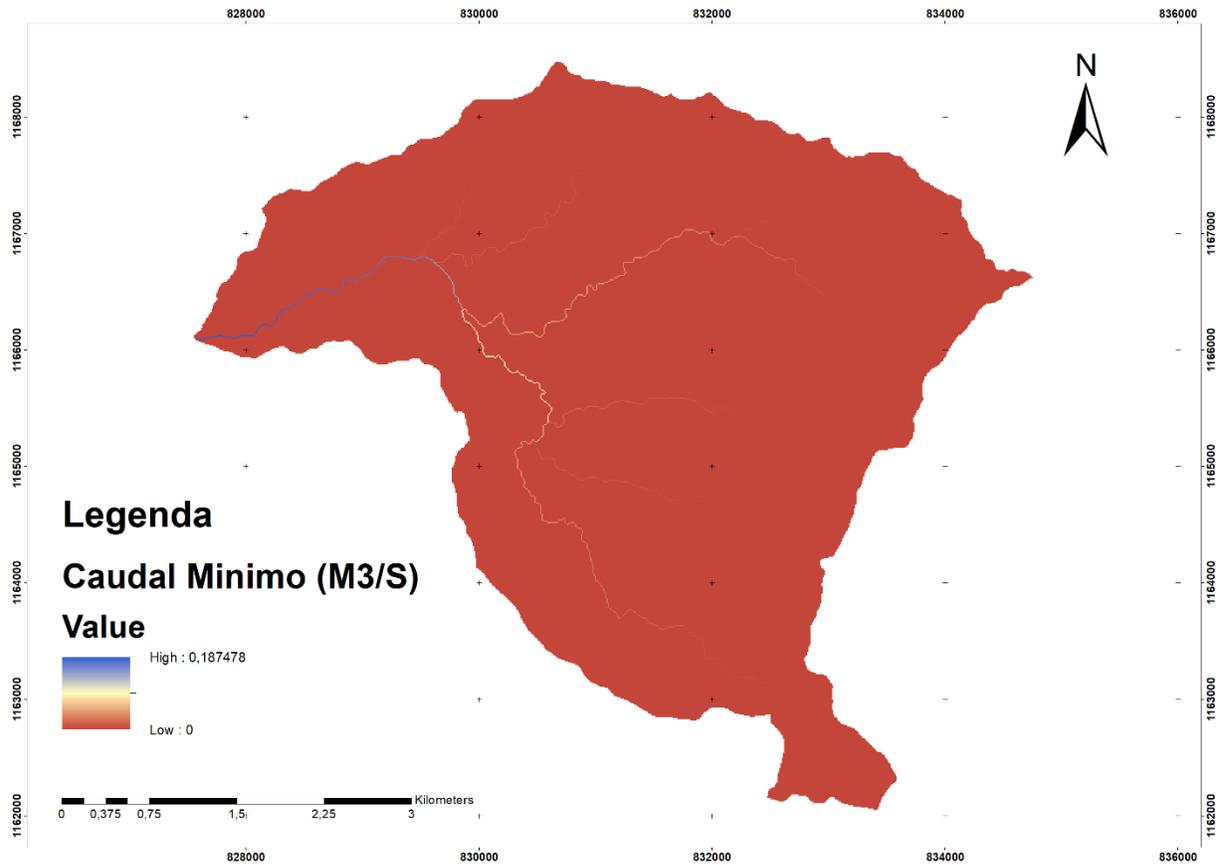
Figura 21

Ráster de Caudal Acumulado Captado de la Cuenca La Miel



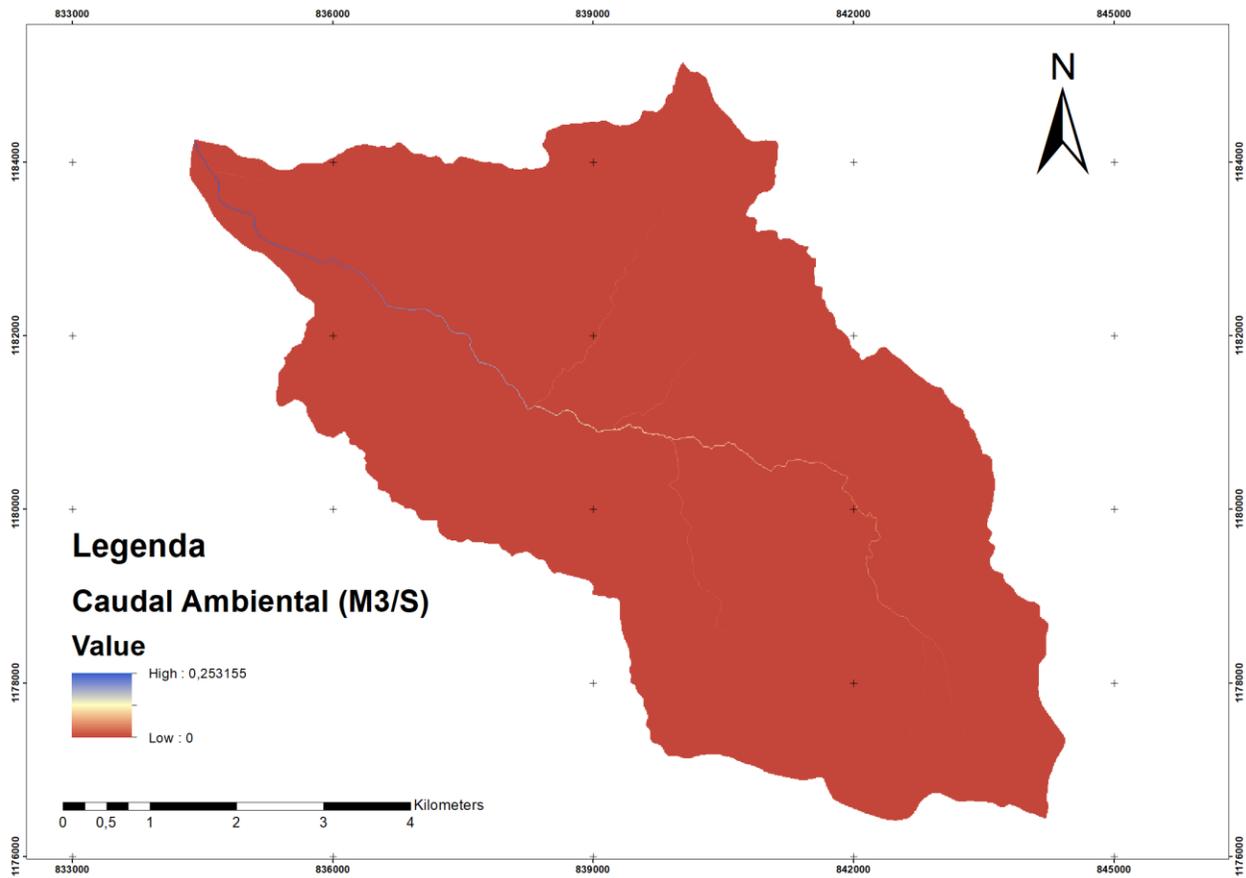
Nota. Se muestra el ráster del Caudal Captado Acumulado a lo largo de la microcuenca, el cual es un subproducto del Modelo de disponibilidad hídrica.

Figura 22
Ráster de Caudal Mínimo de la Cuenca La Miel



Nota. Se muestra el ráster del Caudal mínimo a lo largo de la microcuenca, el cual es un subproducto del Modelo de disponibilidad hídrica.

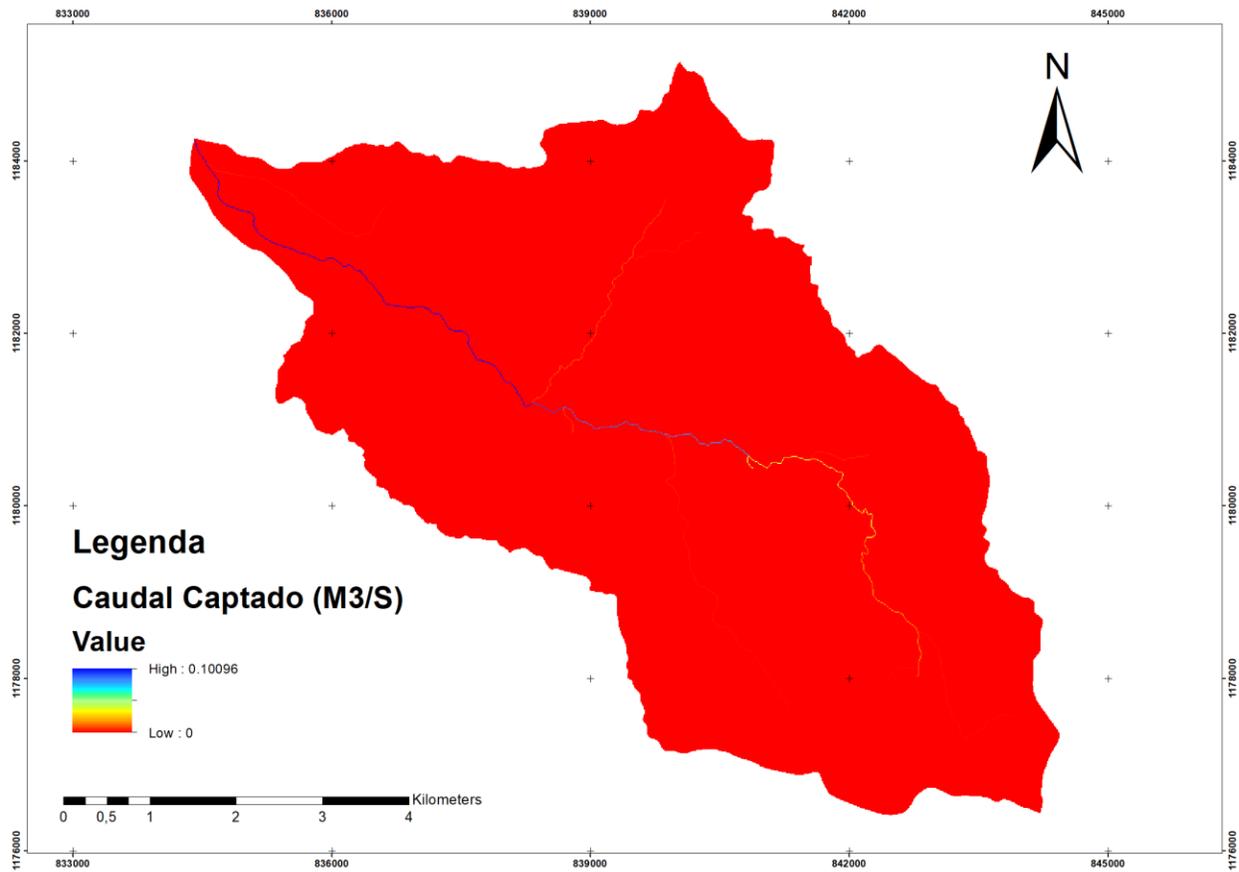
Figura 23
Ráster de Caudal Ambiental de la Cuenca La Santa Elena



Nota. Se muestra el ráster del Caudal Ambiental a lo largo de la microcuenca, el cual es un subproducto del Modelo de disponibilidad hídrica.

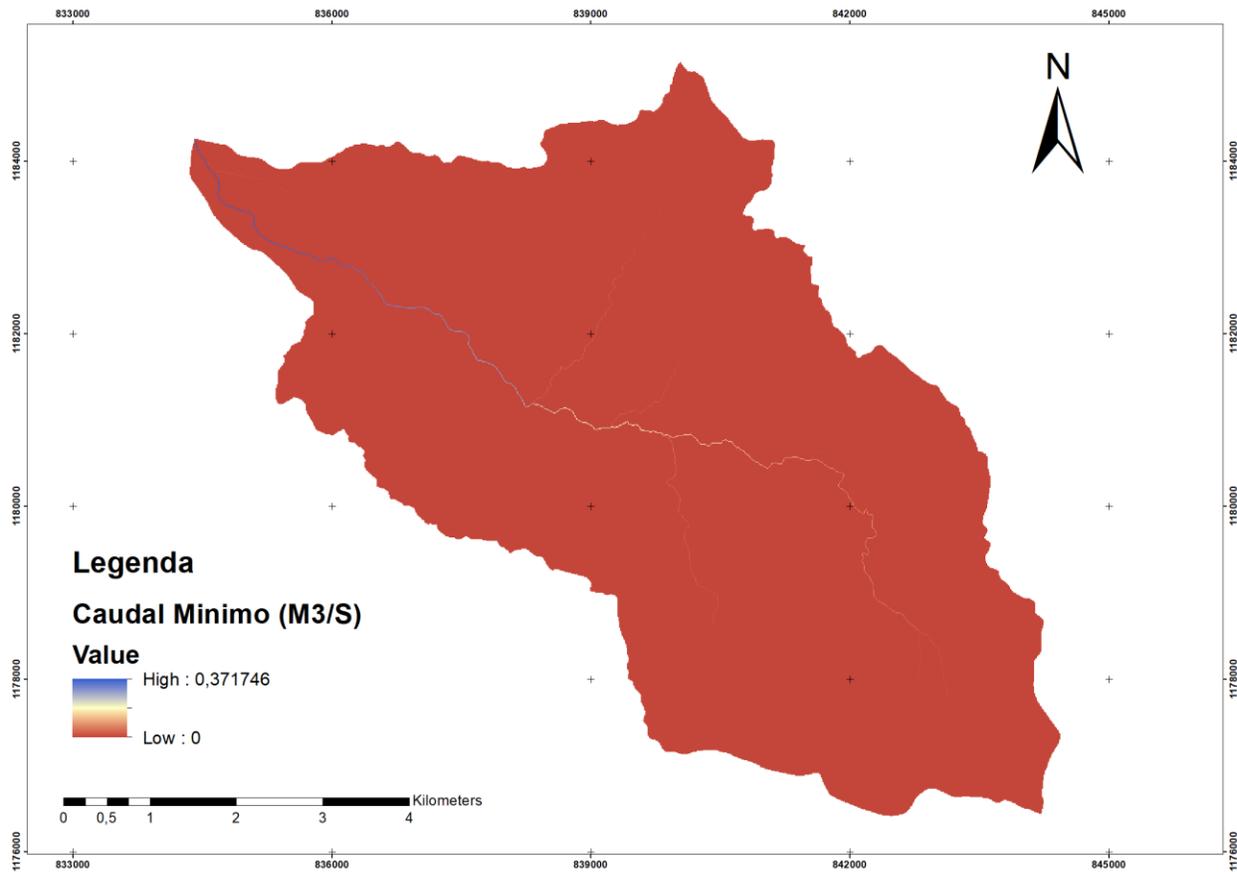
Figura 24

Ráster de Caudal Captado Acumulado de La cuenca La Santa Elena



Nota. Se muestra el ráster del Caudal captado acumulado a lo largo de la microcuenca, el cual es un subproducto del Modelo de disponibilidad hídrica.

Figura 25
Ráster de Caudal Mínimo de La Cuenca La Santa Elena



Nota. Se muestra el ráster del Caudal mínimo a lo largo de la microcuenca, el cual es un subproducto del Modelo de disponibilidad hídrica.

3.3 Escenarios Modelados Con El Modelo De Disponibilidad Hídrica.

Se planteo Modelar 3 escenarios diferentes con el modelo de Disponibilidad hídrica; uno con las condiciones actuales donde no se tiene en cuenta vertimientos; otro donde se tiene las condiciones actuales y se tiene en cuenta vertimientos; y otro con una demanda proyectada sin tener en cuenta vertimientos.

3.3.1 Escenario actual sin vertimientos.

En este escenario se tienen en cuenta las condiciones actuales encontradas por el proyecto 8 “registro y actualización de usuarios del recurso hídrica de la cuenca Aburra-Medellín”, y solo se toma en cuenta las captaciones de agua, y se descartan los vertimientos, ya que en el modelo propuesto se tiene los vertimientos como entradas de agua, por lo que se considera como agua

disponible. Sin embargo, al ser agua residual no se va a tener en cuenta, porque en algunos casos no es posible hacer uso de este tipo de aguas.

3.3.2 Escenario actual con vertimientos.

En la *ecuación 1* se muestra que se considera los vertimientos como entrada de agua, por lo tanto, son aguas que en el modelo están como disponibles para usar en diferentes actividades. En la información analizada se encontró que en las microcuencas no había muchos datos de vertimientos, por lo que el caudal vertido no era significativo, por lo tanto, para este escenario se supuso que el coeficiente de retorno es del 85% en base a la resolución 0330 de 2017 (RAS) del ministerio de vivienda, ciudad y territorio. Entonces, el caudal vertido se toma como el retorno del 85% del caudal captado para uso doméstico, además se consideran los pocos datos de vertimientos que se tengan para las diferentes microcuencas, y en caso de que el usuario tenga datos de vertimiento, se toma como caudal vertido el retorno del 85% del caudal captado para uso doméstico. Teniendo todo esto en cuenta, se elabora un SHP que contenga los vertimientos, con el cual se realiza el mismo proceso anteriormente descrito para el SHP de captaciones, además se usa el modelo mostrado en la *Figura 5- Modelo de Disponibilidad en ModelBuilder* teniendo en cuenta los vertimientos (es similar al modelo mostrado en la *Figura 6*, solo se le agrega la opción de vertimientos) el cual tiene en cuenta los vertimientos en el cálculo del modelo de disponibilidad hídrica como muestra la *ecuación 1*.

A continuación, se muestran los mapas con los puntos donde se vierte a lo largo de las microcuencas.

