

Determinación de oferta hídrica de la cuenca Río Lebrija para el abastecimiento de agua para actividades de extracción de hidrocarburos mediante la técnica de fracturamiento hidráulico en el municipio de San Martín, Cesar.

Diana Carolina Martínez Rodríguez

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Mayo de 2019

Determinación de oferta hídrica de la cuenca Río Lebrija para el abastecimiento de agua para actividades de extracción de hidrocarburos mediante la técnica de fracturamiento hidráulico en el municipio de San Martín, Cesar.

Diana Carolina Martínez Rodríguez

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniera Ambiental

Director:
Ricardo Antonio Tobón Rojas

Línea de Investigación:
Manejo integrado del recurso hídrico

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
2019

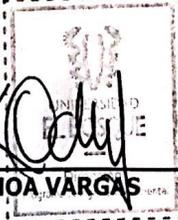
SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

ACTA No: 1032

El día **10 MAYO 2019**, en las instalaciones de la Universidad El Bosque, se desarrolló la sustentación del trabajo de grado titulado **DETERMINACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA DE LA CUENCA RÍO LEBRIJA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA ACTIVIDADES DE EXTRACCIÓN DE HIDROCARBUROS MEDIANTE LA TÉCNICA DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO EN EL MUNICIPIO DE SAN MARTÍN, CESAR.**, escrito por **DIANA CAROLINA MARTÍNEZ RODRÍGUEZ, CÉDULA 1020817787**, bajo la dirección de **RICARDO ANTONIO TOBÓN ROJAS, CÉDULA 16076449**, como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental. El trabajo fue evaluado por los jurados **MARIO OPAZO GUTIERREZ CÉDULA CE211536** y **EDGAR EDUARDO LADINO MORENO CÉDULA 79662344**, quienes deliberaron y concluyeron que cumple con los criterios de calidad.

Por lo tanto, el trabajo es: **Aprobado.**

En constancia, se firma en Bogotá, D.C.



KENNETH OCHOA VARGAS
Director
Programa de Ingeniería Ambiental



GERMÁN AGUDELO ASCENCIO
Secretario Académico
Facultad de Ingeniería

UNIVERSIDAD
EL BOSQUE
SECRETARÍA ACADÉMICA
Facultad de Ingeniería

Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velara por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

Dedicatoria

Dedicado en memoria de Susanne Cohrs de Rodriguez.

Dedicado a mis papás y mis hermanos.

Si quieres llegar rápido ve solo, si quieres llegar lejos ve acompañado. - Proverbio africano

Agradecimientos

Agradezco inmensamente al profesor Ricardo Tobón por su inmenso interés, ayuda y apoyo en este proyecto desde el comienzo y por no fallarme nunca, gracias por ser tan buen director.

Agradezco mucho al profesor Jonathan Romero por su colaboración en el desarrollo del modelo hidrológico, fue de gran ayuda y apoyo en este proceso, infinitas gracias.

Agradezco a Laura Albarracin, Juanita Gil y Hector Garcia de la empresa ConocoPhillips por su inmensa colaboración y atención.

Agradezco mucho a mis papás y a mis hermanos, por apoyarme tanto desde el comienzo hasta el final.

Agradezco a todos aquellos amigos que no me juzgaron, que me animaron con este tema a desde el comienzo, que como en todo siempre me apoyaron y que cuando lo necesite estuvieron ahí no me dejaron rendirme por más que muchos me juzgaran y me animaron a seguir adelante.

“Si no tienes el valor de soñar, no tienes el derecho de quebrar ni criticar ambiciones ajenas.”- Hayao Miyazaki

TABLA DE CONTENIDO

1.	RESUMEN	3
2.	INTRODUCCIÓN	4
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
3.1.	DELIMITACIÓN	6
3.2.	FORMULACIÓN.....	6
3.3.	PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	6
4.	JUSTIFICACIÓN.....	6
5.	OBJETIVOS	8
5.1.	OBJETIVO GENERAL.....	8
5.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
6.	MARCO DE REFERENCIA.....	9
6.1.	ESTADO DEL ARTE	9
6.1.	MARCO TEÓRICO	11
6.1.1.	<i>Importancia del Petróleo</i>	<i>11</i>
6.1.2.	<i>¿Qué es el fracturamiento hidráulico?.....</i>	<i>11</i>
6.1.3.	<i>Formación La Luna.....</i>	<i>12</i>
6.1.4.	<i>Explotación de hidrocarburos proyecto plata municipio de San Martín, Cesar</i>	<i>13</i>
6.1.5.	<i>Alta demanda de agua para el fracturamiento hidráulico</i>	<i>13</i>
6.1.6.	<i>Importancia del recurso hídrico</i>	<i>13</i>
6.1.7.	<i>Caracterización del recurso hídrico (oferta y demanda).....</i>	<i>14</i>
6.2.	MARCO CONCEPTUAL	14
6.2.1.	<i>Conceptos de fracturamiento hidráulico</i>	<i>14</i>
6.2.2.	<i>Conceptos caracterización morfológica de la cuenca</i>	<i>16</i>
6.2.3.	<i>Conceptos hidrológicos.....</i>	<i>18</i>
6.3.	MARCO NORMATIVO.....	20
6.4.	MARCO GEOGRÁFICO	22
6.5.	MARCO INSTITUCIONAL	26
7.	METODOLOGÍA.....	26
7.1.	ENFOQUE	26
7.2.	ALCANCE	27
7.3.	MÉTODO(S)	27
7.3.1.	<i>Método para objetivo 1 Definir la cuenca del río Lebrija, su ubicación y sus características morfológicas.....</i>	<i>27</i>
7.3.2.	<i>Método para objetivo 2: Determinar la oferta hídrica de la cuenca del río Lebrija a partir del modelo Lluvia – caudal de Soil conservation Services (SCS).</i>	<i>28</i>
7.3.3.	<i>Determinar si el caudal disponible de la cuenca del Río Lebrija es óptimo para la demanda hídrica de las actividades de fracturamiento hidráulico en el municipio de San Martín cesar, sin afectar el caudal ambiental de la cuenca.</i>	<i>34</i>
7.4.	TÉCNICAS UTILIZADAS	34
7.5.	INSTRUMENTOS.....	34
8.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	35
8.1.	OBJETIVO 1: DEFINIR LA CUENCA DEL RÍO LEBRIJA, SU UBICACIÓN Y SUS CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS.	35
8.1.1.	<i>Análisis y discusión de resultados objetivo 1</i>	<i>37</i>
8.2.	OBJETIVO 2: DETERMINAR LA OFERTA HÍDRICA DE LA CUENCA DEL RÍO LEBRIJA A PARTIR DEL MODELO LLUVIA – CAUDAL DE SOIL CONSERVATION SERVICES.	38
8.2.2.	<i>Análisis y discusión resultados uso de suelo</i>	<i>42</i>
8.2.3.	<i>Análisis resultados Oferta Hídrica.....</i>	<i>70</i>

8.3.	OBJETIVO 3: DETERMINAR SI EL CAUDAL DISPONIBLE DEL CAÑO ICACAL (BIFURCACIÓN DEL RÍO LEBRIJA) ES ÓPTIMO PARA LA DEMANDA HÍDRICA DE LAS ACTIVIDADES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO EN EL MUNICIPIO DE SAN MARTÍN CESAR, SIN AFECTAR EL CAUDAL AMBIENTAL DE LA CUENCA.....	70
8.3.1.	<i>Análisis de curva de duración de caudales y determinación de caudal ambiental</i>	74
8.3.2.	<i>Relación oferta hídrica/ demanda hídrica para fracturamiento hidráulico</i>	75
9.	CONCLUSIONES	79
10.	RECOMENDACIONES	79
11.	BIBLIOGRAFÍA	81

1. RESUMEN

Este documento de investigación evoca los aspectos sobre la explotación de hidrocarburos mediante la técnica de fracturamiento hidráulico en Colombia, en cuanto a implicaciones ambientales a considerar y cómo esta técnica puede afectar el recurso hídrico, específicamente el caudal del río de donde se captará el agua necesaria para las actividades.

El área de estudio se remite a la cuenca del Río Lebrija. Para determinar la oferta hídrica, el caudal disponible y caudal ambiental de la cuenca, se utilizó el modelo hidrológico del *Soil Conservation Services*. A partir de la curva de duración de caudales se definió la capacidad de abastecimiento de agua para las actividades de fracturamiento hidráulico en el municipio de San Martín, Cesar, el cual se encuentra al norte de la cuenca del Río Lebrija.

Se estableció que el caudal de la cuenca del Río Lebrija puede abastecer las actividades de fracturamiento hidráulico sin afectar el caudal ambiental del río, se observó también que la temporada más apropiada para la captación de aguas se ubica entre abril y octubre.

Palabras clave: fracturamiento hidráulico, yacimientos no convencionales, método lluvia-caudal, oferta hídrica, curva de duración de caudales, caudal ambiental.

Abstract:

This research paper evokes aspects of hydrocarbon exploitation through the hydraulic fracturing technique in Colombia, in terms of environmental implications to consider and how this technique can affect the water resources, specifically the flow of the river from where the water needed for the activities will be extracted.

The study area is referred to the Lebrija River basin. The hydrological model of the *Soil Conservation Services* and the water supply of the Lebrija River basin were used to determine the available flow and environmental flow of the basin. From the flow duration curve, the water supply capacity was defined for hydraulic fracture activities in the municipality of San Martín, Cesar, which is at north of the Lebrija River basin.

It was established that the flow of the Lebrija River basin can supply the hydraulic fracture activities without affecting the environmental flow of the river, it was also noted that the most appropriate season for water collection is between April and October.

Keywords: hydraulic fracturing, unconventional deposits, rain-flow method, water supply, flow duration curve, environmental flow.

2. INTRODUCCIÓN

El uso de los hidrocarburos en el mundo es una realidad que debe buscar reducirse, en tanto que este genera diferentes impactos sobre el medio ambiente desde las actividades de exploración del mismo hasta su uso final. Sin embargo, los sistemas energéticos y económicos de Colombia actualmente dependen de este recurso y su eliminación se debe hacer progresivamente; considerando la importancia que el petróleo tiene para las actividades humanas, su eliminación tardará décadas en ocurrir. Por ahora el compromiso está en explotar este recurso de la manera más controlada y sostenible posible.

Actualmente, Colombia es un país que depende económicamente de la industria extractiva, específicamente de los hidrocarburos, pues las exportaciones petroleras representan un aporte de un 44% a la economía del país, siendo el sector económico más grande y representativo del mismo, seguido del sector cafetero el cual representa tan solo el 7% (Qué productos exporta Colombia: los índices Económicos del año 2016, 2016).

La explotación por fracturamiento hidráulico revolucionó la economía mundial desde el año 2012, cuando Estados Unidos empezó a realizar este tipo de prácticas, disminuyendo significativamente la cantidad de petróleo importado con proyecciones de su autosuficiencia en el sector (Mathes, 2014). En tan solo 5 años, de 2010 a 2015, la producción de hidrocarburos aumento en un 60% siendo este el mayor nivel de producción en 25 años. Además, esta técnica añade \$1.2 billones anuales al producto interno bruto de EEUU. (McMahon, 2017).

Esto evidencia la necesidad económica que tiene Colombia de adoptar la técnica de fracturamiento hidráulico. No obstante, el desarrollo de esta técnica ha presentado problemáticas ambientales en algunas zonas de Estados Unidos, especialmente sobre el recurso hídrico, puesto que para el desarrollo de esta técnica se requieren grandes volúmenes de agua (alrededor de 2 millones de galones) para la inyección en un solo pozo, por ello es esencial desarrollar diferentes estudios sobre el estado de este recurso y su capacidad para aprovechamiento (Boudet , y otros, 2013).

Es importante mencionar que los yacimientos convencionales en nuestro país se están agotando. Colombia no se debe limitar a dejar de extraer petróleo siendo tan importante para la economía y el desarrollo del país. Se hace necesario implementar nuevas técnicas para su extracción, como el fracturamiento hidráulico.

Cabe mencionar que esta tiene una baja aceptación frente a la sociedad pues en algunas zonas de Estados Unidos donde se ha realizado, se han presentado casos en los que la técnica ha afectado el recurso hídrico. Por otra parte, en Colombia se han llevado a cabo pocos estudios que permitan determinar las afectaciones al ambiente que puede generar este tipo de extracción bajo las condiciones del país, por ello es necesario realizar diferentes estudios ambientales que permitan definir si bajo las condiciones específicas del país es posible el desarrollo de esta técnica y de esta forma las autoridades correspondientes acepten o rechacen el desarrollo de la misma. (Boudet , y otros, 2013)

Actualmente en el país no se ha desarrollado ningún tipo de extracción petrolera por medio de fracturamiento hidráulico en yacimientos no convencionales, sin embargo, se ha establecido en el país normativas para el desarrollo de este, y la autoridad nacional de licencias ambientales (ANLA) ha establecido los términos de referencia para llevar a cabo estudios de impacto ambiental para extracción de petróleo por fracturamiento hidráulico en yacimientos no convencionales. Ante esta situación, aún se desconocen los posibles efectos que puede generar el fracturamiento hidráulico en Colombia.

La formación geológica La luna es la más apropiada en el país para desarrollar la explotación de yacimientos no convencionales de hidrocarburos dadas sus características, por ello diferentes organizaciones han planteado el desarrollo de fracturamiento hidráulico sobre esta

formación, que se encuentra bajo el valle medio del Magdalena. Una de las zonas escogidas para el desarrollo de esta técnica es el municipio de San Martín, Cesar pues es una de las más apropiadas a nivel geológico.

Actualmente se desconocen los efectos sobre el recurso hídrico que puede ocasionar el desarrollo de la técnica en esta zona, por ello el objetivo de este proyecto es determinar el estado actual del caudal del río Lebrija, donde se calcule la oferta hídrica de la cuenca, que determine la capacidad de abastecimiento del Caño Icacal (bifurcación del Lebrija) para la explotación de hidrocarburos mediante la técnica de fracturamiento hidráulico en la vereda pita Limón del municipio de San Martín, Cesar, sin afectar el caudal ambiental de la cuenca.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La explotación de hidrocarburos mediante la técnica de fracturamiento hidráulico es una práctica nueva que se ha venido desarrollando en países del primer mundo y que ha promovido el desarrollo económico de estos países. Sin embargo, también ha generado problemáticas ambientales, por ello en Colombia el desarrollo de esta práctica no está permitida, aunque su aprobación se encuentra en proceso. (Charry Ocampo & Anibal J., 2017)

Como todo proceso de extracción de materias primas, el fracturamiento hidráulico requiere una serie de estudios previos. En Colombia estos estudios están planteados en los términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental proyectos de explotación de hidrocarburos anexo 3 establecidos por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA en el cual se tienen en cuenta los factores bióticos y abióticos del ecosistema y los factores socioeconómicos de la zona. Aun así, estos son solo estudios requeridos para obtener la licencia ambiental de explotación y son realizados desde un ámbito legal más no académico. (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2014)

El desarrollo de la técnica de fracturamiento hidráulico en Colombia no se ha llevado a cabo debido a la carencia de estudios sobre los impactos ambientales que podrían generarse. El factor que más preocupa a los actores involucrados es el recurso hídrico, ya que en otras regiones del mundo donde se ha desarrollado esta técnica se han evidenciado problemáticas en relación a este, causados por el consumo de altos volúmenes de agua y mala disposición de aguas residuales. Esto ha originado desconfianza de parte de las comunidades hacia la actividad. (Boudet , y otros, 2013)

Lo que se busca con el presente estudio es determinar el estado actual del caudal disponible del caño Icacal, que hace parte de la cuenca del Río Lebrija, pues es este caudal el que la empresa ConocoPhillips propone en el EIA para el abastecimiento de sus actividades de fracturamiento hidráulico en San Martín, Cesar. No obstante, al ser una zona con pendientes de entre el 1% y 3%, es decir una zona muy plana, la hidrología de la zona no se comporta de manera convencional. Este caño es una bifurcación del drenaje del río Lebrija y para comprender las dinámicas y la oferta del caño Icacal, es necesario estudiar la cuenca del río Lebrija.