Figura 26
Mapa de Vertimientos Cuenca La López

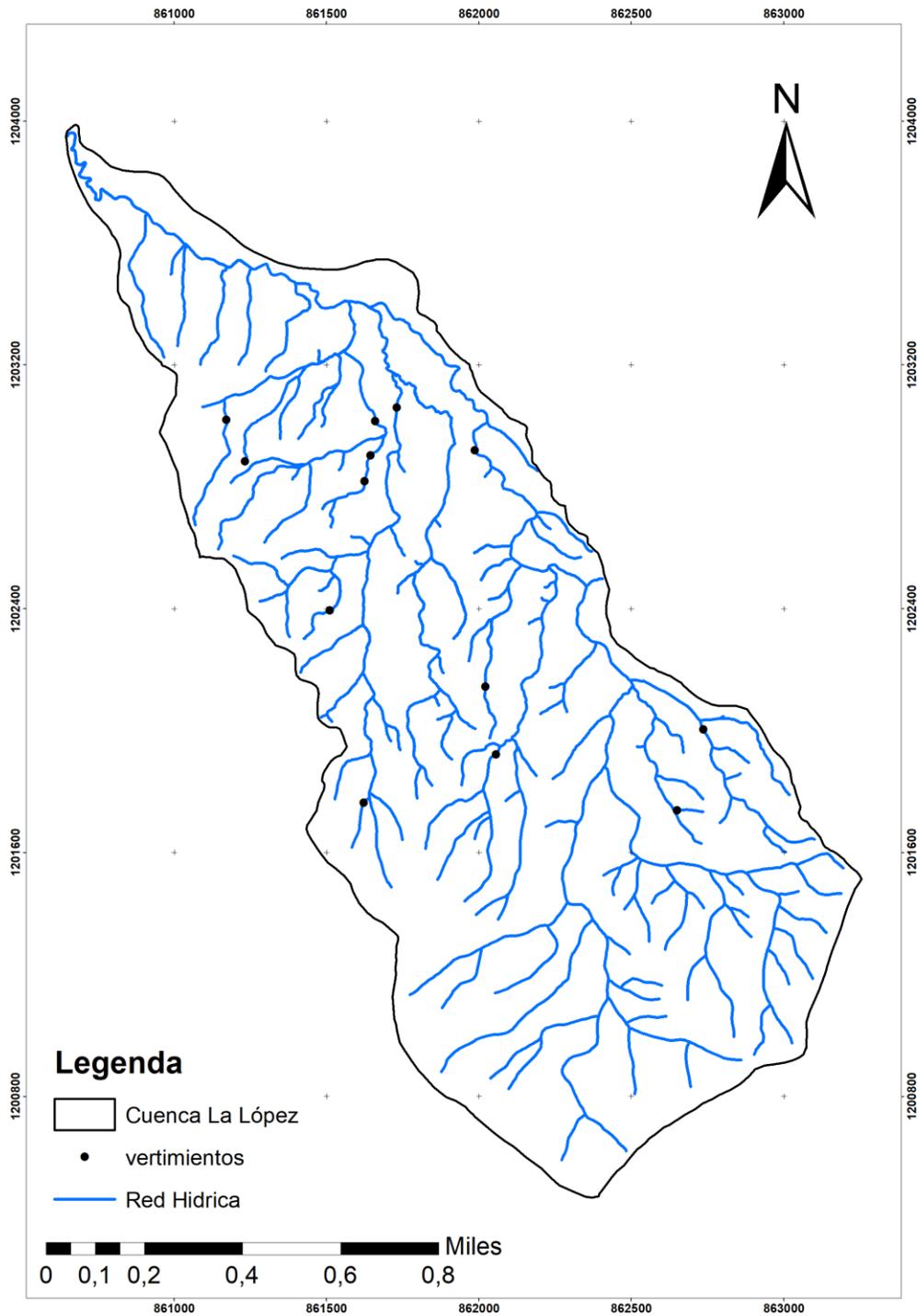


Figura 27
Mapa de Vertimientos Cuenca La Miel

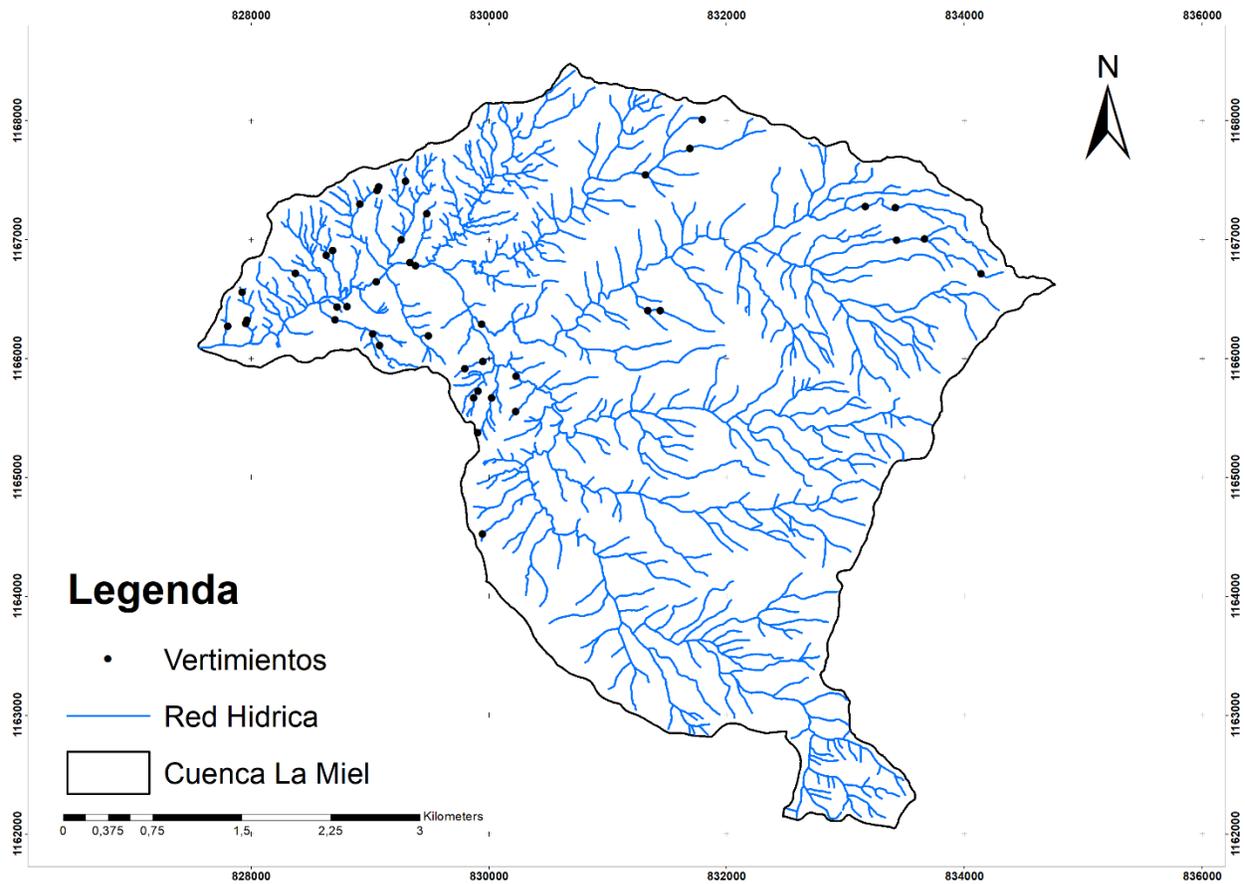
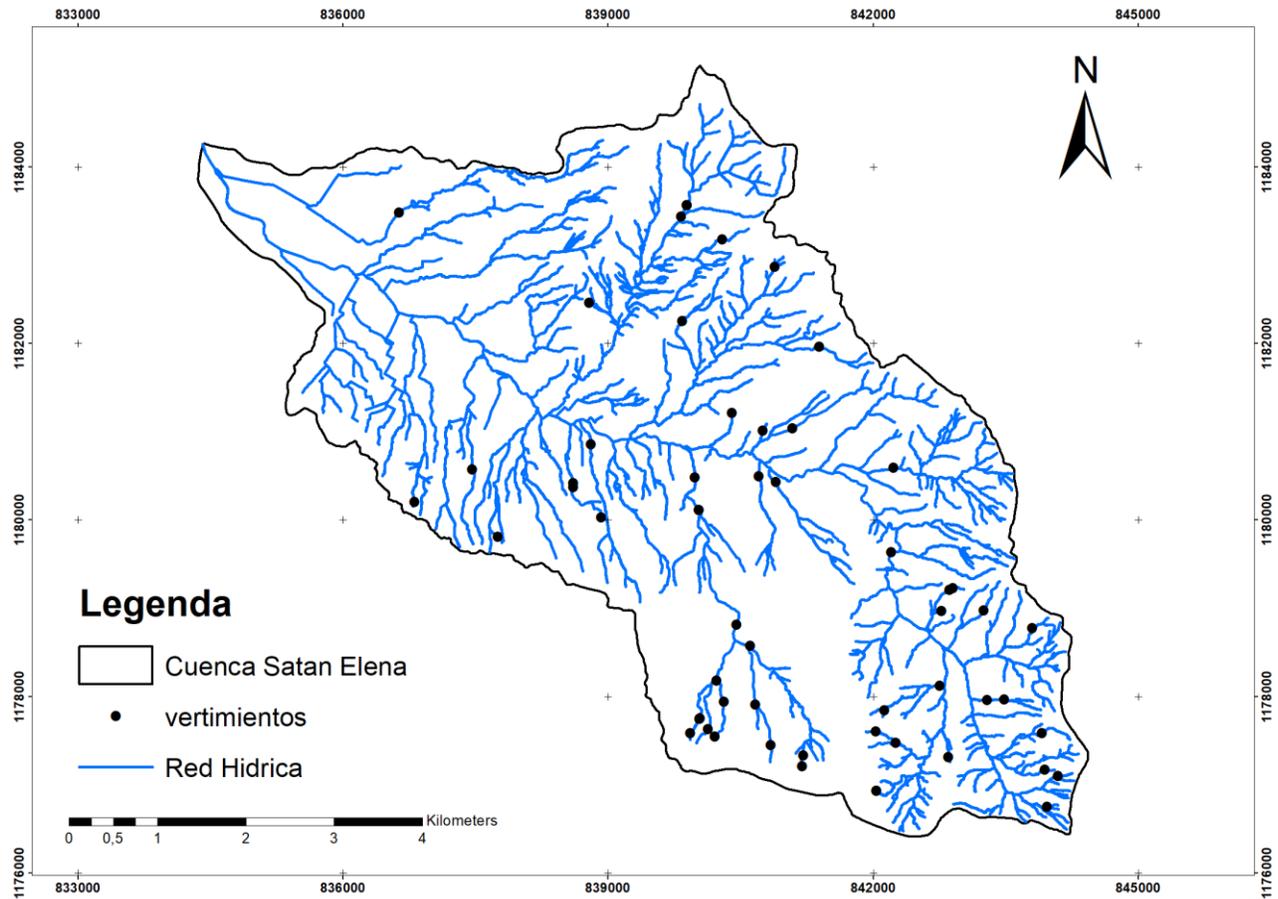


Figura 28
Mapa de Vertimientos Cuenca La Santa Elena



3.3.1 Escenario con demanda proyectada sin vertimientos

Para este escenario se plantea usar el modelo en una proyección de 10 años, para esto se supone que los acueductos, bocatomas comunitarias o juntas de acción comunal que prestan el servicio de acueducto en las microcuencas van a tener un crecimiento en el número de usuarios en la misma proporción de la tasa de crecimiento poblacional de la zona o municipio donde se encuentra cada microcuenca. Para este cálculo se tuvo en cuenta las proyecciones hasta el año 2034 y las tasas de crecimiento poblacional anual elaborada por el DANE (2020) para cada municipio. En base a esto se encontró que el corregimiento de Santa Elena y la zona de la Cuenca La Santa Elena la tasa de crecimiento poblacional anual es de 5,51%; para el municipio de Caldas donde se encuentra la microcuenca de la quebrada La Miel es de 1,35%; y para el municipio de Barbosa donde se encuentra la microcuenca de la quebrada La López es de 1,23% (DANE, 2020). Después, se proyectó el número de usuarios a 10 años para cada prestador de servicio de acueducto usando

la *ecuación 8*, este resultado se utilizó en el modelo de consumo elaborado en el Proyecto 8 “Actualización e implementación del registro de usuarios del recurso hídrico en la cuenca Aburrá-Medellín” para obtener el caudal proyectado a captar (*Tabla 3*). Posteriormente, se modificó el SHP de captaciones, cambiando el caudal captado de los usuarios prestadores de servicio de acueducto por el caudal proyectado, y con este SHP modificado se corrió el modelo de disponibilidad sin tener en cuenta vertimientos.

Para determinar el crecimiento poblacional en un periodo determinado se puede utilizar la fórmula de crecimiento poblacional compuesta, en la cual se necesita la tasa de crecimiento poblacional anual (r), la población inicial (P_0), y el número de años que se quiera proyectar (t) (Departamento Administrativo Nacional de Estadística -DANE, 2020).

$$P_t = P_0(1 + r)^t \quad \text{Ecuación 8}$$

Tabla 4

Proyección de usuarios de prestadores de servicio de acueducto a 10 años.

ID	# Usuarios Permanentes	# Usuario flotante	# Usuario proyectado	Caudal Proyectado (L/S)
La López				
0	336	No Data	380	0,921222212
1	400	No Data	452	0,710101725
2	137	No Data	155	0,565097664
3	545	No Data	616	2,260390656
La Miel				
6	6000	No Data	6862	13,89670139
7	700	No Data	801	1,62037037
La Santa Elena				
12	2600	150	4443	9,606770833
13	1400	150	2393	5,454571759
14	200	No Data	342	0,692708333
15	150	No Data	256	0,518518519
16	5320	6000	9092	42,72106481
17	2068	No Data	3534	7,157986111
18	8940	No Data	15278	30,94502315
19	1590	No Data	2717	5,50318287
20	1102	No Data	1884	3,813946759

Nota. Se muestra el número de usuarios que tiene el prestador del servicio de acueducto (los identificados con un ID) actualmente, el número de usuarios flotantes y el número de usuarios proyectado a 10 años, además, el caudal proyectado a captar según el número de usuarios proyectados.

4 Resultados

4.1 Resultados del Modelo de Disponibilidad y el IUA para las diferentes cuencas con los escenarios planteados.

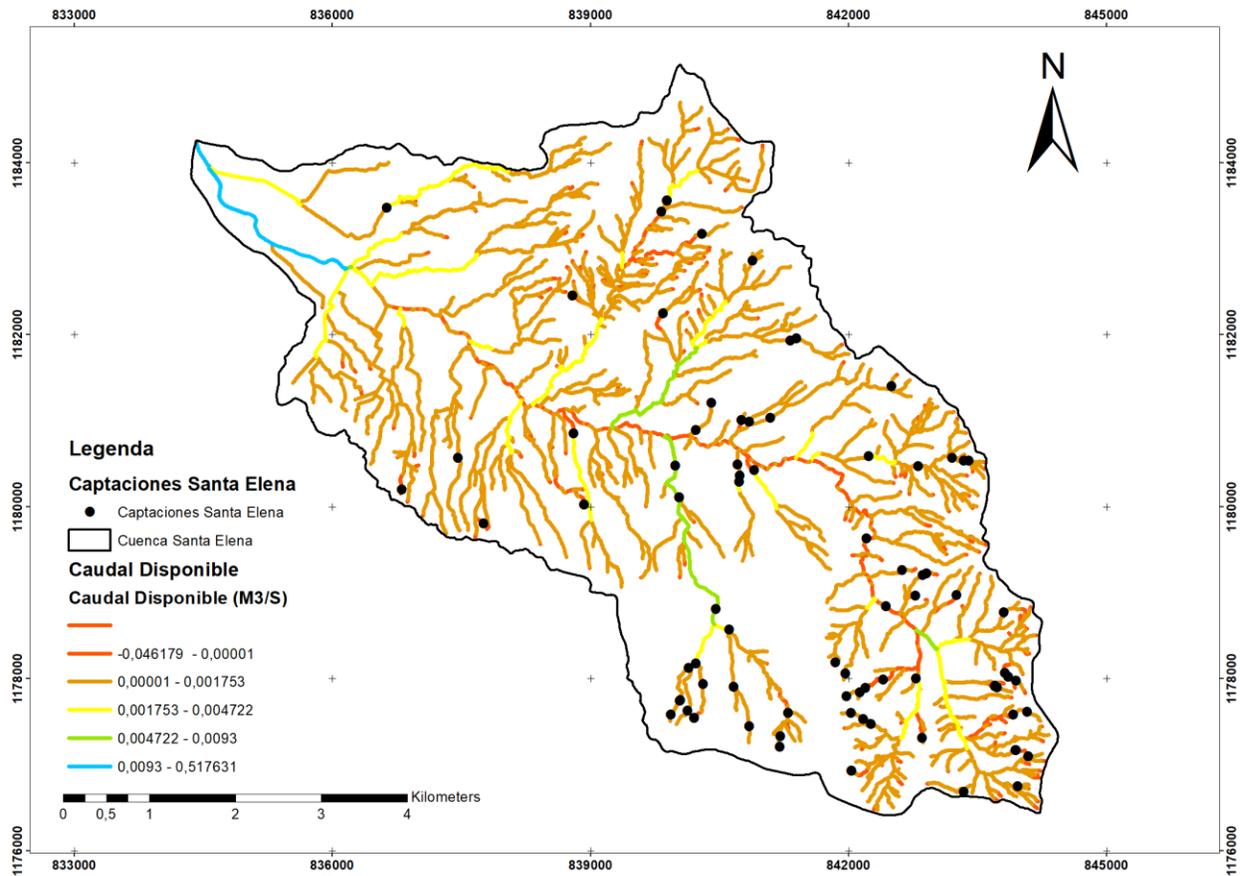
A continuación, se presentan y describen los resultados del modelo de disponibilidad hídrica y del IUA para cada cuenca y escenario planteado. Esto, por medio de mapas resultado.

4.1.1 Cuenca La Santa Elena.

A continuación, se presenta los mapas didácticos de disponibilidad hídrica para la cuenca La Santa Elena en el escenario actual sin vertimientos, Escenario con la Demanda Proyectada y Escenario Actual con Vertimientos. Además, los resultados del IUA correspondiente a cada escenario, En estos mapas se puede ver que la disponibilidad hídrica en los nacimientos de la red hídrica es menor que en las corrientes aguas abajo de la microcuenca, las cuales han recibido caudal de otras redes tributarias que aumentan el agua disponible. También, en el mapa se visualiza como las captaciones a lo largo de la cuenca cambian la cantidad de agua disponible en la red hídrica de la microcuenca. Además, en los mapas el color rojo representa en su mayoría los caudales negativos, esto quiere decir que en estos sectores se capta agua por encima del caudal disponible.

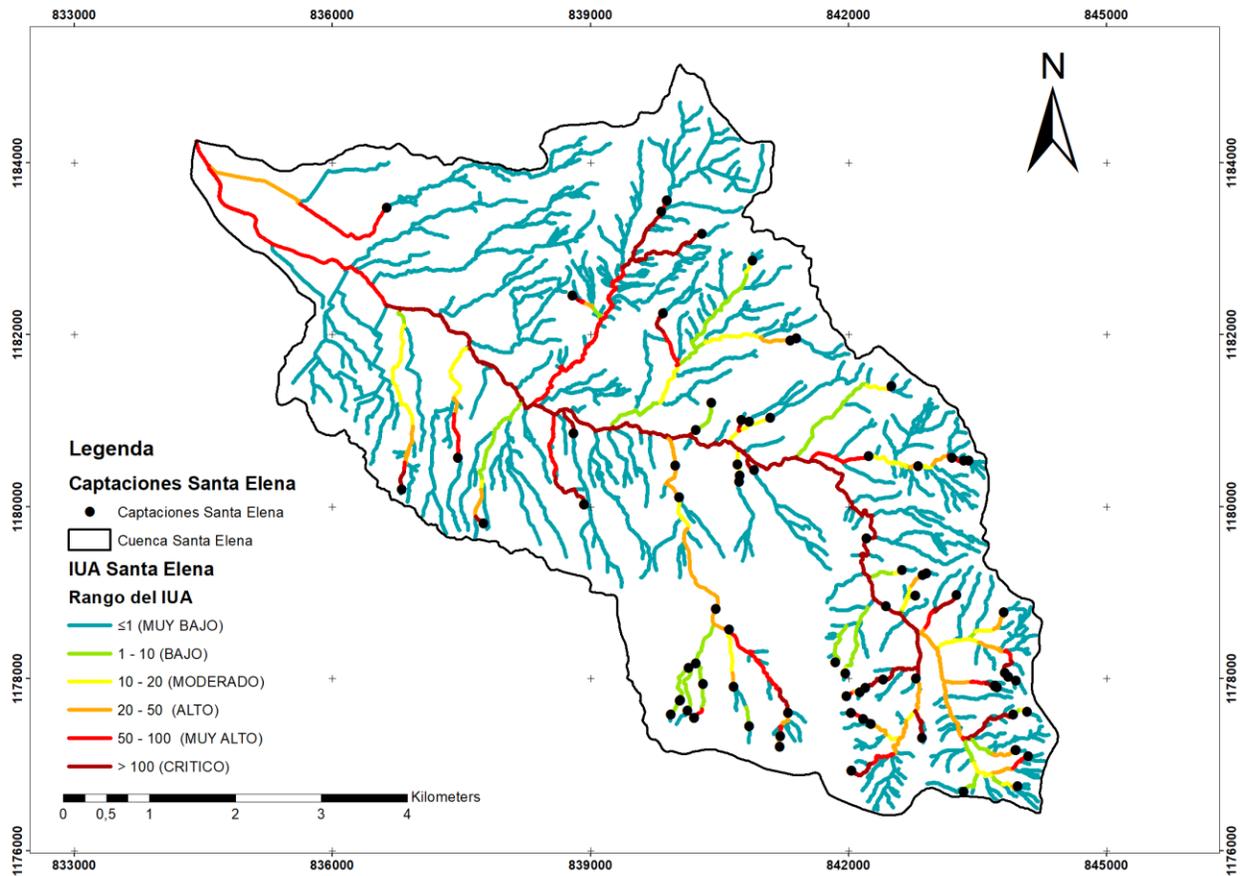
Figura 29

Mapa didáctico de disponibilidad hídrica de La Cuenca La Santa Elena - Escenario Actual sin vertimientos



Ahora, para el Escenario sin vertimientos mostrado en el **Figura 29** se observa que al final de la cuenca queda la mayor cantidad de caudal disponible (color azul). Sin embargo, se nota que a lo largo de la red principal y sus tributarias perdura los colores naranjados y rojos, lo que indica que en estas partes hay una gran presión hídrica, ya que se capta más caudal del disponible o el caudal disponible en esa zona es muy bajo (color naranjado), y esto es gracias a que son zonas muy cercanas a los nacimientos de la red hídrica, sumado a que en esta zona está la mayor densidad de captaciones

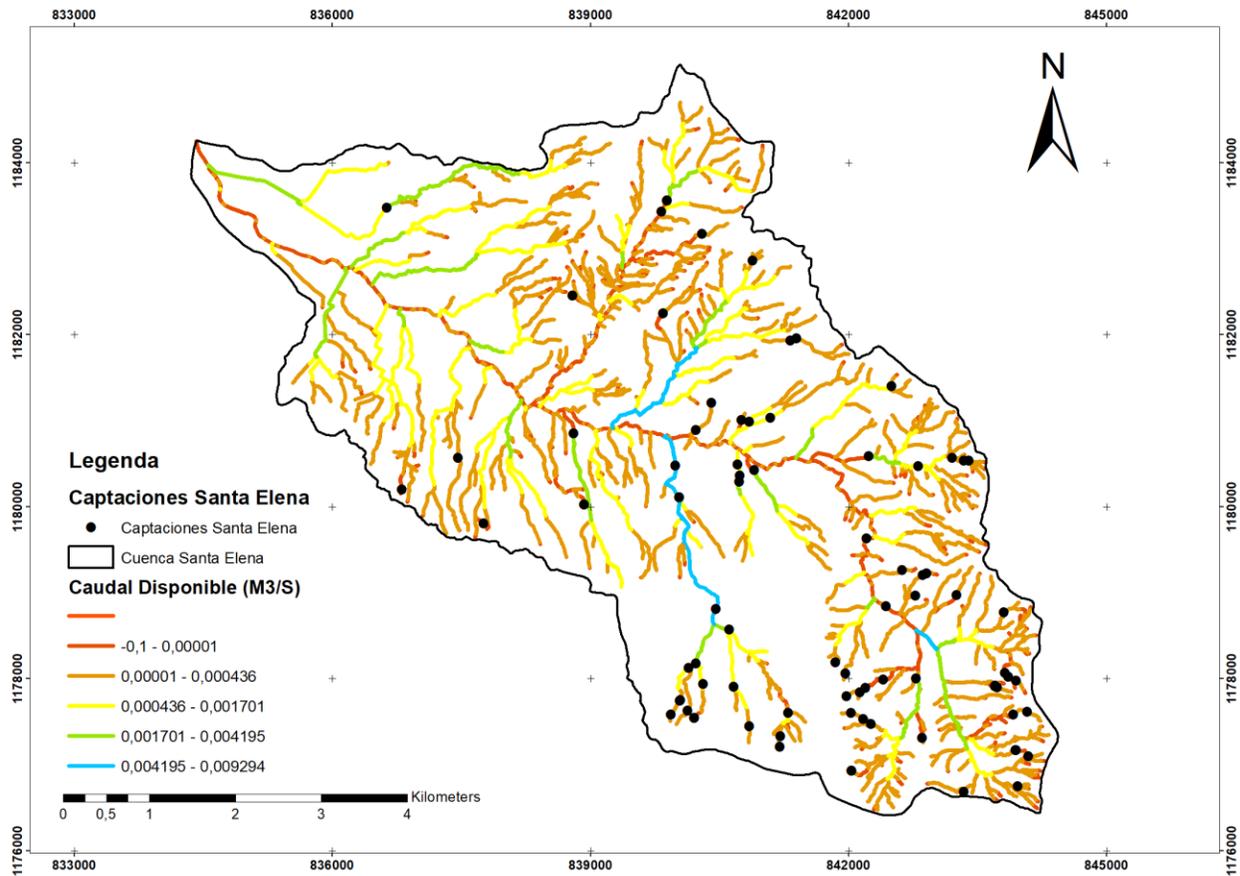
Figura 30
Mapa IUA de La Cuenca La Santa Elena- Escenario actual sin vertimientos



Los resultados del IUA se interpretan en base a la **Tabla 3**, estos para el escenario sin vertimientos plasmado en la **Figura 30** muestran que la red hídrica al final de la cuenca presenta una presión muy alta con respecto a la oferta superficial disponible. Además, aguas arriba en el drenaje principal se encuentra en una categoría crítica, ya que la presión de la demanda supera las condiciones de la oferta superficial disponible. Sin embargo, en los drenajes tributarios a la red principal se cuenta con un IUA muy bajo, esto quiere decir que la demanda de agua no es significativa con respecto a la oferta superficial disponible.