La oferta hídrica de la cuenca del río Lebrija, permitirá determinar si el desarrollo de actividades de fracturamiento hidráulico es posible en la vereda pita limón del municipio de San Martín, Cesar, donde se encuentra el área de posible explotación de yacimientos no convencionales. Dicha área está ubicada dentro del bloque de exploración y explotación denominado VMM-3 (valle medio del Magdalena). Este bloque se encuentra sobre la formación geológica La Luna que se encuentra en el subsuelo a una profundidad de alrededor 1524m a 3657,6m y que de acuerdo a sus características geológicas es la más apta en Colombia

para el desarrollo de actividades de extracción de hidrocarburos en yacimientos no convencionales. (Charry Ocampo & Anibal J., 2017)

3.1. Delimitación

La explotación de hidrocarburos mediante la técnica de fracturamiento hidráulico en Colombia es un tema que actualmente preocupa a diferentes sectores de la sociedad puesto que en los países donde se ha desarrollado esta técnica se han presentado beneficios económicos, pero también problemáticas ambientales. Esto pone en juicio la técnica (especialmente en los impactos que podría generar sobre el recurso hídrico), además en Colombia, al ser un país dependiente del petróleo, los entes gubernamentales han contemplado la idea de explotar yacimientos no convencionales para impulsar la economía en este sector. No obstante, se desconocen realmente todos los efectos e impactos que esta técnica puede generar en el contexto colombiano. (Charry Ocampo & Anibal J., 2017)

La formación La Luna, que se encuentra dentro de la cuenca hidrográfica del Valle medio del Magdalena, debido a sus características geológicas, es la más apta en el país para desarrollar los proyectos de explotación de hidrocarburos mediante fracturamiento hidráulico. Gracias a esto las empresas interesadas en realizar pozos petroleros a partir de esta técnica, se han interesado en llevarla a cabo en esta formación. (Naranjo Plata, 2016)

La empresa ConocoPhillips se encuentra en proceso de licenciamiento ambiental en una de las áreas más aptas de la formación, que se encuentra en el municipio de San Martín, Cesar. Por ello es necesario reconocer los caudales disponibles de la cuenca del Río Lebrija para el abastecimiento de agua en relación con las actividades de extracción, por lo cual esta es la zona de estudio para este proyecto.

3.2. Formulación

A partir de la determinación de la oferta hídrica de la cuenca del Río Lebrija, que corresponde al caudal que alimentará las actividades de extracción de hidrocarburos mediante fracturamiento hidráulico en yacimientos no convencionales en el municipio de San Martín, Cesar, vereda Pita Limón, se busca demostrar si el caudal tiene la capacidad de resiliencia para llevar a cabo proyectos que impliquen el uso y desarrollo de la técnica de fracturamiento hidráulico sin generar efectos negativos sobre el caudal de la cuenca.

3.3. Pregunta de investigación

¿ Es el caudal del Río Lebrija óptimo para el abastecimiento de recurso hídrico, para el desarrollo de las actividades enmarcadas dentro de la técnica de fracturamiento hidráulico, sin afectar el caudal ambiental?

4. JUSTIFICACIÓN

Para el desarrollo de actividades de explotación petrolera es necesario primero conocer el territorio y cada uno de sus componentes, para luego plantear estrategias de planificación y gestión ambiental para llevar a cabo estas actividades de manera sostenible permitiendo mitigar los impactos que la actividad genere. Lo mencionado anteriormente es necesario para el

desarrollo de todo tipo de actividades antropogénicas que puedan generar impactos en el ambiente.

El desarrollo de la técnica de fracturamiento hidráulico en Colombia aún no se ha llevado a cabo puesto que es una actividad que ha generado impactos negativos en territorios extranjeros, especialmente sobre el recurso hídrico. En Colombia, todavía se desconocen que impactos en concreto podría tener el uso de esta técnica ya que esto depende del tipo de geología e hidrología de la zona, de manera que, a nivel ambiental, es necesario reconocer el estado actual de acuíferos y aguas superficiales que se puedan ver afectadas por la extracción de yacimientos no convencionales, puesto que el recurso hídrico ha sido el más afectado por la explotación por medio de fracturamiento hidráulico en algunas regiones de Estados Unidos, país donde más se utiliza esta técnica. (Boudet , y otros, 2013)

Al identificar el estado actual del recurso hídrico en el área más apta para la explotación de hidrocarburos mediante la técnica de fracturamiento hidráulico, se pueden reconocer los posibles impactos que este tipo de actividad económica puede generar en el ambiente en cuanto al componente físico AGUA y así generar respuestas que permitan comprobar si este tipo de extracción se puede implementar en la zona sin dar pie a efectos irreversibles sobre el recurso hídrico. A su vez esta investigación puede servir como herramienta para terceros que deseen realizar un plan de manejo ambiental de todos los componentes ambientales (físicos, bióticos, socioeconómicos y culturales) para la realización de esta actividad en esta zona.

Por otra parte se debe tener en cuenta que a nivel económico, los proyectos de yacimiento no convencionales en el departamento del Cesar son de carácter PINE (Proyectos de Interés Nacional y Estratégico) es decir, aquellos de alto impacto en el crecimiento económico y social de Colombia relacionados con minerales estratégicos para el país, que garantizan un proyecto viable y que representan una oportunidad de desarrollo social. Por este motivo es importante realizar estudios ecológicos, económicos y sociales respecto al desarrollo de técnicas de fracturamiento hidráulico para llevar a cabo esta práctica de manera responsable y sostenible, minimizando los impactos negativos sobre el ambiente y aumentando impactos positivos sobre la economía y la sociedad. (Consejo Nacional de Política Económica y Social. República de Colombia, Departamento Nacional de Planeación, 2014).

Finalmente, en todo proyecto de desarrollo económico se deben tener en cuenta las comunidades que habitan en la zona donde se realizará la actividad, pues son estas las que podrían verse directamente afectadas por el procedimiento teniendo en cuenta también que sus dinámicas sociales y económicas pueden recibir impactos tanto negativos como positivos.

En el área de influencia del proyecto de exploración de hidrocarburos APE-Plata se encuentran diferentes comunidades asentadas, cada una de estas con infraestructuras de vivienda, educación, recreación, culto y servicios públicos básicos además de las infraestructuras de producción agrícola y pecuaria de los que depende la economía de las mismas. Éstas requieren altos volúmenes de agua para su desarrollo, por esto son de gran importancia en el desarrollo de este proyecto.

5. OBJETIVOS

5.1. *Objetivo general*

Determinar el estado actual del caudal del río Lebrija donde se calcule la oferta hídrica de la cuenca que determine la capacidad de abastecimiento del Caño Icacal para la explotación de hidrocarburos mediante la técnica de fracturamiento hidráulico en la vereda pita Limón del municipio de San Martín, Cesar.

5.2. *Objetivos específicos*

1. Definir la cuenca del río Lebrija, su ubicación y sus características morfométricas.
2. Determinar la oferta hídrica de la cuenca del río Lebrija a partir del modelo Lluvia – caudal de Soil conservation Services (SCS).
3. Determinar si el caudal disponible del Caño Icacal (Bifurcación del drenaje del río Lebrija) es óptimo para la demanda hídrica de las actividades de fracturamiento hidráulico en el municipio de San Martín Cesar, sin afectar el caudal ambiental de la cuenca.

6. MARCO DE REFERENCIA

6.1. Estado del arte

Para abarcar el fracturamiento hidráulico es necesario visualizarlo de manera global y reconocer las problemáticas que se han presentado a nivel ambiental sobre el desarrollo de esta técnica. El primer escenario es la visión desde autores norteamericanos, pues ellos pertenecen al país donde más se desarrolla esta técnica actualmente en el mundo.

La profesora de ciencias sociales Dianne Rahm, especializada en temáticas energéticas y ambientales, expone en el artículo *Regulating hydraulic fracturing in shale gas plays: The case of Texas* las diferentes situaciones que se han presentado en EEUU ocasionadas por llevar a cabo actividades de fracturamiento hidráulico. Demuestra la importancia del petróleo para el estado de Texas y hace énfasis en la normativa que lo regula y los procesos que se han llevado a cabo en el estado para controlar los efectos de la explotación por esta técnica.

Además, identifica que Texas es uno de los estados más grandes de EEUU y uno de los más ricos en reservas de gas y petróleo. De hecho, se destaca mundialmente como uno de los mayores productores de gas y petróleo en el mundo y según la administración de la información energética de los Estados Unidos, las técnicas de perforación más eficientes y rentables (especialmente para la producción de gas natural) provienen de formaciones de lutitas (Shales) lo cual ha incrementado la producción de gas y petróleo en el estado.

Uno de sus resultados más destacados es que el estado de Texas se declaró anti- EPA (Environmental Protection Agency) lo que representa problemas frente a la conservación de los recursos en el estado, esto se hace visible puesto que ciertas comunidades han presentado quejas por la calidad del agua, pero no se han tomado decisiones rigurosas, lo que justifica que la jurisprudencia de la EPA en este estado no es estricta. En Texas el agua subterránea no está controlada por el estado, por tanto, el uso de esta no es un impedimento para quienes desean extraer yacimientos no convencionales por medio de fracturamiento hidráulico; de igual forma las industrias son las encargadas de dar un uso adecuado de esta y de dar también una disposición correcta de aguas residuales. El estudio concluye que la responsabilidad sobre el recurso hídrico compete a las industrias petroleras y que estas se encuentran en capacidad de sobrellevar las problemáticas que se presenten (Rahm, *Regulating hydraulic fracturing in shale gas plays: The case of Texas*, 2011).

Desde una visión más amplia sobre el territorio norteamericano, Boudet y otros, a través del artículo *“Fracking” controversy and communication: Using national survey data to understand public perceptions of hydraulic fracturing*, analizan cómo el fracturamiento hidráulico ha afectado diferentes comunidades en zonas donde se realiza este tipo de explotación y cómo esto es percibido como un riesgo para ellos. Se aduce que el fracturamiento hidráulico ha afectado a algunas comunidades y estas tienen variadas percepciones ante esta técnica, desde puntos de vista económicos, de salud y ambientales. (Boudet , y otros, 2013)

El segundo escenario para abarcar el fracturamiento hidráulico es desde la visión europea, donde la autora Ana Salinas Avellaneda, coordinadora del Grupo de trabajo de la Sociedad Española de Sanidad Ambiental (SESA) expone en el artículo *Criterios sanitarios ambientales a tener en cuenta en los proyectos de “fracking” en España*, menciona algunos beneficios y desventajas que puede generar el fracturamiento hidráulico en España. Hace referencia a la normativa que existe en Europa sobre este tipo de explotación y que en el Reino Unido y Polonia ya han otorgado licencias de exploración, aclara también que en España aún no existen

leyes que regulen la explotación de yacimientos no convencionales, de este modo su explotación se somete al mismo régimen que los convencionales.

Los resultados más importantes de este estudio señalan que los mayores impactos se dan durante la etapa de exploración/inicio, en la explotación y en el sellado de pozos antiguos o defectuosos. En cuanto a efectos socioeconómicos, las comunidades se verán beneficiadas por la oferta de empleo, pero así mismo se presentará devaluación de sus tierras y actividades.

El artículo también analiza los posibles impactos sobre el medio físico y propone medidas de control tentativas. Salinas Avellaneda concluye que el fracturamiento hidráulico es viable en España siempre y cuando se establezcan normativas suficientes para el desarrollo de este, y del mismo modo las autoridades estatales y autonómicas responsables de los recursos mineros, energía y medio ambiente serán los responsables de tomar decisiones apoyándose en resultados de procesos de evaluación y autorización (Salinas Avellaneda, 2015)

El tercer escenario de visualización de la problemática sobre explotación de yacimientos no convencionales es abarcado a nivel nacional.

En el artículo *Efectos de la estimulación hidráulica (fracking) en el recurso hídrico: implicaciones en el contexto colombiano* los autores Charry Ocampo y Pérez describen cómo funciona la técnica de fracturación hidráulica y cada una de sus etapas, a la vez señalan los posibles efectos sobre el ambiente contextualizado a Colombia en cada uno de los procesos de explotación, que podrían generarse por una inadecuada explotación. Los autores concluyen que la extracción por medio de fracturamiento hidráulico en Colombia es posible a pesar de representar grandes retos en el sector, evidenciando la necesidad del desarrollo de tecnologías y estudios más precisos que contribuyan a la reducción del riesgo de afectación a recursos. Finalmente, el artículo propone algunas técnicas dentro del proceso de extracción que pueden reducir los riesgos potenciales ante los cuales ciertos recursos se verían afectados (Charry Ocampo & Anibal J., 2017)

A nivel sectorial (petrolero), los autores Pacheco, Cardona y Cortes ilustran la capacidad que tiene la formación La luna para el desarrollo de actividades de extracción de hidrocarburos mediante fracturamiento y la resiliencia de dicha formación ante los impactos (Pacheco, Cardona Molina, & Cortes, 2014), en su artículo *Caracterización composicional y de capacidad de almacenamiento en muestras de superficie de las formaciones Conejo y La Luna (Valle medio del Magdalena y Cordillera Oriental)*.

Desde el escenario local respecto a la oferta hídrica a nivel nacional, el *Estudio Nacional del agua* desarrollado por el IDEAM ofrece observación ante la oferta hídrica del país y variables sobre el uso del agua, como la demanda hídrica y municipios vulnerables al desabastecimiento. Cabe resaltar que este estudio aún no se encuentra disponible para la ciudadanía y los resultados obtenidos se encuentran a nivel general de país. (IDEAM, 2018).

En la actualidad, no se encuentran evidencias o aportes significativos de estudios realizados sobre el caudal de la cuenca del río Lebrija. Sin embargo, en el artículo *Planificación del recurso hídrico en la quebrada Aguas Blancas, zona rural de Montería, Córdoba*, los autores

López, Martínez, Feria y Cruz, determinaron los caudales mensuales para la quebrada aguas blancas, el desarrollo de dicha investigación se realizó de manera similar a la que se encuentra planteada en la metodología de este proyecto, haciendo uso de herramientas SIG y simulación hidrológica. Por otra parte, los resultados obtenidos por los autores demostraron que es posible almacenar excesos de agua en períodos de lluvias para atender requerimientos en períodos secos y así garantizar el uso del recurso sea sostenible en toda época del año. (López, L., J., & Cruz, 2016)

6.1. Marco Teórico

6.1.1. Importancia del Petróleo

Actualmente el petróleo es una sustancia de vital importancia para el ser humano pues este recurso abastece a la humanidad de diferentes productos derivados que son utilizados a diario. No obstante, el proceso de extracción de este recurso en sus diferentes etapas afecta factores bióticos y abióticos, por tal motivo es de vital importancia realizar un estudio de impacto ambiental que permita evidenciar qué factores ambientales se verán afectados por la explotación con la técnica de fracturamiento hidráulico.

De acuerdo con el Ministerio de Ambiente de Colombia, el impacto ambiental se define como cualquier alteración en el medio ambiental biótico, abiótico y socioeconómico, que sea adverso o beneficioso, total o parcial, que pueda ser atribuido al desarrollo de un proyecto, obra o actividad. (Cárdenas & Cañate, 2015).

6.1.2. ¿Qué es el fracturamiento hidráulico?

La técnica de fracturamiento hidráulico es una técnica de extracción de petróleo y gas de manera no convencional en reservas en la roca generadora del hidrocarburo (Shale o esquisto), que de otra manera es inaccesible e incluso imposible su extracción.

El proceso se trata de una perforación horizontal a través de la roca generadora, inyectando una mezcla de agua, arena o agentes cerámicos y químicos a elevadas presiones que fracturan la roca y facilitan el flujo de los hidrocarburos. La perforación consta de dos grandes fases; primero, se realiza una perforación vertical de alrededor 1524m a 3657,6m y luego, usando un equipo de perforación direccional el pozo se perfora horizontalmente extendiéndose aproximadamente 600m (Rahm, *Regulating hydraulic fracturing in shale gas plays: The case of Texas*, 2011).

Durante la perforación de la porción vertical del pozo, una serie de cubiertas de acero se cementan en su lugar para proteger los acuíferos; esto recibe el nombre de pozo de revestimiento, que consiste en 4 capas. De adentro hacia afuera, la primera capa es la carcasa de producción la cual es la más interna y extensa, seguida de esta se encuentra la carcasa intermedia, la carcasa de superficie y finalmente la carcasa de conducción, estas se encuentran recubiertas de cemento (Mathes, 2014).

Las formaciones de esquisto generalmente se encuentran muy por debajo de los acuíferos de agua. Las formaciones que corresponden al fracturamiento horizontal suelen estar fracturadas en etapas y múltiples veces (diez o más) para fracturar la roca alrededor de 60m (Rahm, *Regulating hydraulic fracturing in shale gas plays: The case of Texas*, 2011).

Las sustancias utilizadas en la técnica de fracturamiento hidráulico son: 90% agua, 9,5% arena y el 0,5% restante corresponde a aditivos químicos, que pueden variar según la formación geológica para cumplir las necesidades específicas de cada área. Los más utilizados son: ácidos

que eliminan los restos de lodos de perforación, biocidas que controlan el crecimiento de bacterias, estabilizadores de arcillas los cuales previenen la precipitación de arcillas en la formación, los inhibidores de corrosión que reducen la formación de óxido, reductores de fricción, agentes gelificantes que mejoran y facilitan el transporte del propano y su ubicación en las micro-fracturas de la formación rocosa. (Schneider, 2014) Algunos de los aditivos más utilizados son: cloruro de sodio, etilenglicol, sales de borato, carbonato de sodio o potasio, goma de guar (polisacárido) e isopropanol. (Mathes, 2014).

El agua que es inyectada retorna a la superficie, donde por medio de evaporación forzada es tratada y separada del hidrocarburo y de las sustancias mencionadas anteriormente necesarias para el fracturamiento, para posteriormente ser dispuesta en condiciones aceptables y permisibles.

Esta técnica aún no se ha realizado en el país debido a que no es una técnica que sea aceptada por la sociedad, y es un tema que genera una gran controversia por evidencias de problemáticas en el ambiente y en la salud humana que se han generado en algunas zonas del mundo donde se realiza esta práctica.