Figura 31

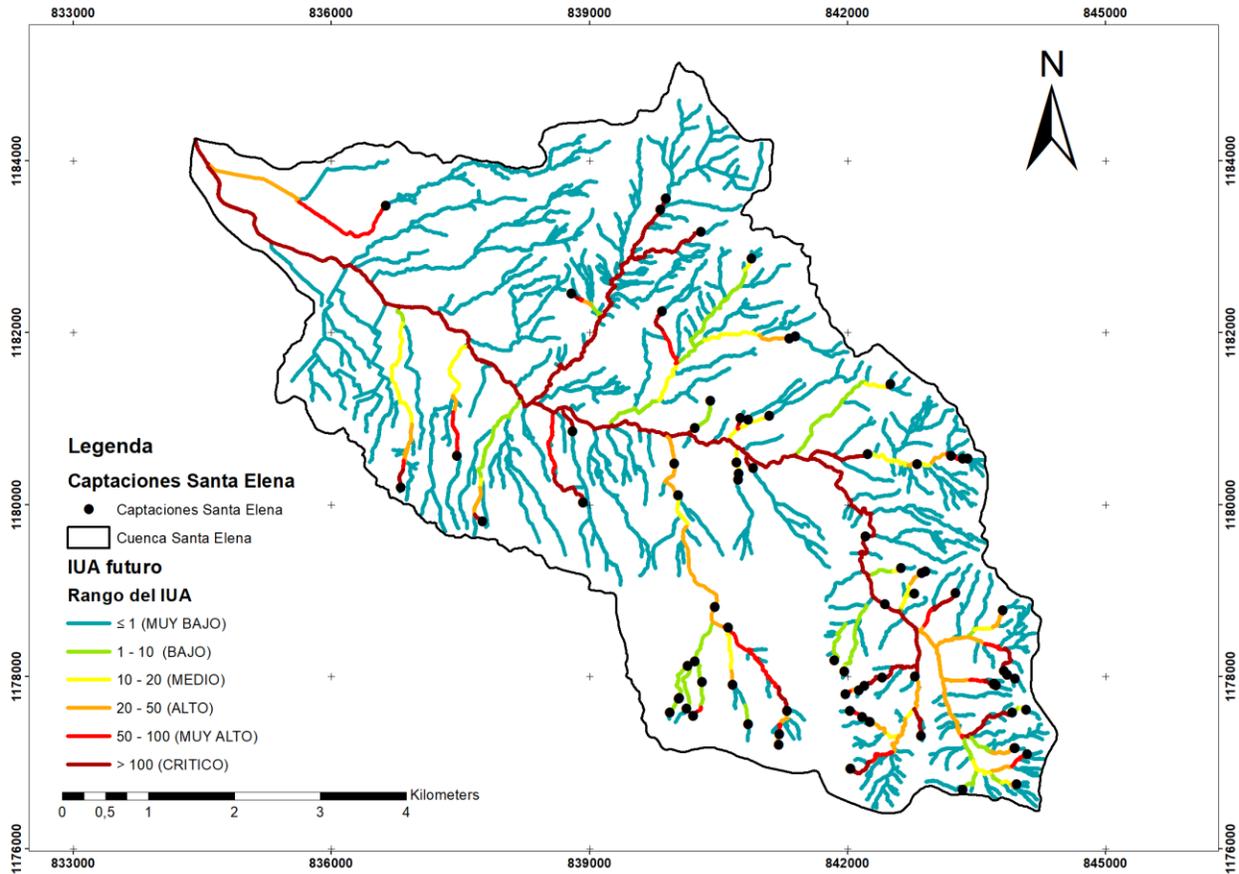
Mapa didáctico de disponibilidad hídrica de La Cuenca La Santa Elena - Escenario con demanda proyectada sin vertimientos



Por otro lado, se tiene el Escenario con demanda proyectada sin vertimientos en la **Figura 31**, en este se observa que al final de la red hídrica de la cuenca se capta un caudal mayor al disponible, esto es debido al incremento de la demanda hídrica que se proyectó. Sumado a esto, se ve que el caudal disponible es menor a lo largo de toda la cuenca, si bien en el mapa se observa varias zonas con color amarillo y azul, estos representan un caudal disponible mucho más bajo en comparación con el caudal disponible representado en la **Figura 29**.

Figura 32

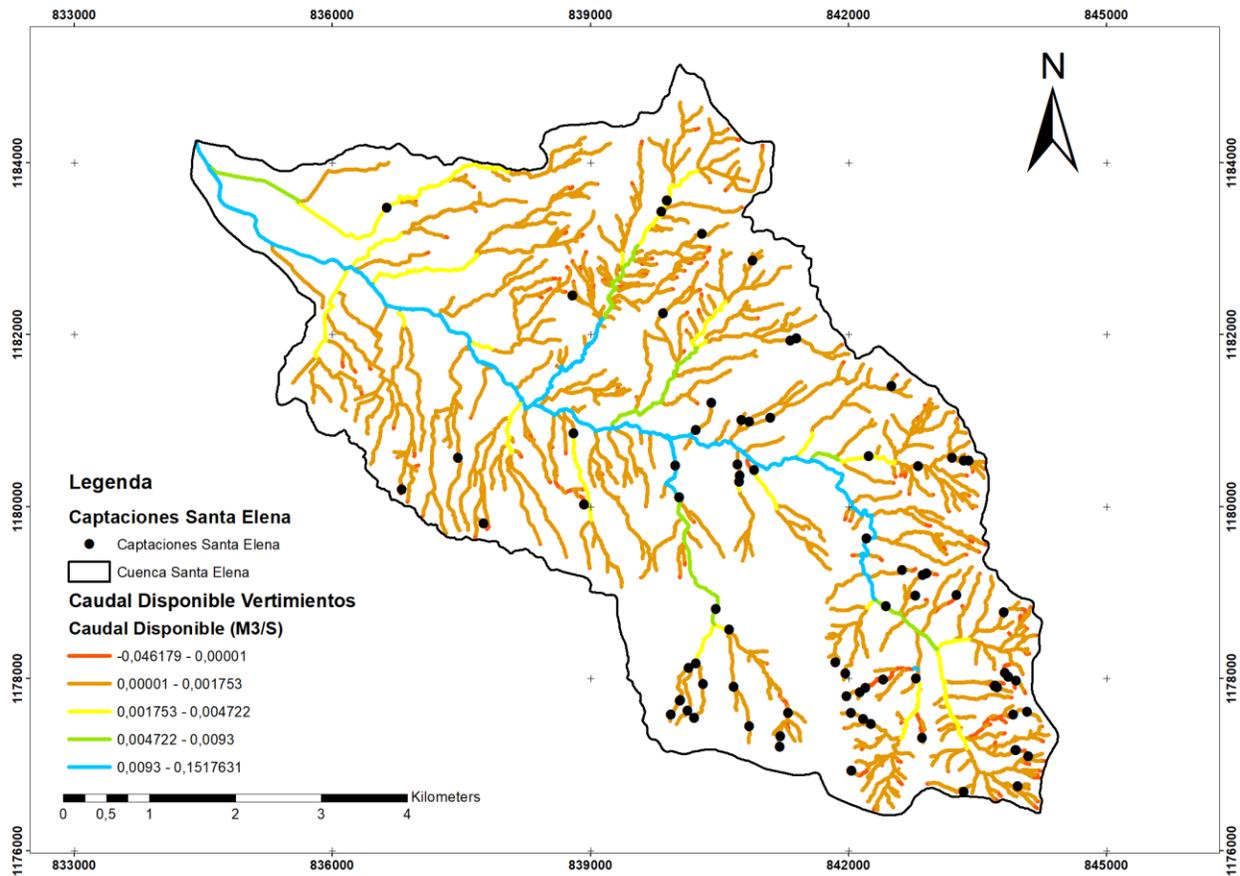
Mapa IUA de La Cuenca La Santa Elena- Escenario con demanda proyectada sin vertimientos



El IUA Para el escenario con demanda proyectada sin vertimientos plasmado en la **Figura 32**, muestra que a lo largo de todo el drenaje principal el IUA tiene una categoría crítica, esto, por el aumento en la demanda que se proyectó, lo que implica que en esta zona la presión ejercida por la demanda proyectada de agua supera la oferta superficial disponible. Además, se aprecia que uno de los tributarios que en el escenario actual sin vertimientos tenía la presión de la demanda muy alta respecto a la oferta superficial disponible, ahora está en categoría crítica, esto es debido al aumento en la demanda proyectada de los usuarios de esa zona de la microcuenca.

Figura 33

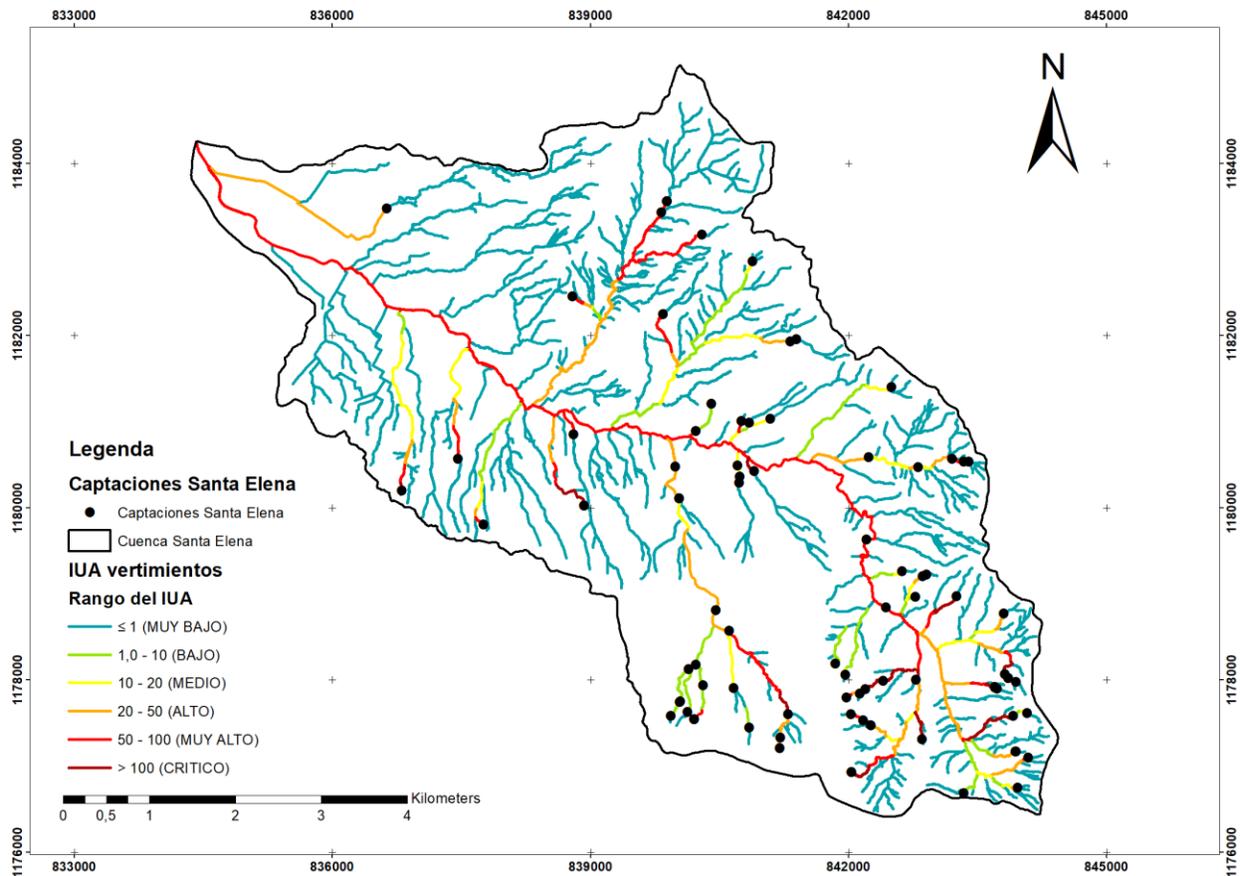
Mapa didáctico de disponibilidad hídrica de La Cuenca La Santa Elena - Escenario actual con vertimientos



Ahora, el escenario actual con vertimientos mostrado en la **Figura 33**, se observa que, gracias al incremento de agua disponible dado por los vertimientos, el cual es un aporte que implica la necesidad de tratar adecuadamente las aguas residuales de manera que se pueda utilizar el caudal vertido aguas abajo. Se evidencia que hay un aumento en el caudal disponible al final de la red hídrica de la cuenca, por lo que se tiene un caudal disponible considerable representado por un color azul y esto se mantiene a lo largo de la red principal. Además, gran parte de tributarios del drenaje principal están en color amarillo o verde, lo que indica que el caudal disponible en estas zonas es aceptable y hay mayor cantidad de caudal disponible que en el escenario actual sin vertimientos ilustrado en la **Figura 29** Mapa didáctico de disponibilidad hídrica de La Cuenca La Santa Elena - Escenario . Sin embargo, hay zonas en color naranjado, pero en su mayoría son zonas cerca al nacimiento de la red hídrica, donde se cuenta con poco caudal disponible.

Figura 34

Mapa IUA de La Cuenca La Santa Elena- Escenario actual con vertimientos

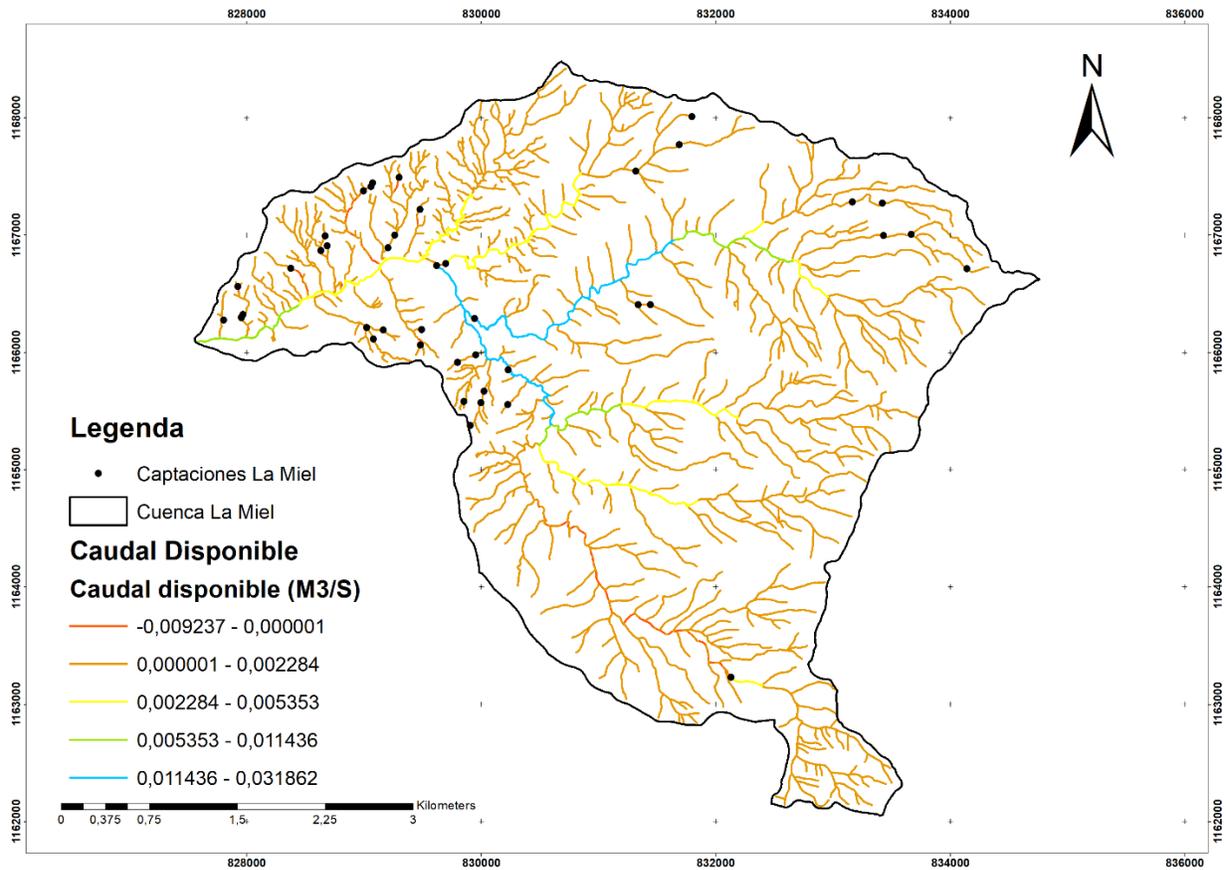


Los resultados de IUA para el escenario actual con vertimientos plasmados en la **Figura 34** muestra que gran parte del drenaje principal la presión de la demanda es muy alta respecto a la oferta superficial disponible, esto implica que gracias a el agua que se retornó de los vertimientos a la cuenca, la categoría de presión encontrada en los escenarios antes expuestos bajo de Critico a Muy alto. Al mismo tiempo, en los drenajes tributarios al drenaje principal, también se observa una disminución en la categoría de presión, donde en su mayoría se encuentran en categoría de Muy Bajo, Medio o Alto.