Esta técnica requiere alrededor de 2 a 10 millones de galones de agua por pozo, lo que genera poca aceptación de esta técnica alrededor del mundo. En Estados Unidos De América (país líder en el desarrollo de esta técnica) se realizó un estudio para determinar la aceptación de esta. Los resultados demostraron que es mayor la población que la rechaza que la que la acepta, en adición a esto, los grupos de aceptación se caracterizaron por ser personas conservadoras y adultos mayores a los 45 años (Boudet , y otros, 2013).

En este orden de ideas, es importante realizar diferentes estudios ambientales en las zonas de posible extracción de hidrocarburos por medio de fracturamiento hidráulico en el país, para así mismo corroborar si esta técnica es potencialmente dañina para el ambiente y la salud, o si las condiciones ambientales especialmente geológicas, hidráulicas y socio-económicas del país permite realizarla de forma controlada.

6.1.3. Formación La Luna

En lo que respecta a Colombia, las zonas más adecuadas para explotación de yacimientos no convencionales se encuentran en el valle medio del Magdalena hacia el oriente del departamento de Santander, específicamente en la formación geológica la Luna.

Por su edad cretácica superior, esta ha sido considerada como la roca generadora de gran parte de los hidrocarburos de Colombia y Venezuela; se caracteriza por altos contenidos de materia orgánica puesto que presenta carbono orgánico total (TOC), que varía entre 1,5% y 9,6% y espesores de 60,96 m, su proveniencia es marina principalmente algas, lo que indica buenas condiciones para generar hidrocarburos.

Los autores Pacheco, Cardona, Molina y Cortes, 2014, indican que el comportamiento de este tipo de rocas ante el fracturamiento es aparentemente controlado por su alto contenido de materia orgánica, aclaran que a mayor contenido de materia orgánica mayor será el desarrollo de fracturas. (Pacheco, Cardona Molina, & Cortes, 2014)

Esta formación es considerada una de las cuencas más ricas de América del sur en hidrocarburos. Su edad es equivalente a Eagle Ford shale en Texas, su contenido de lutitas presenta una alta TOC en promedio de 4,5%. (Naranjo Plata, 2016).

En cuanto a la estratigrafía de la formación se divide en tres miembros: miembro Salada, Pujamana y Galembó. El miembro Salada es de la edad turoniano inferior, está constituido por

Shale (esquisto) negros laminados, a menudo silíceos y algunos niveles de calizas negras con un espesor aproximado de 50 a 100m. El miembro Pujamana está constituido principalmente por shale calcáreos de color gris a negro, en algunos sectores intercalados con areniscas hacia la base de este miembro su espesor es aproximado de 50 a 350m. Finalmente se encuentra el miembro Galembó en una secuencia de lodolitas calcáreas, intercaladas con capas delgadas de caliza, capas de arenisca fosfática y niveles delgados de chert, su espesor varía entre 180 y 350m. (Ballesteros Camaro & Parra Mendez, 2012)

6.1.4. Explotación de hidrocarburos proyecto plata municipio de San Martín, Cesar

La empresa ConocoPhillips Colombia, busca desarrollar actividades de explotación petrolera en el bloque VMM-3, específicamente en el área de perforación plata (APE plata), situada en la vereda Pita limón, municipio de San Martín, Cesar. De ser aprobada su licencia ambiental, dicha empresa pretende perforar y completar mediante el fracturamiento hidráulico hasta 6 pozos verticales a lo largo de seis años, donde se podrá navegar entre uno a seis pozos horizontales en el desarrollo del proyecto. La profundidad vertical de los pozos será entre 3.850 a 5.090 m y una sección horizontal de 1829 m en la formación la luna, para llevar a cabo estas actividades se debe determinar si los sistemas acuáticos de la zona están en la capacidad para abastecer el proyecto, sin generar efectos irreversibles sobre el recurso hídrico y sobre el ambiente (AnteaGroup & ConocoPhillips, 2017).

6.1.5. Alta demanda de agua para el fracturamiento hidráulico

Desde la dirección general de políticas interiores el parlamento europeo desarrolló un estudio llamado *Repercusiones de la extracción de gas y petróleo de esquisto en el medio ambiente y la salud humana*. En el apartado 2.4 fue analizado el consumo de altos volúmenes de agua para el desarrollo de fracturamiento hidráulico, desde una revisión bibliográfica que asegura que por pozo se consume aproximadamente 15 millones de litros y que el desarrollo de la fracturación se realiza en varias etapas.

Por otro lado, se sostiene que un mismo pozo puede requerir varias fracturaciones a lo largo de su periodo de funcionamiento y cada proceso de fractura adicional puede requerir más agua que el anterior. En algunos casos, los pozos se pueden fracturar hasta 10 veces; esto demuestra el excesivo consumo de agua para el desarrollo de esta técnica. Este documento asegura que no puede afirmarse que el riesgo de realizar fracturamiento hidráulico sea menor a los de extracciones convencionales, incluyendo riesgos de contaminación a gran escala. (Lechtenböhm, Capito, Matra, W., & Zittel, 2011)

6.1.6. Importancia del recurso hídrico

El consumo de agua es esencial en todas las actividades del ser humano y para el desarrollo de la vida de diferentes especies animales y vegetales, la vida no se concibe sin la existencia del agua. De faltar este recurso la vida en la tierra se extinguiría. En razón de esto, es necesario priorizar su conservación y su buen uso.

De acuerdo al código 2811 de 1974 de recursos naturales todo recurso debe buscar preservarse y manejarse de forma integral conforme al beneficio e interés común (Presidencia Nacional de la República de Colombia, 1974).

Vale la pena mencionar que el recurso hídrico no solo es necesario para el desarrollo de la vida en la tierra, también el ser humano ha desarrollado diferentes técnicas y mecanismos que requieren de este recurso para su desarrollo lo que pone en riesgo su conservación.

De acuerdo al reporte de avance del estudio nacional de agua del IDEAM, los municipios pertenecientes al departamento del Cesar se encuentra dentro del grupo de municipios susceptibles al desabastecimiento dado a que el acceso al recurso hídrico es limitado, bien sea por déficit en la oferta natural, reducción de la precipitación o infraestructura insuficiente (IDEAM, 2018) por ello es indispensable desarrollar estudios ambientales e hidrológicos que permitan determinar el uso adecuado de este recurso.

6.1.7. Caracterización del recurso hídrico (oferta y demanda)

La relación ente oferta/demanda hídrica es utilizada como indicador de la presión sobre el recurso hidrico, y se expresa a partir del índice de uso del agua en porcentaje. Esto permite evaluar las actividades actuales de la zona y la resiliencia del sistema hídrico para determinar si en una zona se pueden llevar a cabo actividades que requieran alto consumo de agua, como el desarrollo de hidroeléctricas o pozos petroleros, entre otros.

La relación oferta/demanda permite visualizar el panorama de las magnitudes de oferta y demanda hídrica de una zona determinada para así identificar conflictos y presiones sobre el recurso hídrico, a la vez que facilita la realización de una correcta planeación de uso del recurso y el territorio, donde el mismo se conserve en buen estado y pueda suplir a todos los sectores económicos sin perjudicar a ninguno, ni a la sociedad que se abastezca de este para sus necesidades básicas (Dominguez, R., Vanegas Sarmiento, & P., 2008).

También a partir del reconocimiento de la oferta y demanda hídrica de una cuenca determinada se pueden evaluar las capacidades de abastecimiento de la misma para el desarrollo de nuevas industrias que requieran el consumo de altos volúmenes de agua, para así mismo evaluar si la actividad en cuestión se puede o no llevar a cabo en la zona, como es el caso del fracturamiento hidráulico en San Martín, Cesar. (Dominguez, R., Vanegas Sarmiento, & P., 2008)

6.2. Marco Conceptual

6.2.1. Conceptos de fracturamiento hidráulico

Corresponde a conceptos que permiten comprender la técnica de fracturamiento hidráulico para para la extracción de hidrocarburos.

6.2.1.1. Agua de producción

Incluye el fluido de retorno que se genera inmediatamente después de la actividad de estimulación hidráulica y la fase posterior del agua que proviene de la formación productora de hidrocarburos (Ministerio de minas y energía, 2015)

6.2.1.2. Estimulación hidráulica

Tratamiento a la formación productiva de un pozo a través del uso de agua con el objetivo de mejorar su productividad. Esta estimulación se realiza a través del bombeo de un fluido de estimulación hidráulica a alta presión por el hueco del pozo, con el fin de inducir fracturas en la roca (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2014).

6.2.1.3. *Explotación*

Conjunto de técnicas y normas geológico-mineras y ambientales, para extraer un mineral o depósito de carácter para su transformación y comercialización (Ministerio de minas y energía, 2015)

6.2.1.4. *Fluido de estimulación hidráulica*

Fluido utilizado para realizar la estimulación hidráulica del yacimiento, constituido por un fluido base, por lo general agua en un 98-99 % del volumen total, con la adición de un propante de entre 1-1.9 % del volumen total y aditivos químicos (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2014)

6.2.1.5. *Fluido de retorno:*

Fluido generado inmediatamente después de una actividad de estimulación hidráulica que contiene parte del fluido de estimulación hidráulica con otros componentes de origen natural que hayan podido ser arrastrados del yacimiento donde se realiza la fractura (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2014).

6.2.1.6. *Fracturamiento hidráulico:*

Es la técnica por la cual se inyecta un fluido a base de agua a altas presión en la roca generadora de hidrocarburos para generar fracturas en está, el fluido inyectado permite que estas fracturas permanezcan abiertas con un agente apuntalante, arena natural o sintética una vez que se haya liberado la presión de la inyección. La fractura apuntalada se comporta como un canal de alta conductividad lo cual mejora la capacidad productiva (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2014).

6.2.1.7. *Hidrocarburos:*

Recursos no renovables, compuestos orgánicos, formados por procesos naturales debidos a la descomposición de plantas y animales, bajo condiciones especiales de enterramiento (altas presiones y temperaturas) (Ministerio de minas y energía, 2015).

6.2.1.8. *Radio de estimulación hidráulica*

Distancia alcanzada por la fractura producto de la estimulación hidráulica del pozo. Esta distancia usualmente es estimada utilizando programas computarizados que simulan como la estimulación hidráulica podría tener un efecto sobre el yacimiento (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2014)

6.2.1.9. *Yacimientos no convencionales*

Son aquellos yacimientos de petróleo donde el hidrocarburo se almacena en la roca generadora que a diferencia de los yacimientos convencionales en este el hidrocarburo no se permeabiliza hacia los reservorios, para su obtención es necesario fracturar esta roca generadora. Estos yacimientos se caracterizan por que en estos se producen hidrocarburos de buena calidad dentro de reservorios con baja porosidad y baja permeabilidad (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2014)

6.2.1.10. Propante

Constituyente del fluido de estimulación hidráulica usualmente arena o partículas cerámicas que se utilizan para mantener la fractura abierta una vez la presión de la estimulación hidráulica se reduce (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2014).

6.2.2. Conceptos caracterización morfométrica de la cuenca

Para realizar una caracterización hidrológica o el reconocimiento de una cuenca y sus capacidades, es necesario definir sus aspectos fisiográficos y morfométricos que posibilitan evidenciar su geometría, geología, geomorfología e hidrología, y a partir de estos establecer el funcionamiento hidrológico. Este análisis cuantitativo se hace a partir de las características físicas de la cuenca, donde los parámetros morfométricos que se determinan son:

6.2.2.1. Área (A)

Toda área drenada por el sistema fluvial incluso entre sus divisores topográficos, proyectada en el plano horizontal, siendo el área elemento básico para el cálculo de los diversos índices morfométricos. También se define como la proyección octagonal de toda área de drenaje en un sistema de escorrentía, dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural (Jiménez Cortes, 2017).

6.2.2.2. Perímetro

Es la medición de la línea envolvente del área que permite inferir sobre la forma de la cuenca (Jiménez Cortes, 2017).

6.2.2.3. Longitud de cauce principal:

Es la distancia del cauce principal desde su nacimiento hasta su desembocadura (Jiménez Cortes, 2017)

Estos parámetros permiten calcular las siguientes variables morfométricas:

6.2.2.4. Índice de Compacidad:

Describe la geometría de la cuenca y está relacionado con el tiempo de concentración del sistema hidrológico. (Jiménez Cortes, 2017) Este índice se calcula a partir de la Ecuación de Graviellus*:

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Ecuación 1. Ecuación de graviellus

donde A es igual al área de la cuenca en Km^2 y P es igual al perímetro en Km . (Jiménez Cortes, 2017) Este índice esta determina la forma de la cuenca a partir de rangos establecidos los cuales indican que:

- ✓ Si $Kc= 1-1.25$ la cuenca tiene una forma redonda-oval redonda.

- ✓ Kc 1.25-1.5 la cuenca tiene una forma Oval redonda-oval oblonga.
- ✓ Kc 1.5-1.75 la cuenca tiene una forma Oval oblonga-rectangular oblonga.

A partir del valor obtenido se determina la forma de la cuenca y se puede determinar que entre mas redonda menor retención y mas susceptible a crecidas. (Vásquez, 2016)

6.2.2.5. *Factor de forma*

Este permite establecer la tendencia morfológica general de la cuenca, y el cuadro del máximo recorrido, estableciendo la tendencia de la cuenca hacia las crecidas rápidas y muy intensas (Jiménez Cortes, 2017)

$$\text{Forma de la cuenca: } \frac{\text{área}}{L^2}$$

Ecuación 2. Ecuación para determinar forma de la cuenca.

Cuando el factor de forma es mayor a 1 indica que la cuenca tiene una forma redondeada, y cuando el factor de forma es menor a 1 es alargada (Jimenez Cortes, 2017).

El factor de forma indica más o menos la tendencia a inundaciones, pues en una cuenca con un factor de forma bajo, indica una menor probabilidad que una lluvia intensa pueda cubrir toda su extensión, en cambio cuando una cuenca tiene un factor de forma alto, puede presentarse riesgo de inundación (Vásquez, 2016).

6.2.2.6. *Densidad de drenaje*

Define la relación entre la longitud total de los cursos de agua dentro de la cuenca y el área total de ésta (Vásquez, 2016).

$$Dd = \frac{\sum Lci}{A}$$

Ecuación 3. Ecuación para determinar densidad de drenaje de la cuenca.

Cuando la densidad de drenaje igual a 0,5 km/km² se considera que es una cuenca con drenaje pobre; cuando la densidad de drenaje es igual a 3,5 km/km² es una cuenca con buen drenaje (Vásquez, 2016).

6.2.2.7. *Pendiente de la corriente*

Corresponde a la relación de altura del cauce principal (cota máxima menos la cota mínima) y la longitud del mismo.

$$P = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{l}$$

Ecuación 4. Ecuación para determinar pendiente media del drenaje. Donde Hmax corresponde a la cota máxima, Hmin corresponde a la cota mínima y L corresponde a la longitud del cauce. (Vásquez, 2016).

6.2.2.8. *Tiempo de concentración*

Es el tiempo que tarda una gota de lluvia en moverse desde la parte más lejana de la cuenca hasta el desagüe. También se define como el tiempo necesario para que toda la cuenca esté aportando agua al punto de salida. Se tiene en cuenta la longitud del curso de agua más largo, la diferencia entre la altura máxima y la altura mínima, expresado en minutos (Vásquez, 2016).

$$Tc = 0,0195 * \left(\frac{L^3}{\Delta H} \right)^{0,385}$$

Ecuación 6. Ecuación de Benham para determinar el tiempo de concentración de la cuenca.

6.2.3. *Conceptos hidrológicos*

En este apartado están las definiciones según el IDEAM de los conceptos que definen las variables que fueron calculadas.

6.2.3.1. *Oferta hídrica:*

La oferta hídrica de una cuenca es 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. (IDEAM, 2004)

6.2.3.2. *Caudal ambiental*

Caudal mínimo que debe mantenerse en un curso fluvial al construir una represa, captación o derivación, de forma que no se alteren las condiciones naturales del biotopo y se garantice el desarrollo de una vida fluvial igual, o al menos parecida, a la que existía anteriormente en el río.

Este se estima como el percentil de excedencia del 75% o el 85% sobre la curva de duración de caudales. (IDEAM, 2014)

6.2.3.3. *Polígonos de Thiessen*

Es un método de interpolación de datos en un área determinada, Se crean al unir puntos entre sí, trazando las mediatrices de los segmentos de unión. Las intersecciones de estas mediatrices determinan una serie de polígonos en un espacio bidimensional alrededor de un conjunto de puntos de control (que corresponden a una representación gráfica de las diferentes estaciones meteorológicas), de manera que el perímetro de los polígonos generados sea equidistante a los puntos vecinos y designando su área de influencia. (Yepes, 2011)

6.2.3.4. *Modelo Lluvia – escorrentía*

Es una representación de la escorrentía superficial de una cuenca hidrográfica, el modelo se usa mayormente para entender procesos de escurrimiento y para pronosticar este con el propósito de regularizar en uso del agua. Este tipo de modelos se utiliza para determinar la oferta hídrica de una cuenca determinada cuando no se disponen de datos de caudales diarios, ó de baja calidad. Los caudales medios y extremos se pueden generar mediante un modelo de lluvia- escorrentía. Estos modelos parten del conocimiento de la lluvia como variable de entrada y en función de las características de la cuenca, se estima la parte de lluvia que se convierte en escorrentía directa. (IDEAM, 2018)

6.2.3.5. *Curva de duración de caudales*

Es un procedimiento gráfico para el análisis de la frecuencia de los datos de caudales y representa la frecuencia acumulada de ocurrencia de un caudal determinado. Es una gráfica que tiene el caudal, Q , como ordenada y el número de días del año (generalmente expresados en % de tiempo) en que ese caudal, Q , es excedido o igualado, como abscisa. La ordenada Q para cualquier porcentaje de probabilidad, representa la magnitud del flujo en un año promedio, que espera que sea excedido o igualado un porcentaje, P , del tiempo (caudales, 2019).