4.1.2 Cuenca La Miel.

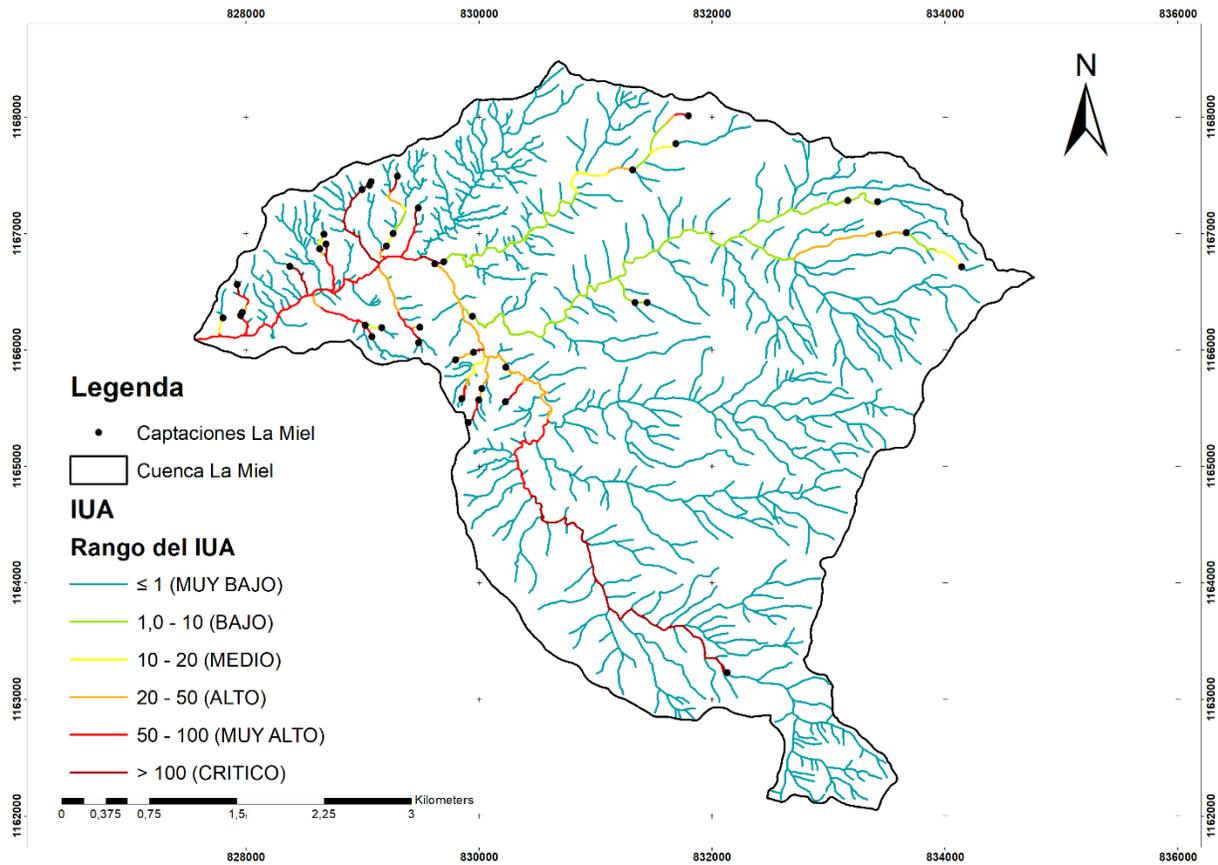
Figura 35

Mapa didáctico de disponibilidad hídrica de La Cuenca La Miel - Escenario actual sin vertimientos



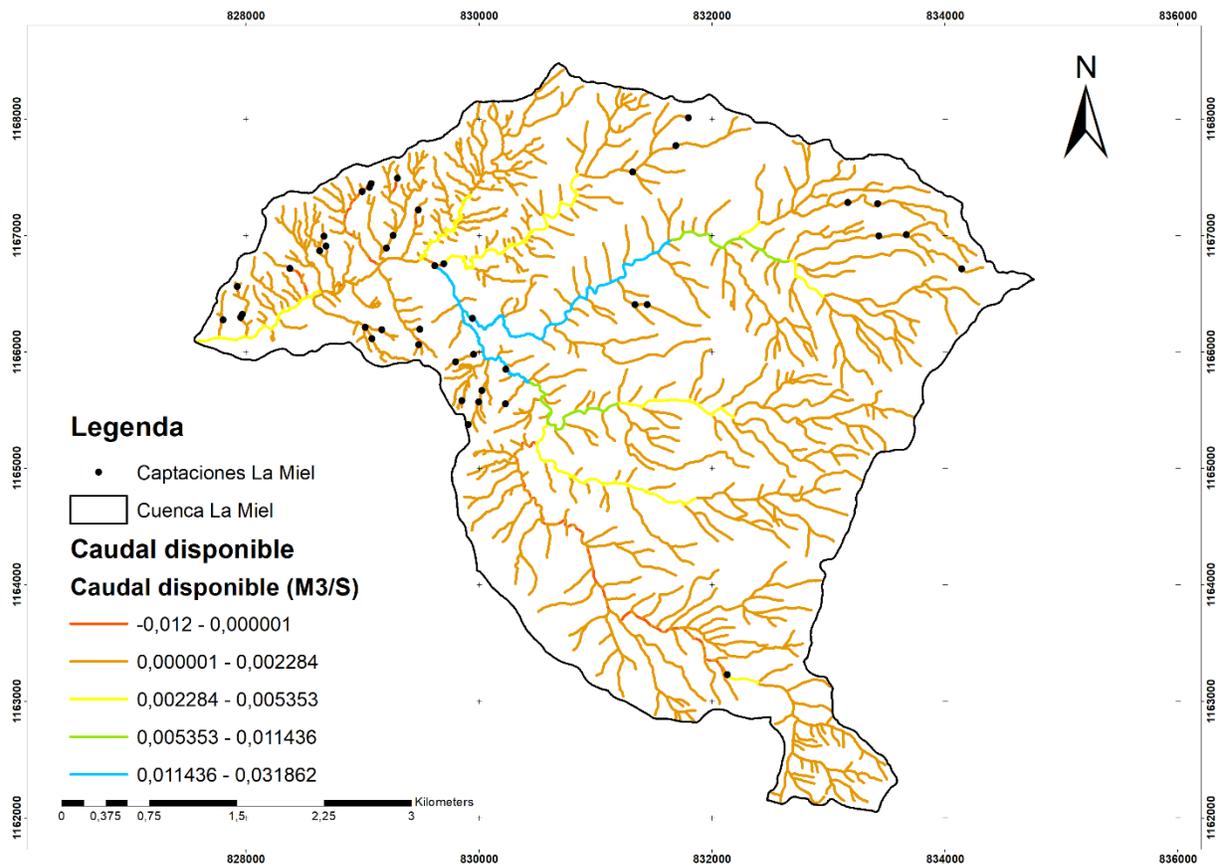
En el mapa didáctico de disponibilidad hídrica para el escenario actual sin vertimientos mostrado en la **Figura 35** se muestra que la cuenca La Miel al final de la red hídrica presenta un caudal disponible considerable en comparación al resto de la microcuenca, ya que se encuentra en el segundo rango más alto (Verde). También, se observa que a lo largo del drenaje principal hay una disminución de caudal captado, pasando de un color azul a un color verde al final de la cuenca, esta disminución se debe a que la mayor densidad de captaciones en la cuenca se encuentra en la parte baja y media. Y como es de esperarse, en los drenajes tributarios al drenaje principal, se presentan los caudales más bajos ya que es donde nacen los drenajes. Sin embargo, se observa pocas zonas de color rojo, esto indica que, en la mayoría de la cuenca, aunque en los rangos más bajos (color amarillo y naranjado), hay aun caudal disponible.

Figura 36
Mapa IUA de La Cuenca La Miel - Escenario actual sin vertimientos



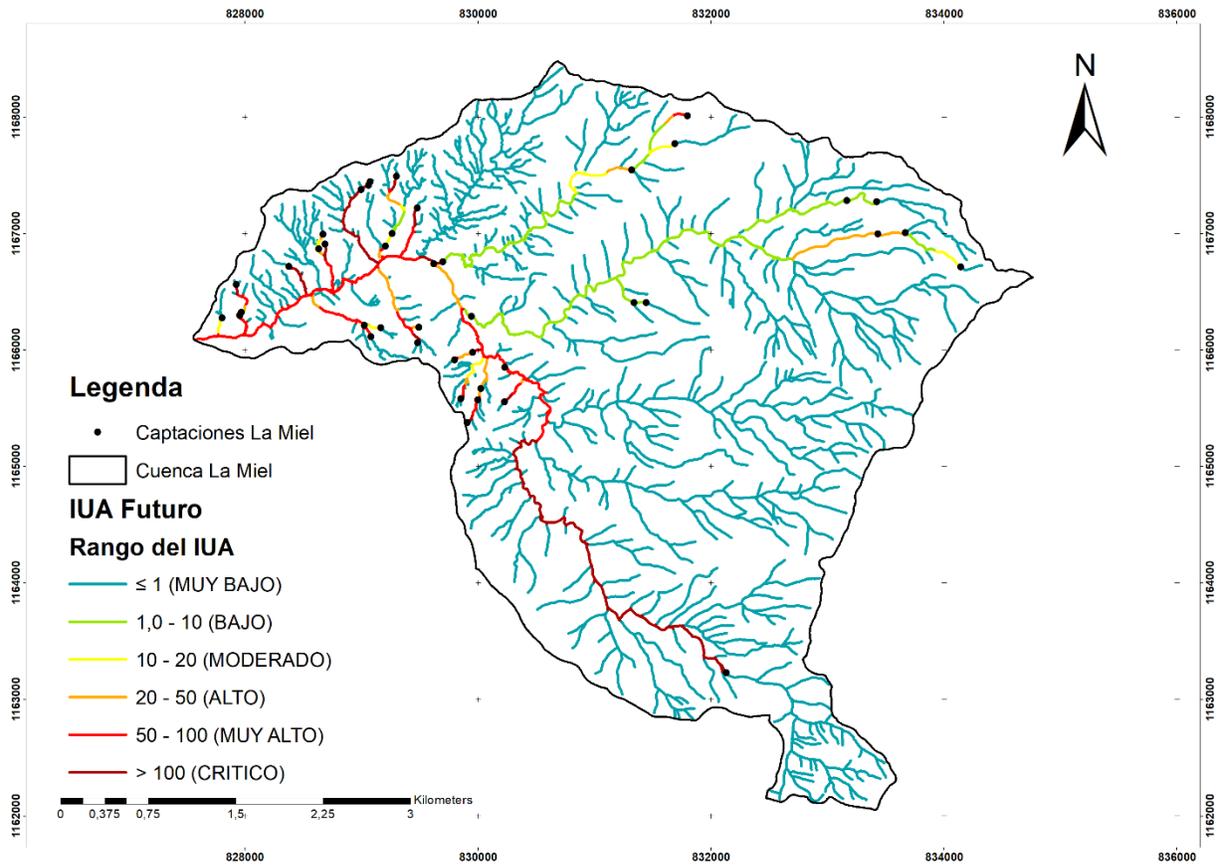
En el IUA del escenario actual sin vertimientos ilustrado en la **Figura 36**, se observa que a lo largo del drenaje principal hay varios cambios, iniciando en la parte alta con una categoría de presión Muy Baja, y después de pasar una de las captaciones más altas de la cuenca, pasando a tener una categoría de presión Crítica, lo que indica que en esa zona la presión de la demanda supera la oferta superficial disponible. Sin embargo, aguas abajo, en la mitad de la cuenca pasa a una categoría de presión Baja. Y finalmente, en la parte baja-media de la cuenca, al final del drenaje principal, se observa que vuelve a una categoría de presión Muy Alto, debido a que en esa zona se ubica la mayor demanda.

Figura 37
Mapa didáctico de disponibilidad hídrica de La Cuenca La Miel - Escenario con demanda proyectada sin vertimientos



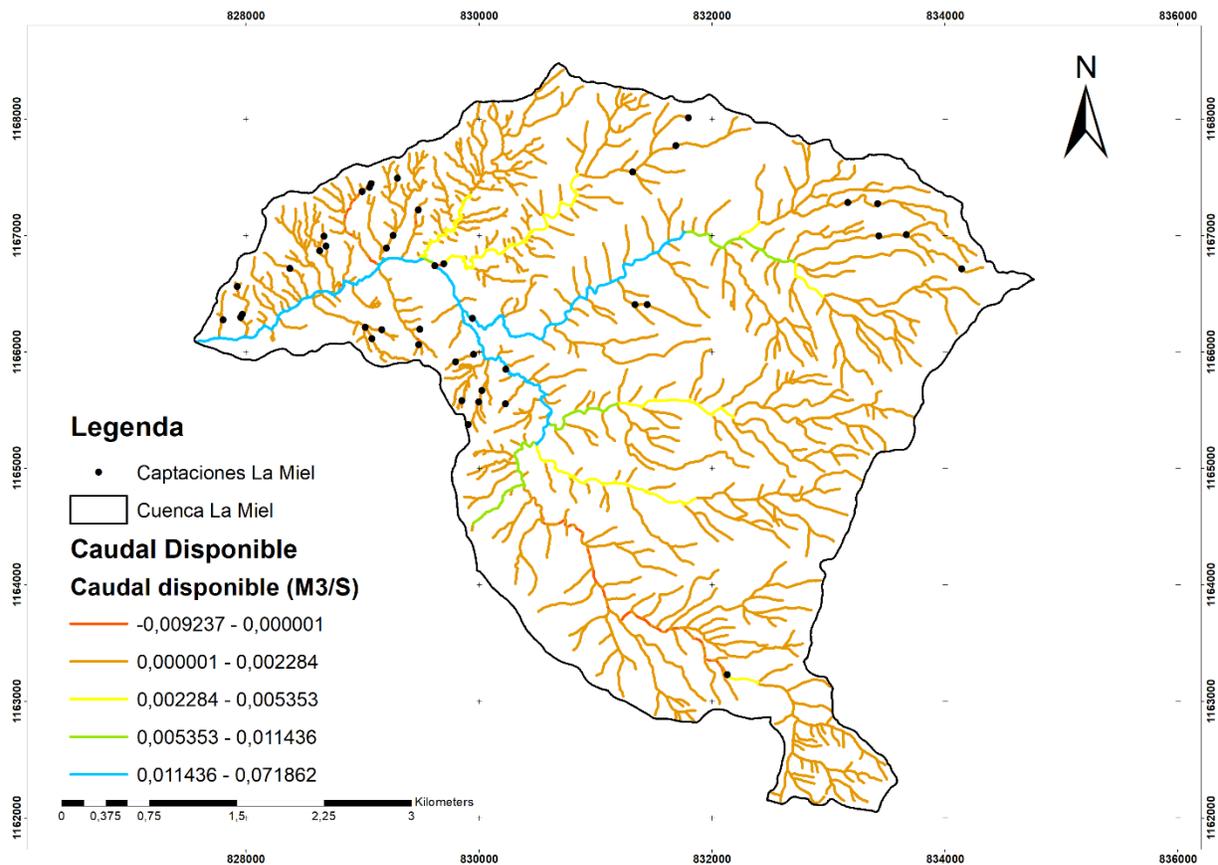
El mapa didáctico de disponibilidad hídrica para el escenario con demanda proyectada sin vertimientos ilustrado en la **Figura 37** muestra que a lo largo del drenaje principal hay varios cambios, mostrando el mayor caudal disponible en la parte media de la cuenca (color azul) y en la parte baja de la cuenca (color amarillo). Además, evidenciando que en comparación con escenario anteriormente expuesto (**Figura 35**), hubo una disminución en el caudal disponible en la parte baja de la cuenca, debido a que la mayoría de captaciones se concentran en esta zona, y por ende la demanda proyectada tubo mayor incidencia en este lugar. También, se vio que no se presentaron muchos cambios en los drenajes tributarios del drenaje principal

Figura 38
Mapa IUA de La Cuenca La Miel - Escenario con demanda proyectada sin vertimientos



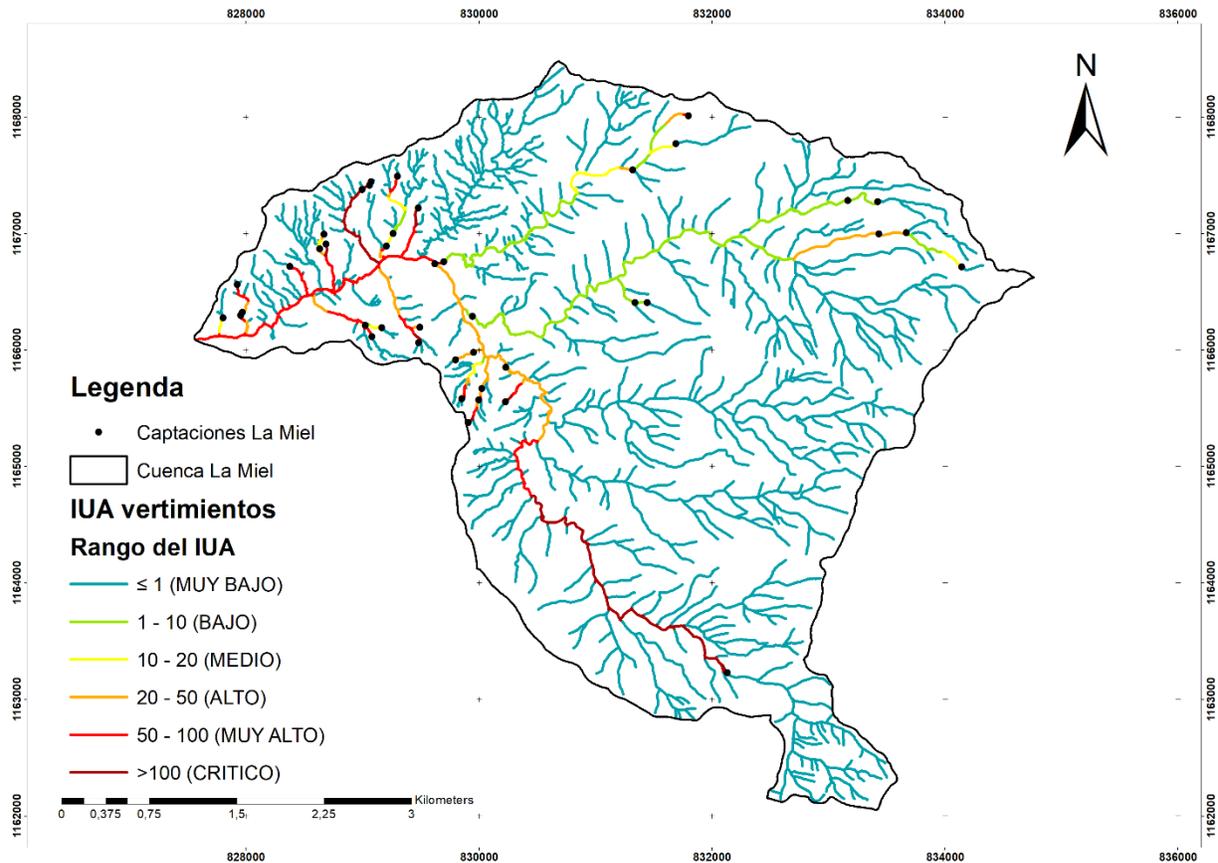
Como resultado del IUA para el escenario con demanda proyectada sin vertimientos ilustrado en la **Figura 38**, se ve que no hay mucha diferencia con respecto al IUA del escenario actual sin vertimientos (**Figura 36**) Conservan casi las mismas características, sin embargo, se observa que en medio de la cuenca hay un cambio en el drenaje principal, ya que se extiende la categoría de presión Crítico y Muy Alto a lo largo de todo el drenaje principal. Esto, es debido a que aguas arriba se encuentra una de los mayores caudales captados de la cuenca, lo que sumado a la demanda proyectada incrementa la categoría de presión en esta zona.

Figura 39
Mapa didáctico de disponibilidad hídrica de La Cuenca La Miel - Escenario actual con vertimientos



Para el escenario actual con vertimientos, el mapa didáctico de caudal disponible mostrado en la **Figura 39**, muestra que el mayor caudal disponible está a lo largo del drenaje principal, estando en su mayoría de color azul. Esto, debido a el retorno de los vertimientos que incrementa el caudal disponible en la microcuenca.

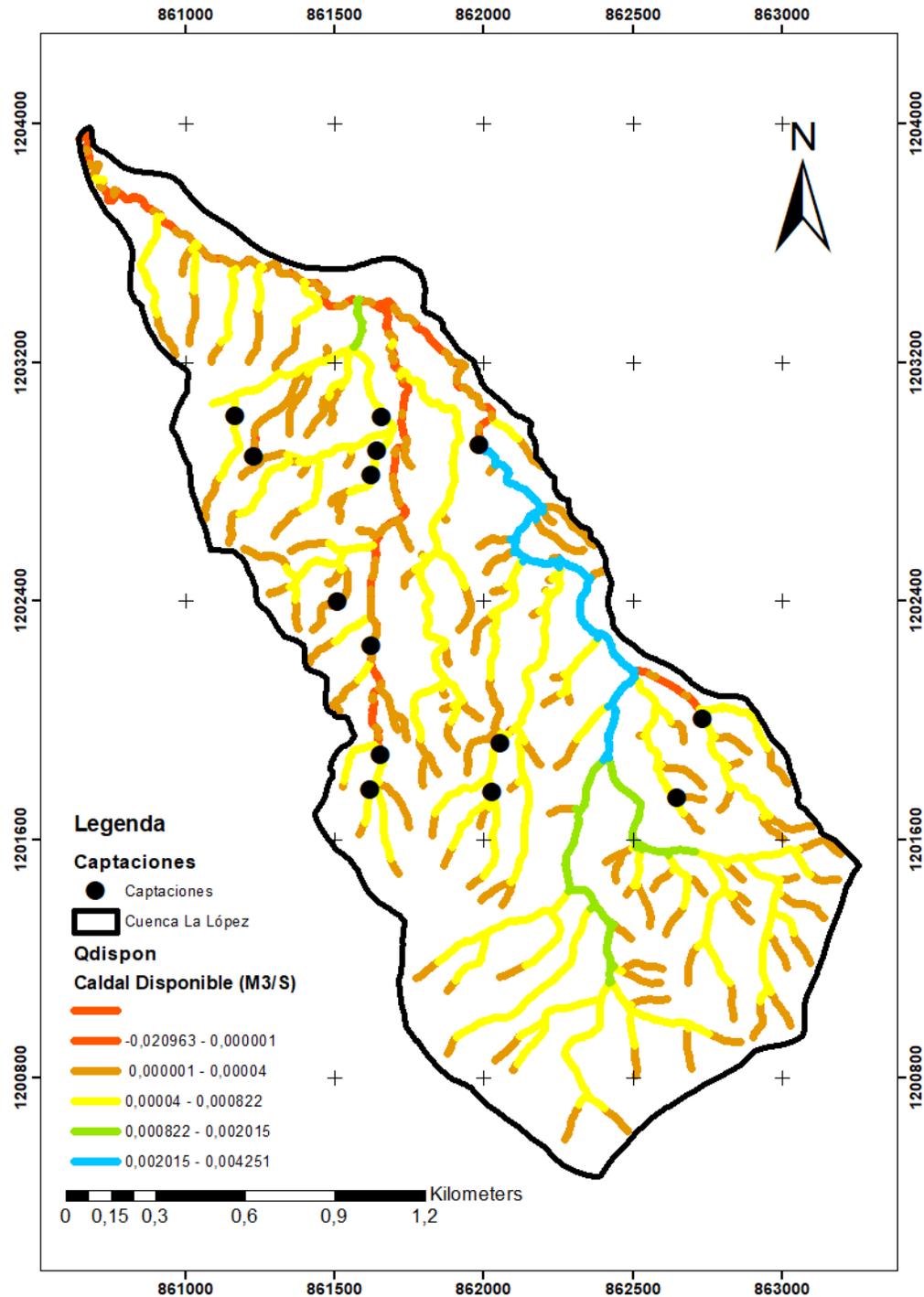
Figura 40
Mapa IUA de La Cuenca La Miel - Escenario actual con vertimientos



Los resultados del IUA para el escenario actual con vertimientos ilustrados en la **Figura 40**, muestran que en la mayoría de la red hídrica los drenajes tienen una categoría de presión Muy Bajo. Sin embargo, en el drenaje principal se presenta la categoría de presión Crítico en la parte alta de la cuenca, Alto en la parte media de la cuenca y Muy Alto en la parte baja de la cuenca, donde se presenta mayor cantidad de captaciones.

4.1.3 Cuenca La López

Figura 41
Mapa didáctico de disponibilidad hídrica de La Cuenca La López - Escenario actual sin vertimientos

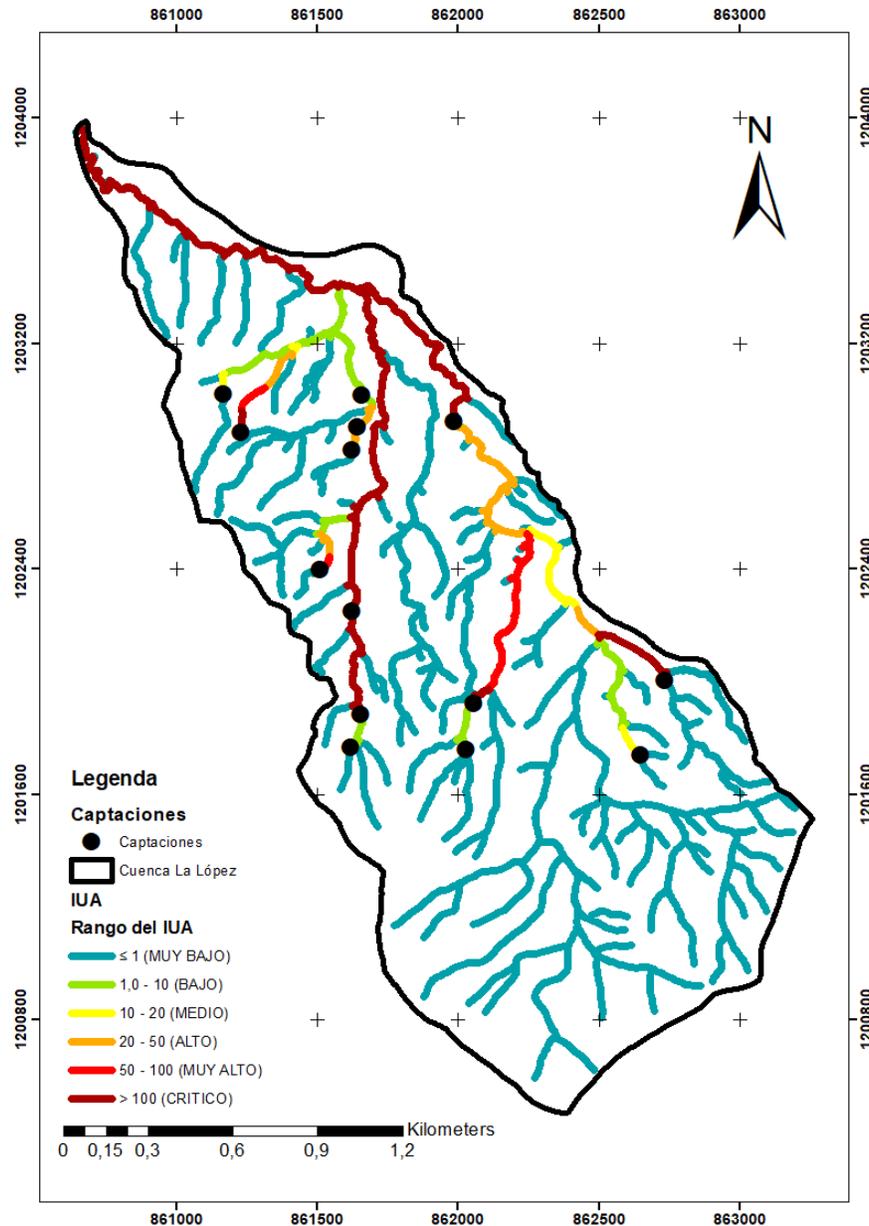


En el caudal disponible para el escenario actual sin vertimientos plasmado en la **Figura 41** se ve que hay un déficit de caudal disponible al final de la red hídrica representado con el color rojo y naranjado. Además, que, en la parte media de la cuenca, el drenaje principal cuenta con un

caudal disponible alto en comparación al resto de la microcuenca representado en color azul, y este se ve disminuido por una captación. También, se observa que la mayoría de tributarios del drenaje principal tienen un caudal disponible de rango medio, representado en color amarillo.

Figura 42

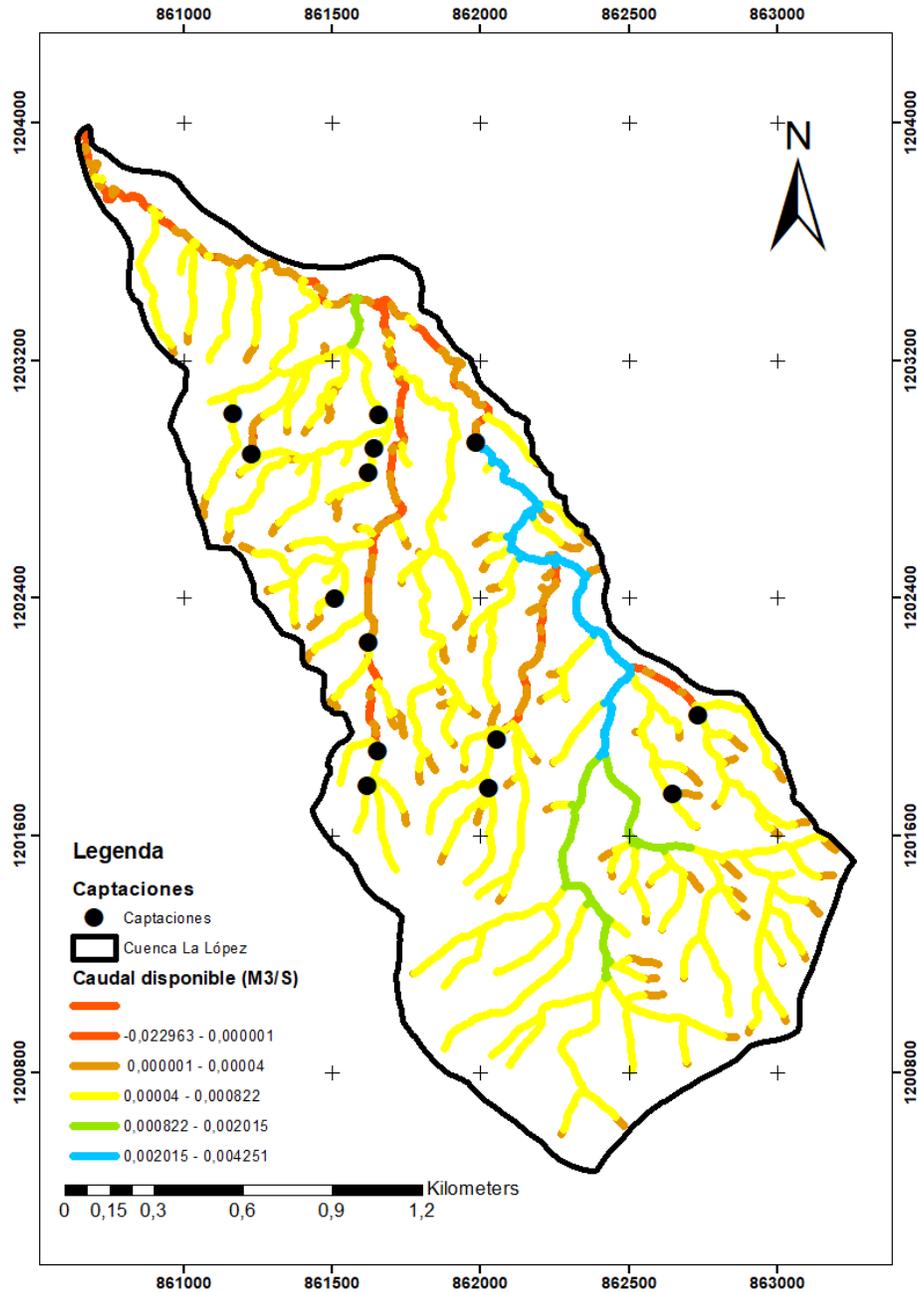
Mapa IUA de La Cuenca La López – Escenario actual sin vertimientos



En los resultados del IUA representados en la **Figura 42**, se observa que al final de la red hídrica se tiene una categoría de presión Crítico, por lo que en esta zona la demanda hídrica supera la oferta hídrica superficial disponible, esto mismo se ve en algunos tributarios del drenaje principal ya que cuenta con tres captaciones importantes. También en el drenaje principal se observa que en la parte media de la cuenca hay presiones de categoría Medio y Alto. Por otro lado, en la mayoría de los tributarios se ve una presión de categoría Muy Baja, ya que en estas zonas se presentan muy pocas captaciones.

Figura 43

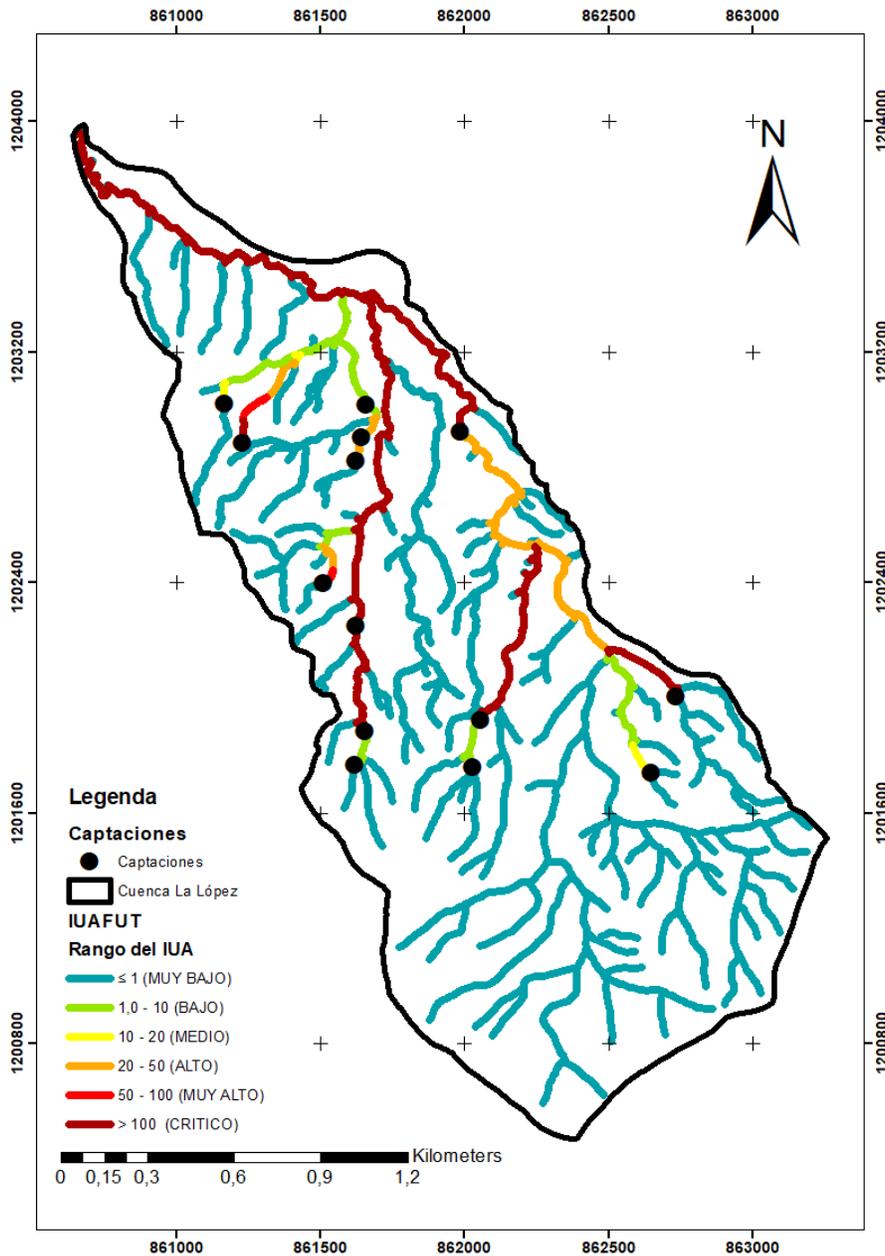
Mapa didáctico de disponibilidad hídrica de La Cuenca La López - Escenario con demanda proyectada sin vertimientos



En la **Figura 43** se muestra la disponibilidad hídrica de manera didáctica para el escenario con demanda proyectada sin vertimientos. En este se observa que al final de la red de drenaje hay un caudal disponible de rango bajo representado en color naranjado. Además, que en la parte media de la cuenca hay caudales disponibles de rango alto representado en color azul. También, que en la mayoría de los tributarios hay un caudal de rango medio representado en color amarillo. Sin

embargo, gracias al aumento en el caudal captado por la demanda proyectada, en algunos tributarios se ve que hubo un cambio en los rangos de caudal disponible comparado con el escenario actual sin vertimientos (*Figura 41*), pasando de un rango medio representado en color amarillo, a un rango bajo de color naranja.

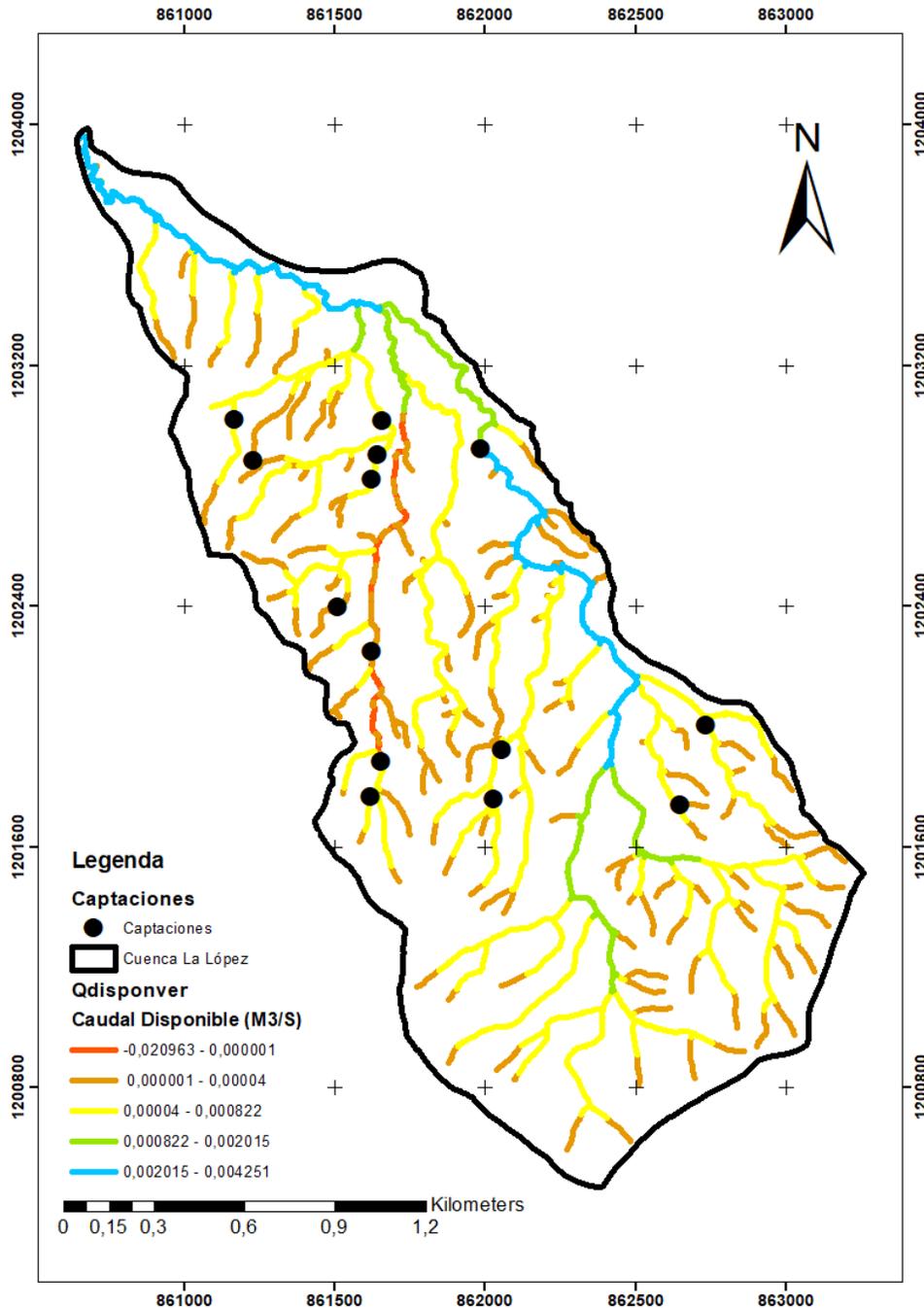
Figura 44
Mapa IUA de La Cuenca La López - Escenario con demanda proyectada sin vertimientos



En el IUA representado en la **Figura 47** para el escenario futuro, se vio que no hubo un cambio muy significativo con respecto a el IUA del escenario actual sin vertimientos (**Figura 42**). Solo se observa un pequeño cambio en la parte media de la cuenca, en donde un tramo del drenaje principal pasa de una categoría de riesgo Medio a Alto.