6.3. Marco normativo

A continuación, en la tabla 1 se encuentran las diferentes figuras legales que legislan y regulan la explotación de hidrocarburos en Colombia, la técnica de fracturamiento hidráulico.

Matriz legal			
Normatividad sobre Explotación de yacimientos no convencionales			
Año	Norma	Expide	Descripción
1974	Decreto 2811	Presidencia Nacional de la República de Colombia	El código regula el manejo de recursos naturales renovables y no renovables la protección del medio ambiente y como el estado y particulares debe contribuir en sus actividades para la preservación y manejo de los recursos.
1993	Ley 99	Congreso de Colombia	Esta ley establece que todo proceso de desarrollo económico y social del país se orientará según los principios universales y del desarrollo sostenible contenidos en la Declaración de Rio de Janeiro de junio de 1992 sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Se establece también que el uso de recursos hídricos es prioritario para el consumo humano por encima de cualquier otro uso.
2009	Ley 1274	Congreso nacional de la república	Por medio de este se establece el área del proyecto y se verifica las hectáreas totales adjudicadas por el gobierno para el desarrollo de actividades de extracción petrolera.
2009	Resolución 181495	Ministerio de Minas y Energía	Importancia sobre el aprovechamiento de hidrocarburos, regulación y control de actividades para minimizar efectos negativos.
2010	Política nacional para la gestión del recurso hídrico	Ministerio de ambiente y Desarrollo sostenible	Indica la importancia del recurso hídrico, la oferta hídrica que hay en el país y la calidad de los afluentes más importantes. Prioriza el uso del agua. Indica los mecanismos de gestión de recurso hídrico.
2012	Ley 1530	Congreso nacional de la república	Importancia del proyecto en la región en términos económicos pues el desarrollo de fracturamiento hidráulico es un proyecto de tipo PINE (proyecto de interés nacional y estratégico).
2013	Decreto 3004	Ministerio de Minas y Energía	Importancia de normas técnicas para explotación de yacimientos no convencionales, procedimientos, técnicas que se debe tener en cuenta y que se debe verificar que se cumplen.
2014	Resolución 90341	Ministerio de Minas y Energía	Importancia sobre el desarrollo de la actividad, busca que el desarrollo de fracturamiento hidráulico se lleve a cabo a través de mecanismos y herramientas de gestión ambiental, como los estudios de impacto ambiental, evaluación ambiental estratégica, diagnósticos ambientales, entre otros.
2014	Resolución 421	Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible	A partir de esta se adoptan los términos de referencia para llevar a cabo estudios de impacto ambiental para desarrollo de actividades de perforación exploratoria de hidrocarburos, en el anexo 3 de este documento se encuentran los términos de referencia específicos para el desarrollo de fracturamiento hidráulico de la misma debe

			desarrollar los estudios requeridos de evaluación ambiental en el área de influencia y desarrollar estudios de impacto ambiental exigidos por el ANLA
--	--	--	---

Tabla 1. Marco normativo sobre fracturamiento hidráulico y sobre recurso hídrico en Colombia

6.4. *Marco geográfico*

La cuenca del río Lebrija en la cual se desarrolló el presente proyecto, se encuentra al nororiente del país, en los departamentos de Cesar, Norte de Santander y Santander. Cuenta con una extensión de 9641,82 Km².

Dentro de la cuenca del río Lebrija se encuentra el bloque VMM-3, el cual fue adjudicado por la ANH a la empresa ConocoPhillips para el desarrollo de actividades de extracción petrolera; debido a sus características geológicas y litológicas la empresa escogió el municipio de San Martín Cesar, vereda Pita limón para el desarrollo de actividades de fracturamiento hidráulico en el pozo APE-PLATA. (Agencia Nacional De Hidrocarburos, 2015).

El área de interés del proyecto es la cuenca del Río Lebrija puesto que de este surge una bifurcación del drenaje a la altura de las coordenadas Magna sirgas Bogotá E: 1.046.467 y N:1.347.498, de dicha bifurcación nace el drenaje del caño Icacal el cual es el drenaje que la empresa Conocophillips estableció en el EIA para el abastecimiento de sus actividades de extracción de hidrocarburos mediante fracturamiento hidráulico (AnteaGroup & ConocoPhillips, 2017)

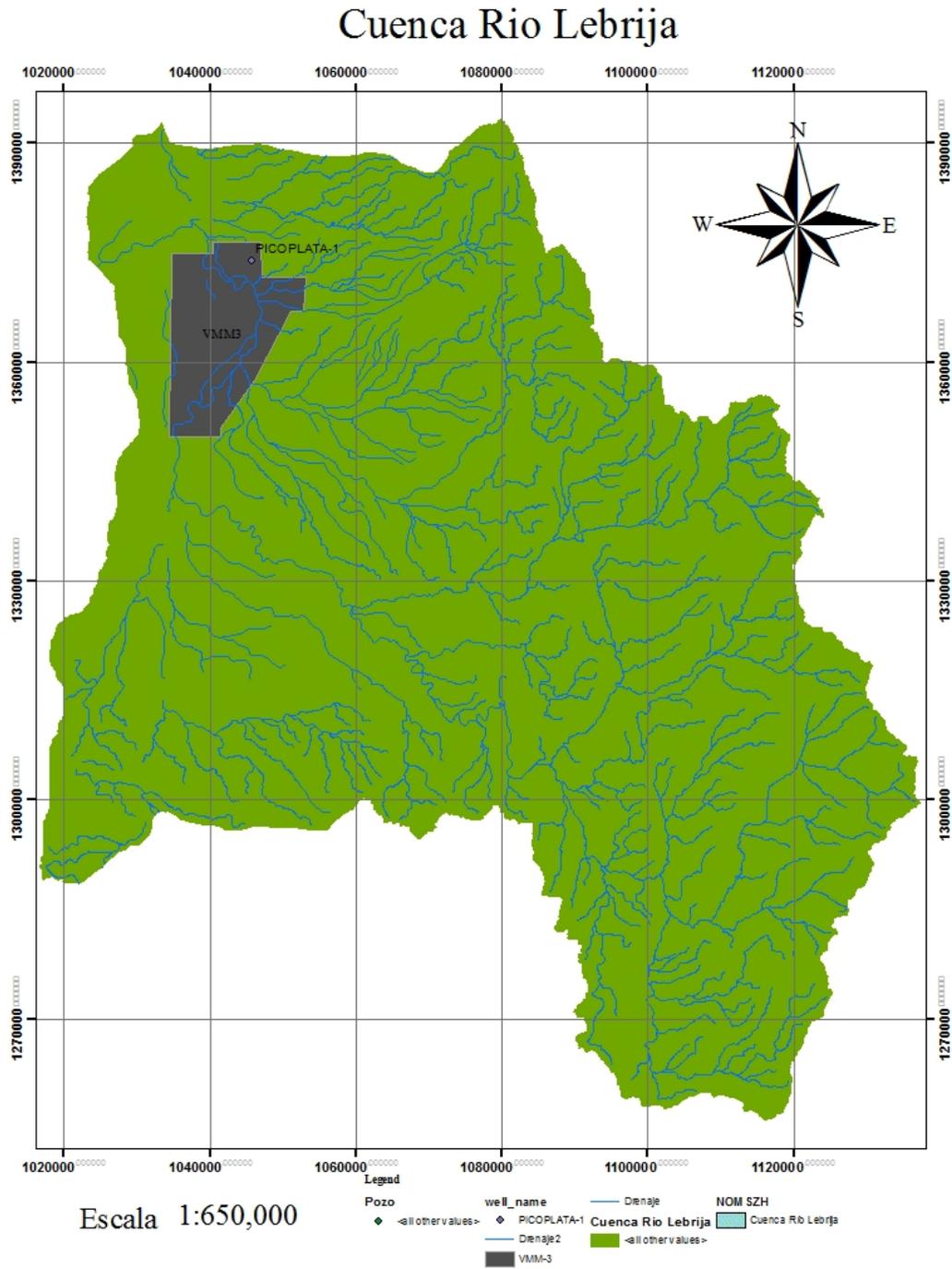


Figura 1. Mapa *Cuenca Río Lebrija* MAGNA SIRGAS-BOGOTÁ COLOMBIA
 Fuentes. DEM USGS EROS archive (USGS EROS archive, s.f.); Shapefiles Drenajes (SIAC, 2013) Mapa: realizado por autora.