Figura 45

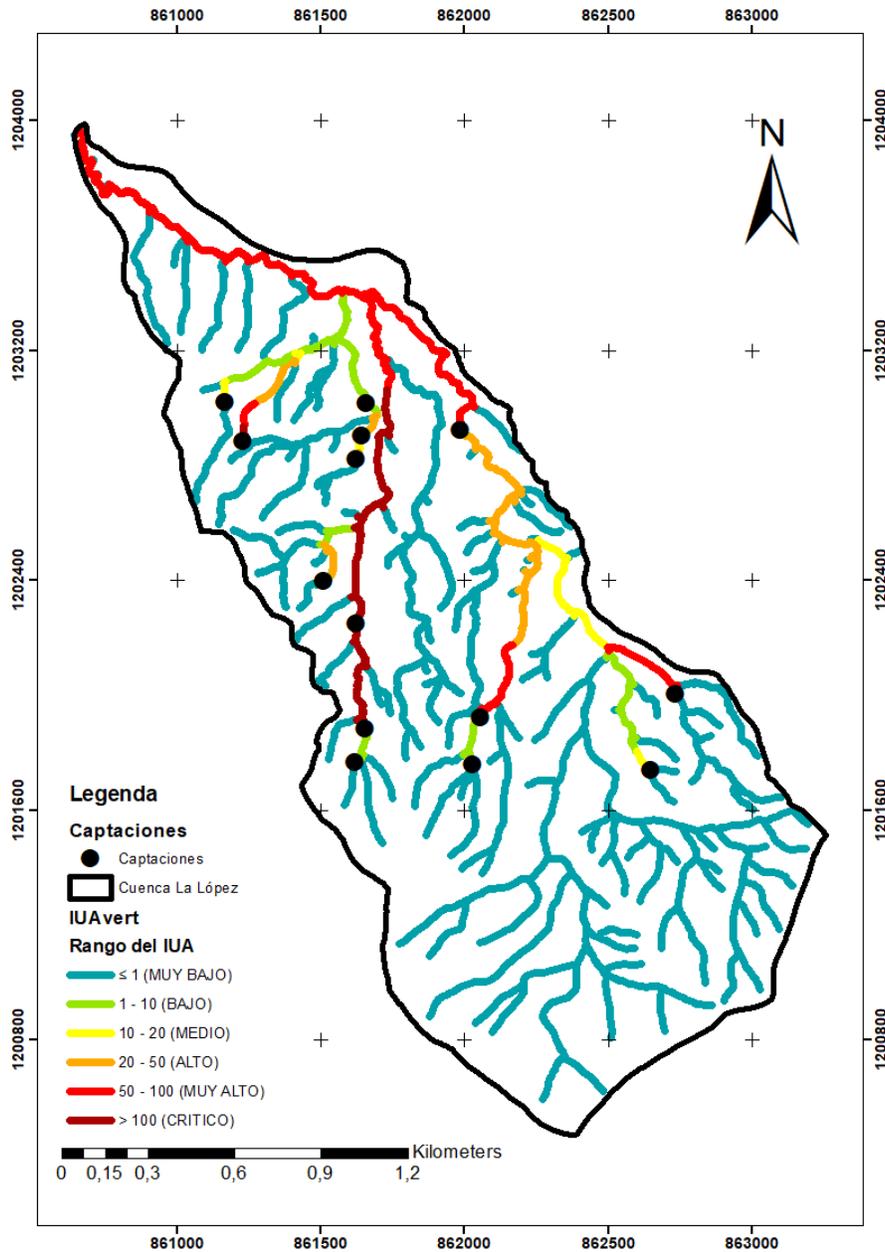
Mapa didáctico de disponibilidad hídrica de La Cuenca La López – Escenario actual con vertimientos



En la **Figura 45** se muestra el caudal disponible para el escenario actual con vertimientos, en este se observa que hubo un cambio sustancial en la zona final de la red hídrica, pasando de tener en el escenario actual sin vertimientos en esta zona un rango de caudal disponible bajo (**Figura 41**), representado en color naranjado a un rango de caudal disponible alto representado en

color azul, esto mismo sucede en otros tributarios del drenaje principal de la microcuenca. Este aumento es debido al caudal retornado por los vertimientos.

Figura 46
Mapa IUA de La Cuenca La López - Escenario actual con vertimientos



En la **Figura 46** se muestra el IUA para el escenario con vertimientos, en este se muestra que en la parte baja de la cuenca, al final de la red hídrica, se cuenta con una categoría de presión

Muy Alta, y en la parte media de la cuenca, el drenaje principal cuenta con categorías de presión Medías y Altas. También, se ve que en uno de los tributarios del drenaje principal tiene una categoría de presión Critico.

5 Análisis

Según se vio en la información obtenida por el proyecto 8 (*Anexo I*), la principal presión por demanda se debe al uso doméstico, ya que supone gran parte del caudal total captado en la mayoría de las microcuencas. Sin embargo, en la microcuenca La Miel, la mayor presión por demanda se debe al uso industrial.

Para el análisis de los resultados, se elabora una imagen para cada microcuenca en donde se pueda contrastar los diferentes escenarios planteados, esto con el fin de facilitar la comparación y el análisis de los resultados obtenidos del caudal disponible y el IUA.

Figura 47
Resultado IUA de la Microcuenca La López en los diferentes escenarios planteados

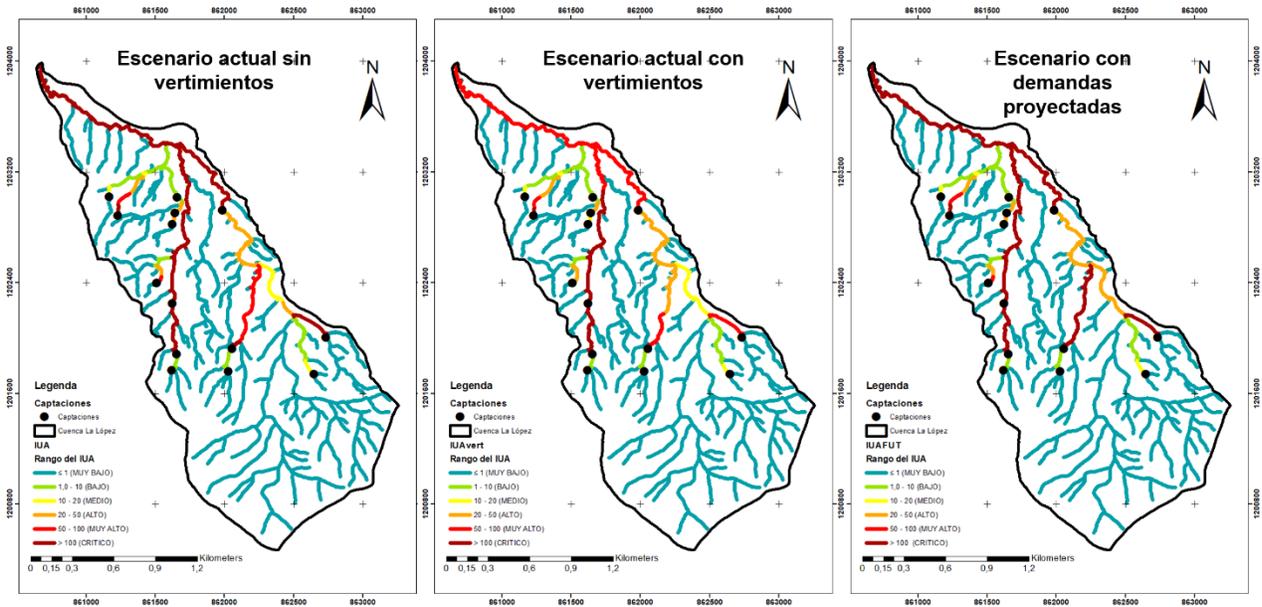
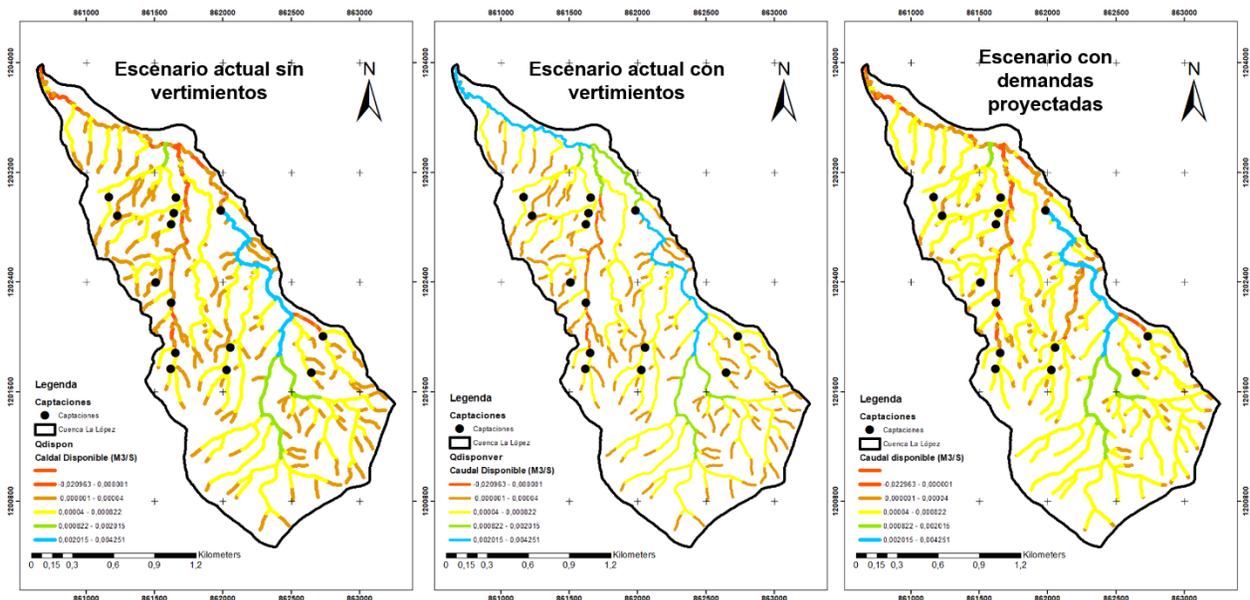


Figura 48
Resultado Caudal Disponible de la Microcuenca La López en los diferentes escenarios planteados



Como se observa en la **Figura 48**, en el escenario actual sin vertimientos La López cuenta con un caudal disponible de rango bajo al final de la cuenca (color naranjado), en la cual se ve un cambio brusco de caudal disponible en la red principal (pasando de rango azul a naranjado) debido a que en esta zona media de la cuenca se encuentra la mayor captación, la cual es para suplir el uso doméstico, y comparándolo con el resultado del IUA para el mismo escenario plasmado en la **Figura 47**, en esta misma zona de la parte baja de La López se ve la presión por la demanda supera las condiciones de la oferta superficial disponible (Presenta una categoría de Crítico) en el drenaje principal y en un tributario, mostrando que estas captaciones influyen de una manera considerable en la microcuenca.

Ahora, analizando los resultados de caudal disponible del escenario con demanda proyectada sin vertimientos (**Figura 48**), y relacionándolos con los resultados del IUA para el escenario con demanda proyectada sin vertimientos plasmados en la **Figura 47**. Se muestra que La López en el escenario futuro cuenta con un caudal disponible de rango bajo al final de la cuenca (color naranjado), y tiene una distribución de caudal muy similar al escenario actual sin vertimientos de La López, en el drenaje principal, sin embargo, se presenta un cambio en uno de los drenajes tributarios en la zona media de la cuenca, el cual gracias al incremento de caudal captado por la demanda proyectada pasa de tener un caudal disponible de rango medio (Color amarillo) en el escenario sin vertimientos a uno de rango bajo (color naranjado), lo cual también

se ve reflejado en el resultado del IUA del escenario futuro, evidenciando que en la misma zona pasa de una categoría Muy Alto, a uno de Critico en el escenario proyectado, revelando que el aumento en la demanda por el incremento de la población a 10 años sube la presión de la demanda, superando así las condiciones de la oferta superficial disponible.

También, analizando los resultados de caudal disponible del escenario actual con vertimientos **Figura 48**, y relacionándolos con los resultados del IUA para el escenario actual con vertimientos plasmados en la **Figura 47**. Se ve que La López en el escenario actual con vertimientos presenta un caudal disponible de rango alto al final de la cuenca (color azul), y tiene un incremento general en el caudal disponible a lo largo de la misma, pasando de un caudal disponible de rango bajo en el escenario actual sin vertimientos de La López en el drenaje principal en la zona baja y media de la cuenca, a un caudal disponible de rango alto (color azul) y medio alto (color verde) en la misma zona para el escenario actual con vertimientos, este aumento se debe al caudal retornado procedente los vertimientos, lo cual se ve reflejado en el cambio del resultado del IUA de un escenario a otro, evidenciando que en zona baja de la cuenca para el escenario actual sin vertimientos pasa de una categoría Critico, a uno de Muy Alto en el escenario actual con vertimientos en la misma zona, esta reducción de categoría también se ve en pequeños tramos de la zona media de La López, revelando que el retorno de los vertimientos tomados como parte de la oferta superficial disponible reduce la presión por la demanda a lo largo de la microcuenca.

Figura 49

Resultados de caudal disponible de la Microcuenca La Santa Elena en los diferentes escenarios planteados

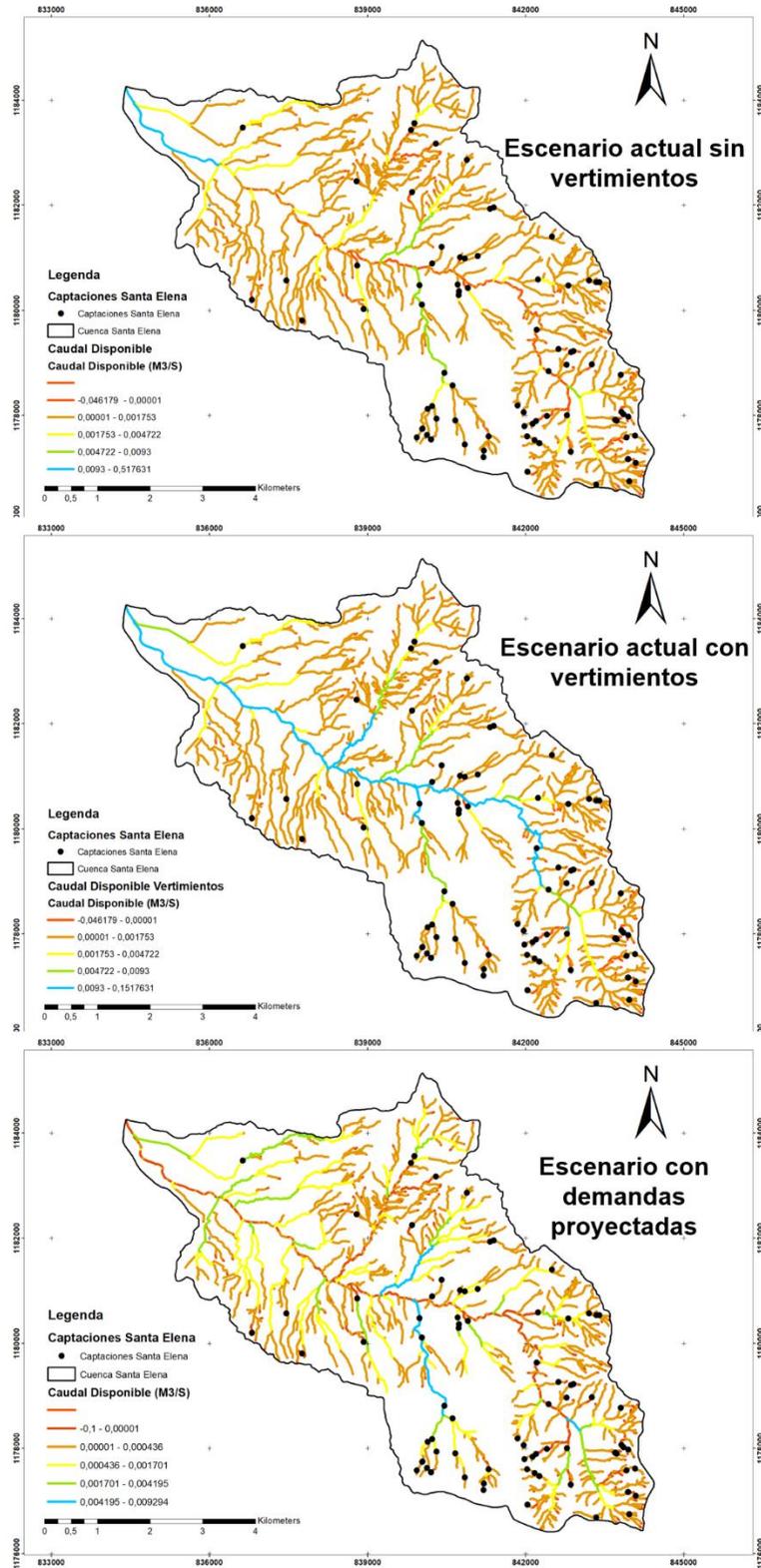
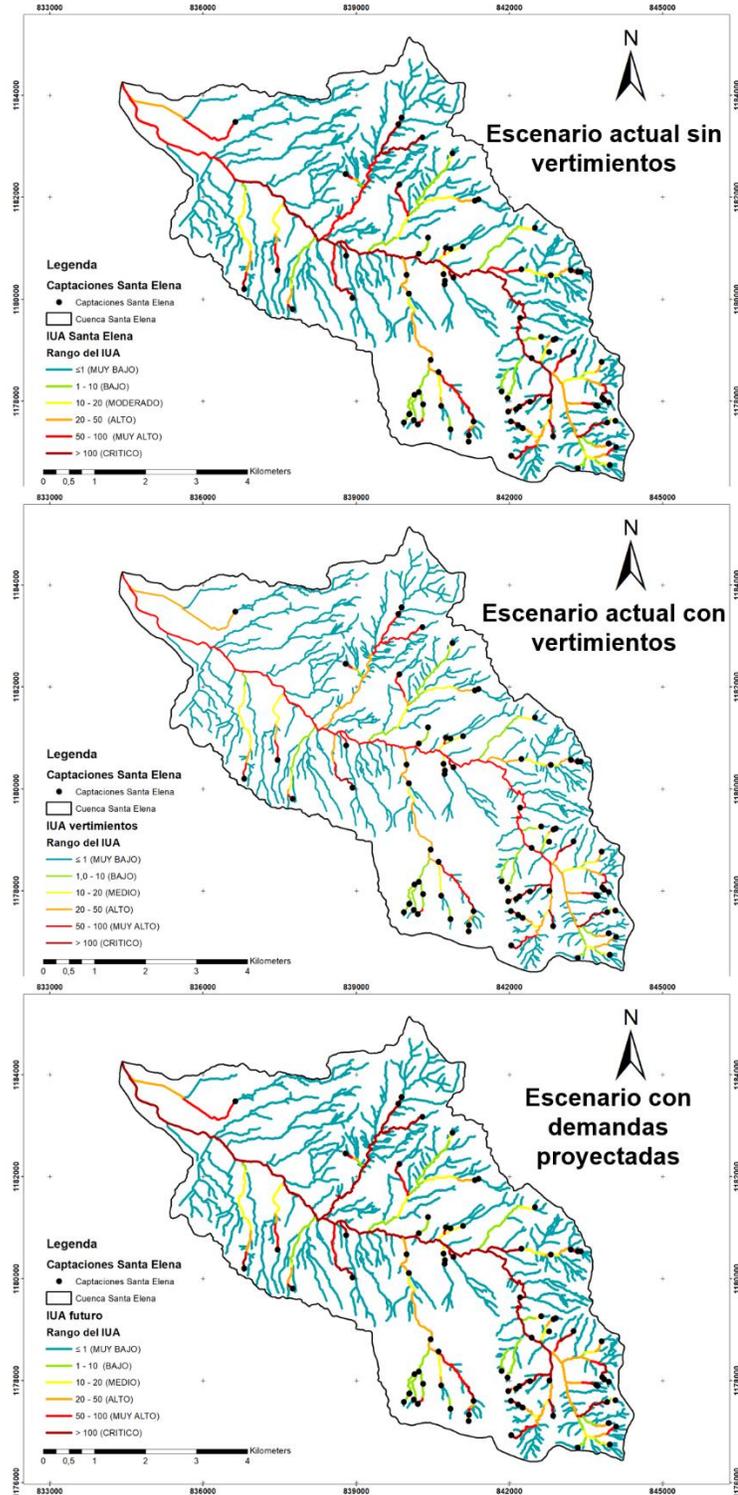


Figura 50
Resultados del IUA de la Microcuenca La Santa Elena en los diferentes escenarios planteados



Como se observa en los resultados de caudal disponible en los diferentes escenarios En La Santa Elena (*Figura 49*), el caudal disponible tiene un comportamiento variado a lo largo de la red de drenajes en el escenario actual sin vertimientos, ya que en la zona alta y media de la cuenca se presenta un caudal de rango bajo (color naranjado), sin embargo al final de la cuenca presenta un caudal disponible de rango alto (Color Azul) gracias al agua recibida por los diferentes drenajes tributarios aguas arriba, esta situación se debe a que como muestra el IUA de cuenca La Santa Elena para este escenario actual sin captaciones, la mayor presión por demanda se concentra en las partes altas y medias de la cuenca, donde se tiene una categoría de presión Crítica a lo largo del drenaje principal que pasa por estas zonas, ya que en estos lugares es donde se concentra la mayor cantidad de captaciones, lo que influye en la muy alta presión de la demanda respecto a la oferta superficial disponible que se da en la parte baja de la Santa Elena.

Además, en el escenario con demanda proyectada sin vertimientos En cuenca La Santa Elena, si se exhibe una disminución significativa del caudal disponible con respecto al escenario actual sin captaciones, esto se ve reflejado ya que en el escenario con demanda proyectada los rangos de caudal disponible son más pequeños que el del escenario actual sin vertimientos, sumado a esto, se puede observar que por el incremento en la demanda, el drenaje principal del escenario con demanda proyectada sin vertimientos presenta en su mayoría caudal disponible de rango bajo (naranjado) o que se extrae caudal por encima de la capacidad de la oferta disponible superficial (color rojo), esto se ve muy reflejado en el IUA del escenario con demanda proyectada sin vertimientos, donde se observa un cambio significativo en el drenaje principal y algunos tributarios con respecto al escenario actual sin vertimiento, pasando de una categoría de IUA Muy Alto a uno de Crítico, demostrando que el futuro aumento en la población de cuenca La Santa Elena puede agravar el estado de la quebrada, tanto que la demanda puede superar la oferta hídrica disponible de la quebrada la Santa Elena.

Ahora, en el escenario actual con vertimientos en cuenca La Santa Elena, se exhibe un incremento significativo del caudal disponible con respecto al escenario actual sin vertimientos, ya que pasa de que a lo largo de la red principal se presente un caudal disponible de rango bajo (naranjado) en la parte media y alta de La Santa Elena, a un caudal disponible de rango alto (color azul) en las mismas zonas en el escenario actual con vertimientos, como resultado en el IUA del escenario actual con vertimientos, donde se observa un cambio significativo en el drenaje principal

pasando de una categoría Critico en escenario sin vertimientos base a Muy Alta en el escenario con vertimientos, y también se refleja una disminución de la categoría en los drenajes tributarios, esto debido a que en la cuenca La Santa Elena la mayoría de las captaciones son para uso doméstico, lo que aporta mayor caudal de retorno, incrementando la oferta disponible superficial.

Figura 51
Resultados del IUA de la Microcuenca La Miel en los diferentes escenarios planteados

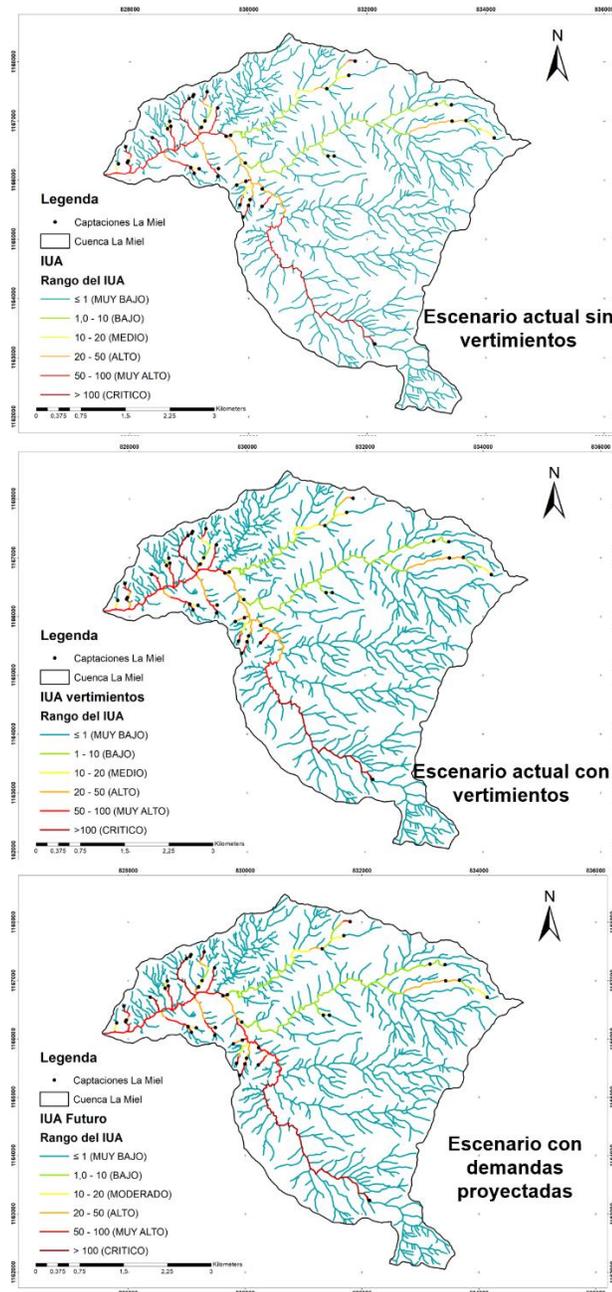
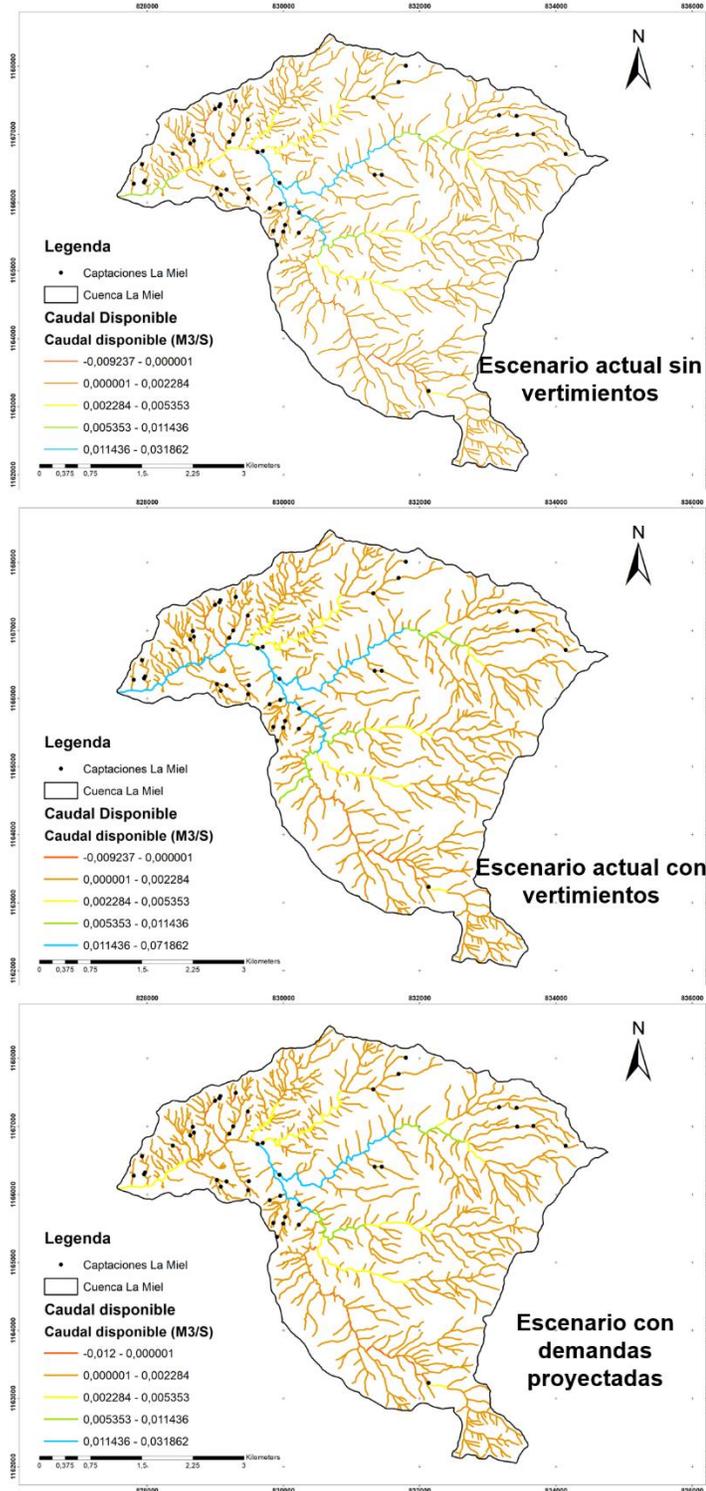


Figura 52
Resultados del caudal disponible de la Microcuenca La Miel en los diferentes escenarios planteados



Como se ve en el caudal disponible para los diferentes escenarios plasmado en la *Figura 52* en cuenca La Miel en el escenario actual sin vertimientos, el caudal disponible al final de la cuenca es de un rango medio alto (color verde), sin embargo, en la zona media se ve que se tiene un rango alto (color azul), esto gracias a la gran cantidad de drenajes que confluyen al drenaje principal, y que la mayoría de captaciones se concentran en las partes baja y media de La Miel lo que también explica la disminución de caudal disponible, y teniendo en cuenta los resultados del IUA de cuenca La Miel mostrados en la *Figura 51*, para este escenario base, se ve que en la parte alta de la cuenca, donde uno de los prestadores de servicio de acueducto capta, la presión de la demanda supera las condiciones de la oferta superficial disponible, sin embargo, a lo largo del drenaje principal esta situación se va atenuando pasando a una categoría de IUA Alta, que posteriormente se incrementa a Muy Alta, gracias a que en la parte media de la cuenca esta la mayor densidad de captaciones y que en la zona donde cambia de categoría, se encuentra una de las captaciones más altas que abastece el uso industrial.

Por otro lado, en el escenario con demanda proyectada sin vertimientos en la cuenca La Miel el caudal disponible al final de la cuenca es de un rango medio (color amarillo), bajando el caudal disponible con respecto al escenario actual sin vertimientos, este cambio en el caudal disponible, se ve más reflejado en la zona baja y media de la cuenca La Miel, ya que es donde hay mayor densidad de captaciones y es donde más afecta el incremento del caudal por la demanda proyectada, no obstante, el IUA de La Miel para el escenario con demanda proyectada sin vertimientos no presenta un cambio significativo en esta zona con respecto al escenario actual sin vertimientos, pero sí presenta un cambio significativo en la zona media y media-alta de la zona, ya que pasa de una categoría IUA Muy Alta y Alta, a Crítico y Muy alta, esto debido a que en la parte alta de la cuenca se capta agua por un prestador de servicio de acueducto para abastecer el uso doméstico de la población de la zona, esto evidencia que la quebrada La Miel es muy susceptible a la demanda proyectada planteada, mostrando un aumento en la presión por la demanda con respecto a la oferta superficial disponible.

En el escenario actual con vertimientos de la cuenca La Miel, el caudal disponible también aumenta significativamente en el drenaje principal con respecto al escenario actual sin vertimientos, pasando de unos rangos medio (amarillo), y medio alto (verde) a un rango alto (color

azul) en el escenario actual con vertimientos, sin embargo, el IUA del escenario actual sin vertimientos de la cuenca La Miel no se ve cambios significativos con respecto al escenario futuro, solo pequeñas variaciones en partes parciales de algunos drenajes, esto es debido a que el caudal captado en su mayoría es destinado a uso industrial, por lo que no se toma como retorno a la zona, entonces no hay un aumento considerable en la oferta superficial disponible.

Se ve que en todas las cuencas y escenarios planteado los caudales disponibles en la zona donde nace el agua son de un valor de rango bajo (Color naranjado), sin embargo, en la mayoría de estas microcuencas, no se presentaban captaciones por estas zonas, esto se vio reflejado en el IUA, donde tenía una categoría de presión Muy Baja, lo que indica que en estas zonas cercanas a los florecimientos de agua la presión de la demanda no es significativa respecto a la oferta superficial disponible.

6 Conclusiones

Es importante tener una información actualizada y de calidad de la región de estudio, esto permite que los resultados de los modelos sean más confiables. A esto, hay que sumarle que es necesario ser cuidadoso con las situaciones planteadas a modelar, si bien el retorno del caudal captado para uso doméstico puede ser tomado como caudal disponible en términos de cantidad, es de recalcar que se necesita un análisis más profundo con respecto a este tipo de consideraciones, en donde se tenga en cuenta las condiciones de la calidad del agua vertida y para que se puede utilizar este tipo de ARD o ARnD, para así ser más concienzudos a la hora de considerar los vertimientos como caudal disponible en términos de cantidad.

También, es de recalcar, que los mapas didácticos como se vio en los resultados, facilitan la interpretación y el análisis del caudal disponible a lo largo de una cuenca. Esto es de suma importancia a la hora de socializar y/o exponer el estado o estados hipotéticos de un cuerpo de agua con los actores relacionados con este. Ya que facilita y democratiza la información y conocimiento sobre la cuenca, ayudando a la participación conjunta de los diferentes actores en la gestión de los cuerpos de agua. Además, es importante contrastar los resultados de disponibilidad hídrica con un Índice como el IUA, para tener una mejor referencia de la situación de la cuenca, y tomar decisiones más acertadas en la zona específica, por ejemplo, en la mayoría de zonas donde nace el agua se veía que el caudal disponible era de rango bajo (naranjado), sin embargo, no se presentaban muchas captaciones, por lo que tenían un nivel de presión por demanda muy bajo. Estas comparaciones son de importancia a la hora de considerar la protección de zonas priorizadas.

La aplicación de modelos de disponibilidad hídrica en microcuencas permite obtener material que da cuenta de la situación del recurso hídrico a lo largo de una cuenca, esto facilita el saber si se presenta déficit por la demanda de agua de forma puntual, adicionalmente, de plantear situaciones futuras y/o hipotéticas que ayudan la gobernanza del recurso hídrico. Sumado a esto y gracias a los modelos, y metodologías de cálculo de disponibilidad hídrica, en conjunto con herramientas SIG, simplifica el obtener resultados y escenarios en lugares específicos de la cuenca, ya sea editando o actualizando la información pertinente, lo que facilita a las personas y/o autoridades ambientales competentes en la zona, tomar decisiones más informada y puntuales con respecto a una zona en específico de la cuenca, ya sea con la disponibilidad hídrica en términos de cantidad y/o calidad del agua, u otros aspectos relacionados con la gestión del agua.

Referencias

- Área Metropolitana del Valle de Aburrá -AMVA. (s.f.). *AMVA - Quebradas Priorizadas*.
bit.ly/3wkc3xP
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá -AMVA. (2022). - *Informe del proyecto 8 "actualización y registro de usuarios del recurso hidrico" del PORH Aburra-Medellín*.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGRAW-HILL.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística -DANE. (2020). *Contrato interadministrativo No. 4600085225 de 2020, Dane - Municipio de Medellín, Base de proyección Censo 2018*. <http://bit.ly/3D1nApj>
- ESRI. (2016). *ArcGIS-ModelBuilder*. Obtenido de ArcGIS-ModelBuilder:
<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/analyze/modelbuilder/what-is-modelbuilder.htm>
- ESRI. (2016). *Shapefiles*.<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/shapefiles/what-is-a-shapefile.htm>
- ESRI. (2020). *Documentation*. <https://desktop.arcgis.com/es/documentation/>
- ESRI. (2021). *Raster*. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>
- ESRI. (s.f.). *Explorar modelos digitales de elevación*. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/exploring-digital-elevation-models.htm>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. (2017). *GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL*.
https://acmineria.com.co/acm/wp-content/uploads/normativas/guia_ca_version_cp.pdf
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. (2018). *Estudio Nacional del Agua-ENA*. Bogota D.C.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. (2020). *Hoja metodológica de la Demanda Hídrica de las actividades socioeconómicas y los ecosistemas*.
<https://bit.ly/3ZRyTu4>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. (2020). *Hoja metodológica del Índice de Retención y Regulación Hídrica*. <https://bit.ly/3ZMrgVV>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. (2020). *Hoja metodológica del Índice de Uso del Agua (Versión 1,2)*. 19 p

Colombia. Ministerio De Ambiente y Desarrollo Sostenible (2004). *Resolución 865 de 2004 (4 de agosto): Por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones.*

https://www.corpamag.gov.co/archivos/normatividad/Resolucion865_20040722.htm

Colombia. Ministerio De Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (2010) . (25 de Octubre de 2010). *Decreto 3930 de 2010 (25 de octubre): Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI- Parte III-Libro II del Decreto – Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.* Decreto 3930. <https://www.suin-juricol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Decretos/1878873#:~:text=Fija%20las%20zonas%2>

Colombia. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (8 de junio de 2017). *Resolución 0330 de 2017 (8 de junio): Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005 y 2320 de 2009.* Minvivienda

Qgis. (2020). *QGIS User Guide*. https://docs.qgis.org/3.10/en/docs/user_manual/index.html

Recalde Aza, Y. C. (2015). *Modelación cartográfica e hidrológica del área de influencia de la acequia Rosas Pamba, mediante el uso de sistemas de información geográfica*. [Tesis de. Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Red-Río. (2016). *Diagnostico hacia la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hidrico del Río Aburrá-Medellín*. <https://bit.ly/3wdAgpw>

Red-Río. (2016). *FASE DE PROSPECTIVA PLAN DE ORDENAMIENTO DEL RECURSO HÍDRICO DEL RÍO ABURRÁ – MEDELLÍN*. <https://bit.ly/3wdAgpw>

Red-Río. (2016). *Manual de Usuarios del Modulo de Disponibilidad Hidrica*.

Red-Río, & UdeA. (2018). *Actualización e implementación del registro de usuarios del recurso hídrico de la cuenca.* .

Red-Río, & UdeA. (2018). *Informe compendio del PORH*. <https://bit.ly/3HeX8uZ>

Universidad Nacional de Colombia -UNAL (2014). [www.minas.medellin.unal.edu.co.
bit.ly/3VQg6fm](http://www.minas.medellin.unal.edu.co/bit.ly/3VQg6fm)

Universidad Nacional De Colombia-UNAL, Universidad Pontificia Bolivariana -UPB, Universidad de Medellín -UDEM, & Área Metroponitana del Valle de AburraAMVA. (2004). *Diseño y puesta en marcha de la Red de Monitoreo Ambiental en la Cuenca Hidrográfica del Río Medellín en jurisdicción del Área Metropolitana.*

Valencia Tobón, C. M. (2015). *Didactización de los resultados generados por un modelo de disponibilidad hídrica para fortalecer la gobernanza del agua en una microcuenca* [Trabajo de Grado, Universidad de Antioquia Sede Medellín].

Vélez, J. I. (2001). *Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de las crecidas* [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia España]. *Universidad Politécnica de València.*

Vélez, M., Restrepo Tamayo, C., & Sánchez Molina, J. (2008). Reglamentación del uso de las aguas superficiales de una cuenca con información escasa. *Escuela de Geociencias y Medio Ambiente.*

Anexos

Anexos 1

Tabla de captaciones de las tres microcuencas con usos de agua y caudal captado

Usuario		Usos Del Agua								Coordenadas (Magna Colombia Bogotá)	
ID	Caudal Captado	Acuícola	Agrícola	Domestic	Industria	Pecuaria	Preservación	Recreativo	Estético	X	Y
Cuenca Santa Elena											
0	0,024652	0	0	0,016203	0	0,008449	0	0	0	843956	1176803
1	0,055	0	0,055	0	0	0	0	0	0	843851	1178011
2	0,0662	0	0,05	0,0162	0	0	0	0	0	843801	1178773
3	0,5047	0	0	0,0232	0	0,4815	0	0	0	841716	1176866
4	0,1097	0	0,07	0,0397	0	0	0	0	0	841132	1180962
5	40,009	0	0	40,0009	0	0	0	0	0	840906	1180435
6	0,729166	0	0	0,729166	0	0	0	0	0	839982	1180482
7	0,581017	0	0	0,497684	0	0,083333	0	0	0	839835	1182252
8	0,0226	0	0,011	0,0116	0	0	0	0	0	838746	1182426
9	0,142018	0	0,061	0,081018	0	0	0	0	0	836802	1180202
10	1,985	0	0	1,985	0	0	0	0	0	836481	1183640
11	0,070891	0	0	0,070891	0	0	0	0	0	843723	1177900
12	5,46875	0	0	5,46875	0	0	0	0	0	838871	1180860
13	3,443287	0	0	3,443287	0	0	0	0	0	839891	1183560
14	0,405093	0	0	0,405093	0	0	0	0	0	839891	1183560
15	0,243056	0	0	0,243056	0	0	0	0	0	839891	1183560
16	14,8634	0	0	14,8634	0	0	0	0	0	842776	1178010

Análisis de la oferta y demanda usando índices hídricos en las microcuencas: La Santa Elena; La Miel y La López, pertenecientes a la cuenca del río Aburra-Medellín.

Usuario		Usos Del Agua								Coordenadas (Magna Colombia Bogotá)	
ID	Caudal Captado	Acuícola	Agrícola	Domestic	Industria	Pecuari	Preservación	Recreativ	Estétic	X	Y
17	2,417	0	0	2,417	0	0	0	0	0	842227	1180580
18	17,1415	0	0	17,1415	0	0	0	0	0	842204	1179630
19	2,6027	0	0	2,6027	0	0	0	0	0	839828	1183430
20	1,7925	0	0	1,7925	0	0	0	0	0	840291	1183170
21	0,02	0	0,02	0	0	0	0	0	0	843700	1177920
22	0,2	0	0,2	0	0	0	0	0	0	842431	1178840
23	0,0084	0	0	0	0	0,0084	0	0	0	841847	1178190
24	0,0084	0	0	0	0	0,0084	0	0	0	841960	1178060
25	0,0127	0	0	0	0	0,0127	0	0	0	841832	1177800
26	1,347	0	1,22	0	0	0,127	0	0	0	841305	1177600
27	1	0	1	0	0	0	0	0	0	842190	1177900
28	0,3472	0	0,22	0	0	0,1272	0	0	0	842409	1178010
29	1,0627	0	0,05	1,0127	0	0	0	0	0	840029	1180110
30	2,7128	0	0,025	2,6878	0	0	0	0	0	840029	1180110
31	0,4551	0	0	0,434	0	0,0211	0	0	0	838843	1180030
32	0,053239	0	0	0,053239	0	0	0	0	0	840683	1180490
33	1,252656	0	1,2	0,052656	0	0	0	0	0	843920	1177570
34	0,212	0	0,0868	0,0951	0	0,0301	0	0	0	840590	1177850
35	0,024952	0	0,015	0,009952	0	0	0	0	0	840338	1177320
36	0,011	0	0,011	0	0	0	0	0	0	840141	1181000
37	0,01	0	0,01	0	0	0	0	0	0	843946	1177980
38	0,006076	0	0	0,006076	0	0	0	0	0	840772	1178820
39	0,065068	0	0,06	0,005068	0	0	0	0	0	842250	1177470
40	0,010531	0	0	0,010531	0	0	0	0	0	840030	1177760
41	0,00405	0	0	0,00405	0	0	0	0	0	839621	1177700
42	0,074679	0	0,066	0,008679	0	0	0	0	0	841200	1177340

Análisis de la oferta y demanda usando índices hídricos en las microcuencas: La Santa Elena; La Miel y La López, pertenecientes a la cuenca del río Aburra-Medellín.

Usuario		Usos Del Agua								Coordenadas (Magna Colombia Bogotá)	
ID	Caudal Captado	Acuícola	Agrícola	Domestic	Industria	Pecuario	Preservación	Recreativo	Estético	X	Y
43	0,111325	0	0,099	0,008101	0	0,004224	0	0	0	840432	1178820
44	0,240671	0,2	0	0,040509	0	0,000162	0	0	0	837328	1180540
45	0,009767	0,001666	0	0	0	0,008101	0	0	0	844057	1177590
46	0,02	0	0,02	0	0	0	0	0	0	843338	1180540
47	0,012152	0	0	0,012152	0	0	0	0	0	841391	1181960
48	0,070636	0	0,02	0,010127	0	0,040509	0	0	0	840739	1181010
49	0,168239	0	0,09	0	0	0,078239	0	0	0	841305	1181950
50	0,036111	0	0	0	0	0,036111	0	0	0	840837	1180990
51	0,033	0	0,033	0	0	0	0	0	0	843205	1180580
52	0,0101	0	0	0,0101	0	0	0	0	0	842852	1179220
53	0,004629	0	0	0,004629	0	0	0	0	0	842838	1178990
54	0,09517	0	0,07414	0	0	0,02103	0	0	0	842485	1181410
55	0,0119	0	0,003	0,0089	0	0	0	0	0	840215	1178170
56	0,0466	0	0	0,0466	0	0	0	0	0	837732	1179780
57	0,0066	0	0,0066	0	0	0	0	0	0	842616	1179270
58	0,008	0	0	0,008	0	0	0	0	0	840085	1177710
59	0,0691	0	0,05	0,0174	0	0,0017	0	0	0	841126	1177050
60	0,165	0	0,165	0	0	0	0	0	0	842805	1180470
61	0,1097	0	0,1056	0,0041	0	0	0	0	0	842025	1177600
62	0,012	0	0,012	0	0	0	0	0	0	843936	1177200

Análisis de la oferta y demanda usando índices hídricos en las microcuencas: La Santa Elena; La Miel y La López, pertenecientes a la cuenca del río Aburra-Medellín.

Usuario		Usos Del Agua								Coordenadas (Magna Colombia Bogotá)	
ID	Caudal Captado	Acuícola	Agrícola	Domestic	Industria	Pecuari	Preservaci	Recreativ	Estétic	X	Y
63	0,0041	0	0	0,0041	0	0	0	0	0	840861	1177450
64	0,0388	0	0,0268	0,012	0	0	0	0	0	843954	1177200
65	0,0111	0	0,005	0,0061	0	0	0	0	0	840071	1177660
66	0,1851	0,155	0,03	0	0	0,0001	0	0	0	843812	1178070
67	0,0421	0	0,001	0,0411	0	0	0	0	0	840876	1182860
68	0,0066	0,0004	0	0,0061	0	0,0001	0	0	0	840441	1181290
69	0,002	0	0,002	0	0	0	0	0	0	842175	1177540
70	0,0203	0	0	0,0203	0	0	0	0	0	838838	1180000
71	0,332	0	0,33	0	0	0,02	0	0	0	843856	1178020
72	0,2395	0	0,2	0,0142	0	0,0253	0	0	0	842823	1177310
73	0,09	0	0,09	0	0	0	0	0	0	840216	1177420
74	0,1177	0	0,0303	0,079	0	0,0084	0	0	0	844089	1177100
75	0,005	0	0,005	0	0	0	0	0	0	840140	1178130
76	0,0113	0	0,0006	0,0107	0	0	0	0	0	840325	1177940
77	0,3339	0	0,305	0,0041	0	0,0248	0	0	0	843233	1178980
78	0,0378	0	0,03	0,0061	0	0,0017	0	0	0	842123	1177840
79	0,028	0	0,02	0,008	0	0	0	0	0	841835	1176770
80	0,01	0	0,01	0	0	0	0	0	0	843331	1176690
81	0,2617	0,0317	0,2085	0	0	0,0215	0	0	0	840704	1180300
82	0,001	0	0,001	0	0	0	0	0	0	840740	1180360
83	0,0213	0	0,003	0,0183	0	0	0	0	0	842855	1179290
84	0,025	0	0,025	0	0	0	0	0	0	843704	1177920
85	0,1501	0,0667	0,08	0	0	0,0034	0	0	0	843397	1180550
Tota		0,45546	6,5123	96,62941		1,20355					
l	104,790881	6	4	7	0	8	0	0	0		

Cuenca La Miel

Análisis de la oferta y demanda usando índices hídricos en las microcuencas: La Santa Elena; La Miel y La López, pertenecientes a la cuenca del río Aburra-Medellín.

Usuario		Usos Del Agua								Coordenadas (Magna Colombia Bogotá)	
ID	Caudal Captado	Acuícola	Agrícola	Domestic	Industrial	Pecuario	Preservación	Recreativo	Estético	X	Y
0	0,3329	0	0	0,3329	0	0	0	0	0	833662	1167013
1	0,3	0	0	0	0,3	0	0	0	0	829260	1166870
2	12,096988	0	0	0,295138	11,458333	0,343517	0	0	0	829705	1166750
3	25	0	0	0,463	24,4444	0,0926	0	0	0	829617	1166740
4	0,14404	0	0	0,01884	0	0,1252	0	0	0	829072	1166110
5	0,005787	0	0	0,005787	0	0	0	0	0	827951	1166297
6	11,7233	0	0	11,7233	0	0	0	0	0	832132	1163230
7	1,417824	0	0	1,417824	0	0	0	0	0	828994	1167380
8	0,006077	0	0	0,006077	0	0	0	0	0	830027	1165670
9	0,30608	0	0,3	0,006077	0	0	0	0	0	829841	1165600
10	0,010127	0	0	0,010127	0	0	0	0	0	829983	1165580
11	0,040485	0	0,025	0,012013	0	0,003472	0	0	0	834147	1166720
12	0,068031	0	0,05	0,012013	0	0,006018	0	0	0	827924	1166560
13	0,0617	0	0,05	0,0117	0	0	0	0	0	829888	1165390
14	0,0239	0	0	0,0239	0	0	0	0	0	829795	1165920
15	0,11	0	0	0,11	0	0	0	0	0	830173	1165820
16	0,112	0	0	0,112	0	0	0	0	0	827951	1166300
17	0,0456	0	0	0,0456	0	0	0	0	0	827900	1166350
18	0,087	0	0,059	0,028	0	0	0	0	0	829083	1167440
19	0,0336	0	0	0,0333	0	0,0003	0	0	0	829073	1167400
20	0,048	0	0	0,048	0	0	0	0	0	833440	1167020
21	0,19	0	0,032	0,0585	0	0,0995	0	0	0	828697	1166920
22	0,0618	0	0	0,0118	0	0,05	0	0	0	829264	1167000

Análisis de la oferta y demanda usando índices hídricos en las microcuencas: La Santa Elena; La Miel y La López, pertenecientes a la cuenca del río Aburra-Medellín.

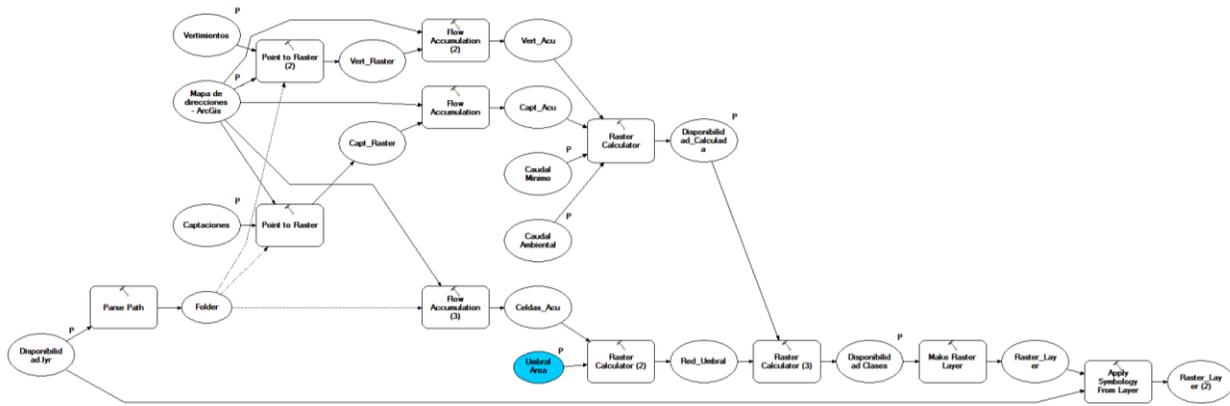
Usuario		Usos Del Agua								Coordenadas (Magna Colombia Bogotá)	
ID	Caudal Captado	Acuícola	Agrícola	Domestic	Industrial	Pecuario	Preservación	Recreativo	Estético	X	Y
23	0,0097	0	0	0,0097	0	0	0	0	0	829500	1166190
24	0,2235	0	0	0,0302	0	0,1933	0	0	0	831315	1167540
25	0,0513	0	0,0005	0,008	0	0,0428	0	0	0	828637	1166870
26	0,0296	0,0167	0	0,0117	0	0,0012	0	0	0	829964	1165950
27	0,0076	0	0,003	0	0	0,0046	0	0	0	828710	1166990
28	0,1741	0	0	0,1741	0	0	0	0	0	827951	1166300
29	0,0155	0	0	0,012	0	0,0035	0	0	0	829958	1166320
30	0,03	0	0,03	0	0	0	0	0	0	829500	1166190
31	0,0146	0	0	0,0146	0	0	0	0	0	827819	1166270
32	0,1164	0	0	0,008	0	0,1084	0	0	0	829478	1167220
33	0,0589	0,0083	0,05	0,0006	0	0	0	0	0	830207	1165580
34	0,1602	0	0	0,1602	0	0	0	0	0	828378	1166720
35	0,0617	0	0,033	0,016	0	0,0127	0	0	0	831691	1167770
36	0,1376	0	0,1376	0	0	0	0	0	0	829487	1166060
37	0,0146	0	0	0,0146	0	0	0	0	0	831453	1166430
38	0,01	0	0	0,01	0	0	0	0	0	833171	1167240
39	0,0226	0	0,0019	0,0148	0	0,0059	0	0	0	831878	1168140
40	0,1604	0	0	0,0086	0	0,1518	0	0	0	829022	1166210
41	0,0129	0	0,011	0	0	0,0019	0	0	0	829164	1166180
42	0,0431	0	0	0,0431	0	0	0	0	0	829320	1167480
43	0,015	0	0	0,012	0	0,003	0	0	0	833413	1167280
44	0,0077	0	0	0,0077	0	0	0	0	0	831340	1166400
Total	53,602239	0,025	0,783	15,341796	36,202733	1,249707	0	0	0		
Cuenca La López											
0	0,8151	0	0	0,8151	0	0	0	0	0	862731	1202001

Análisis de la oferta y demanda usando índices hídricos en las microcuencas: La Santa Elena; La Miel y La López, pertenecientes a la cuenca del río Aburra-Medellín.

Usuario		Usos Del Agua								Coordenadas (Magna Colombia Bogotá)	
ID	Caudal Captado	Acuícola	Agrícola	Domestic	Industria	Pecuaria	Preservación	Recreativa	Estética	X	Y
1	0,6283	0	0	0,6283	0	0	0	0	0	862057	1201920
2	0,5	0	0	0,5	0	0	0	0	0	861613	1202250
3	2	0	0	2	0	0	0	0	0	861644	1201880
4	0,016204	0	0	0,016204	0	0	0	0	0	861611	1201770
5	0,016204	0	0	0,016204	0	0	0	0	0	862033	1201760
6	0,020255	0	0	0,020255	0	0	0	0	0	861507	1202400
7	25	0	0	25	0	0	0	0	0	861967	1202920
8	0,0061	0	0	0,0061	0	0	0	0	0	861635	1202910
9	0,0174	0	0,0058	0,0116	0	0	0	0	0	861217	1202880
10	0,0189	0	0	0,0155	0	0,0034	0	0	0	861596	1203010
11	0,0163	0	0,008	0,0081	0	0,0002	0	0	0	861615	1202820
12	0,0137	0	0	0,0137	0	0	0	0	0	861166	1203020
13	0,01	0	0	0,01	0	0	0	0	0	862650	1201750
Total	29,078463	0	0,0138	29,061063	0	0,0036	0	0	0		

Anexos 2

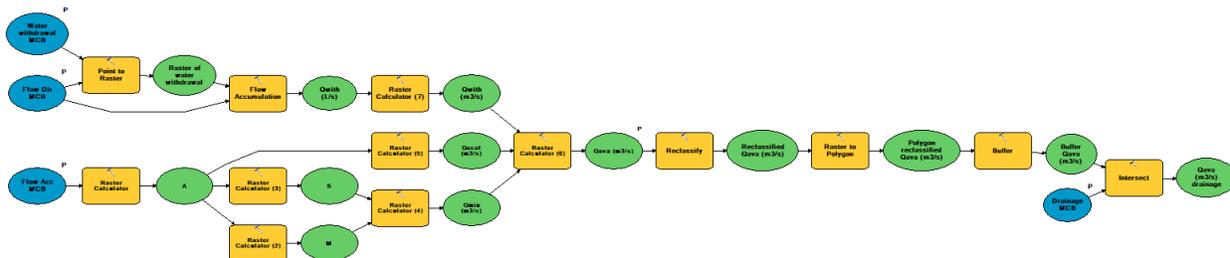
Módulo de disponibilidad hídrica propuesto por Red-Rio



Fuente. (Red-Rio, 2016)

Anexos 3

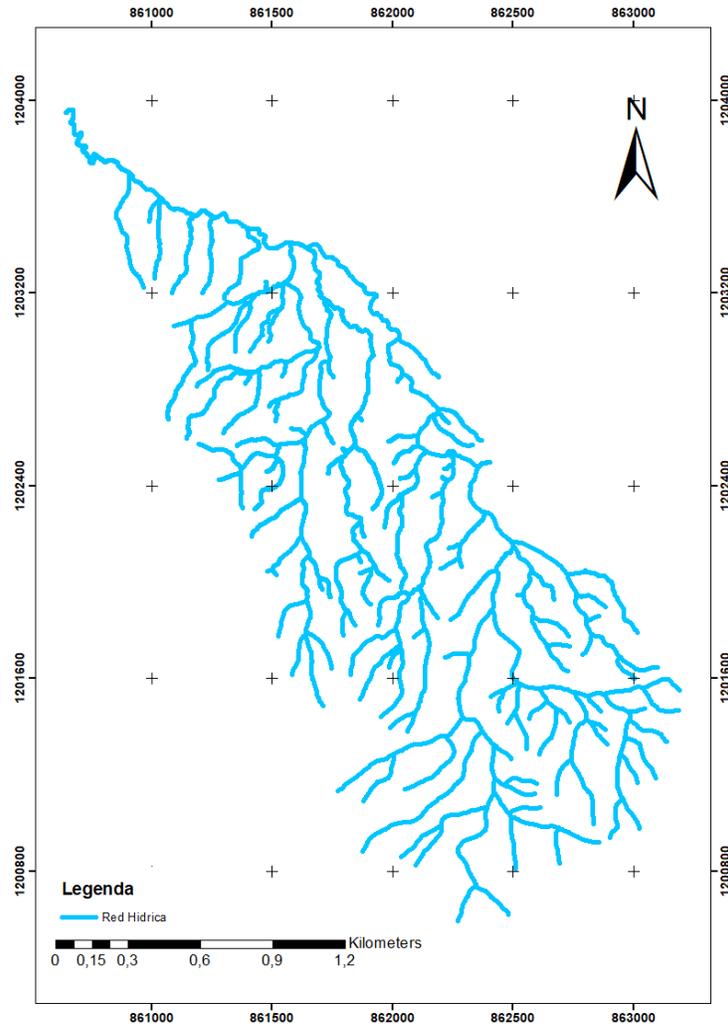
Módulo de disponibilidad hídrica propuesto por Tobón (2015)



Fuente. (Tobón, 2015)

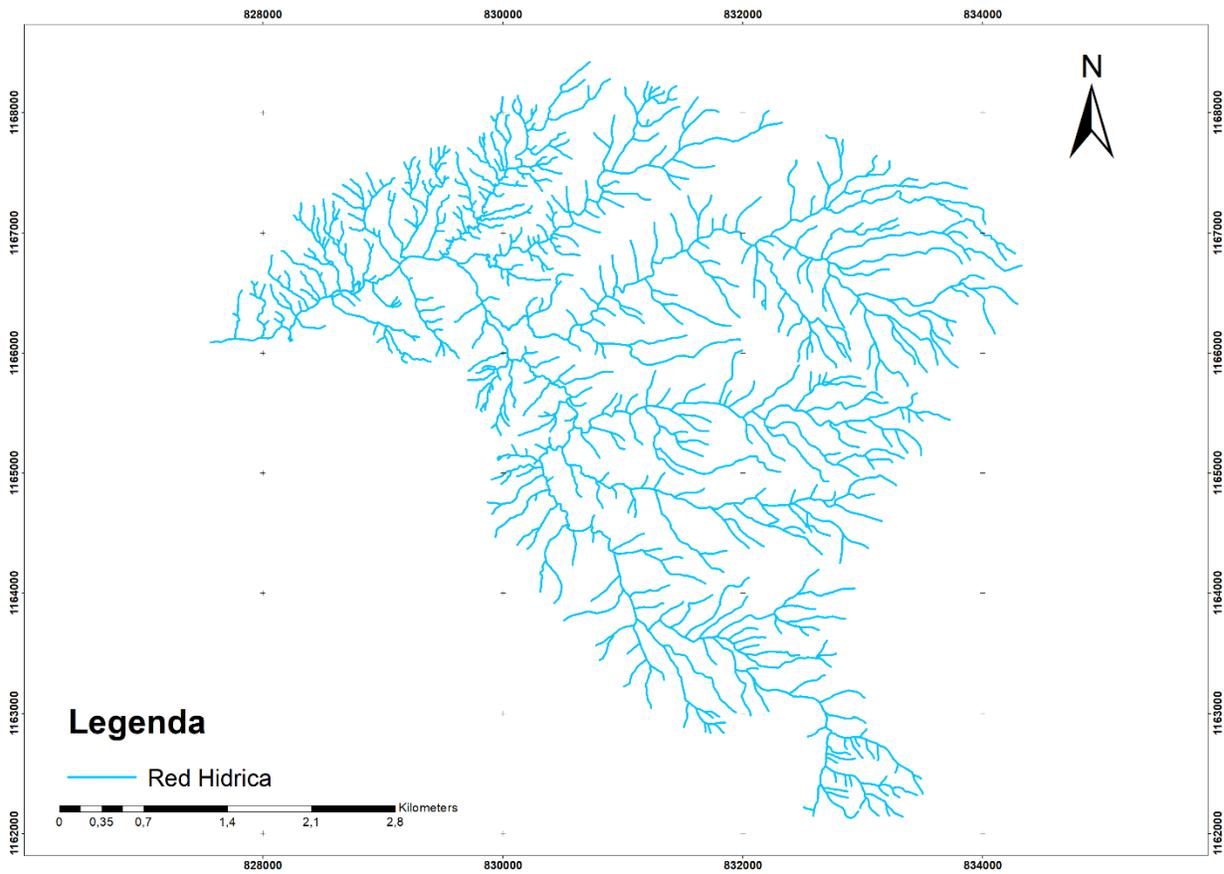
Anexos 4

Red Hídrica de la Cuenca La López



Anexos 5

Red Hídrica de la Cuenca La Miel



Anexos 6

Red Hidrica de la Cuenca La Santa Elena