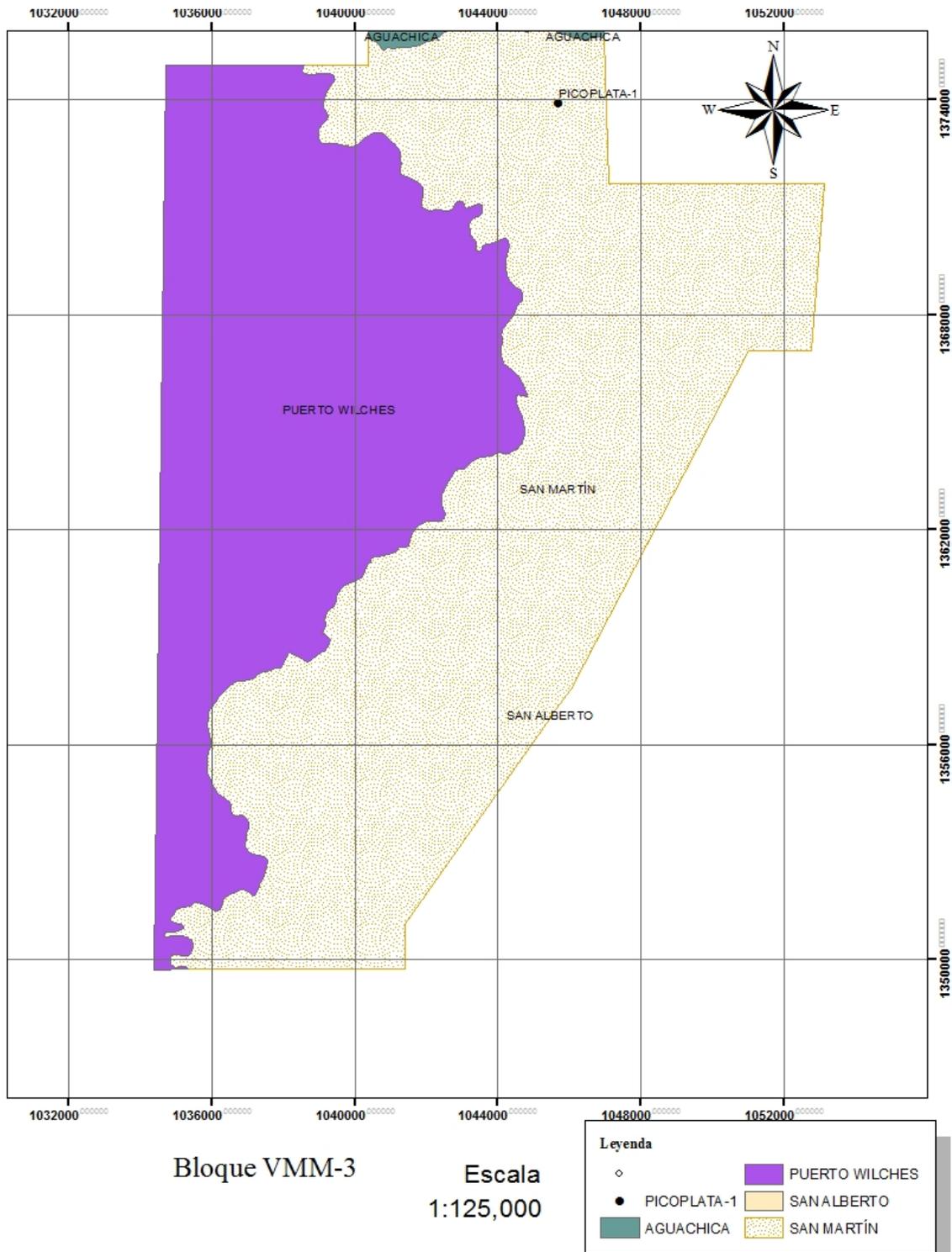


Figura 2. Mapa bloque VMM-3 División política MAGNA SIRGAS- BOGOTÁ COLOMBIA
 Fuente Shapefiles: Agencia nacional de hidrocarburos. (Agencia Nacional De Hidrocarburos, 2015)

Mapa: Realizado por Autora

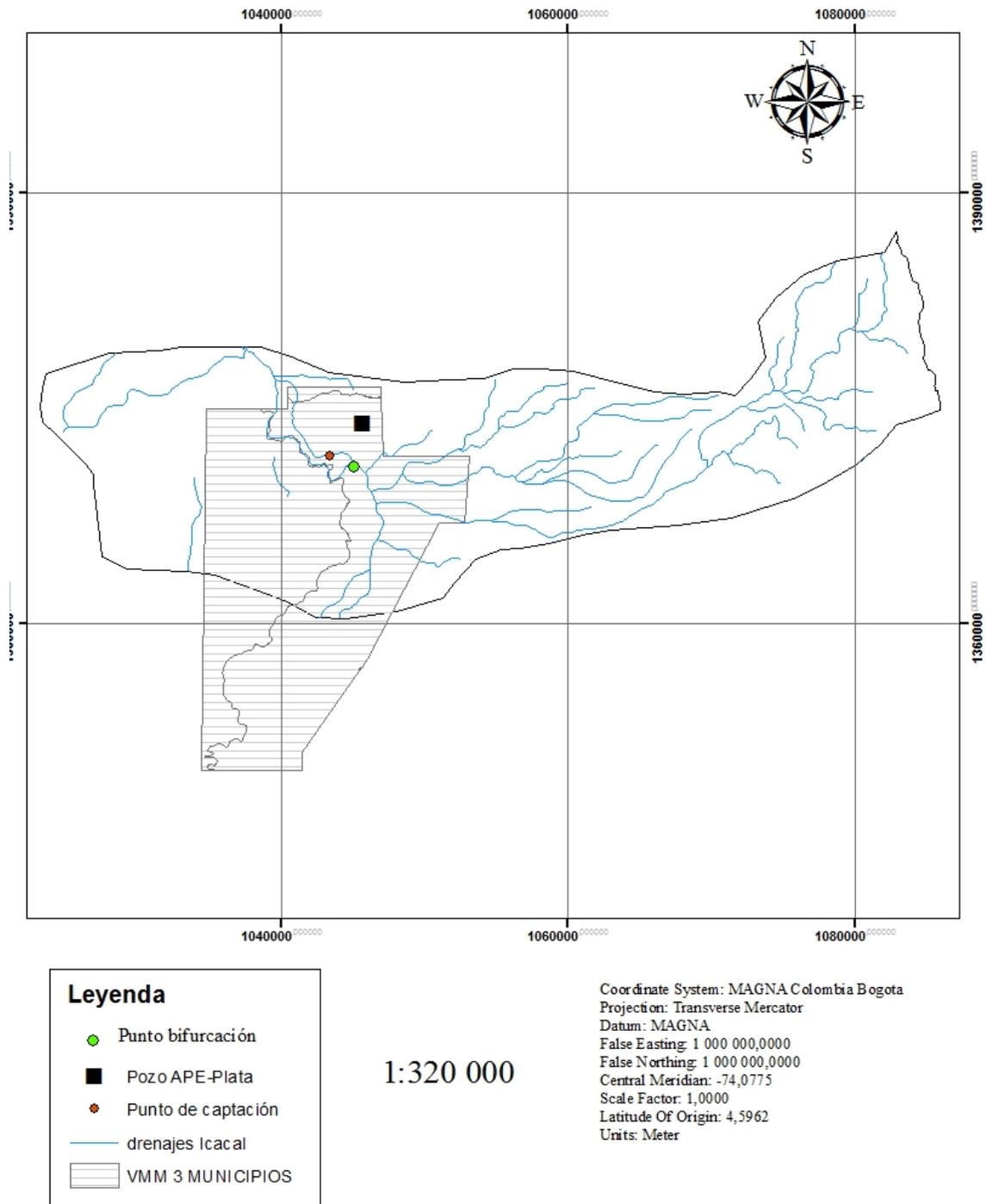


Figura 3. Mapa subcuena Icacal MAGNA SIRGAS- BOGOTÁ COLOMBIA
 Fuentes. DEM USGS EROS archive (USGS EROS archive, s.f.); Shapefiles Drenajes (SIAC, 2013)
 Mapa: realizado por autora.

6.5. Marco institucional

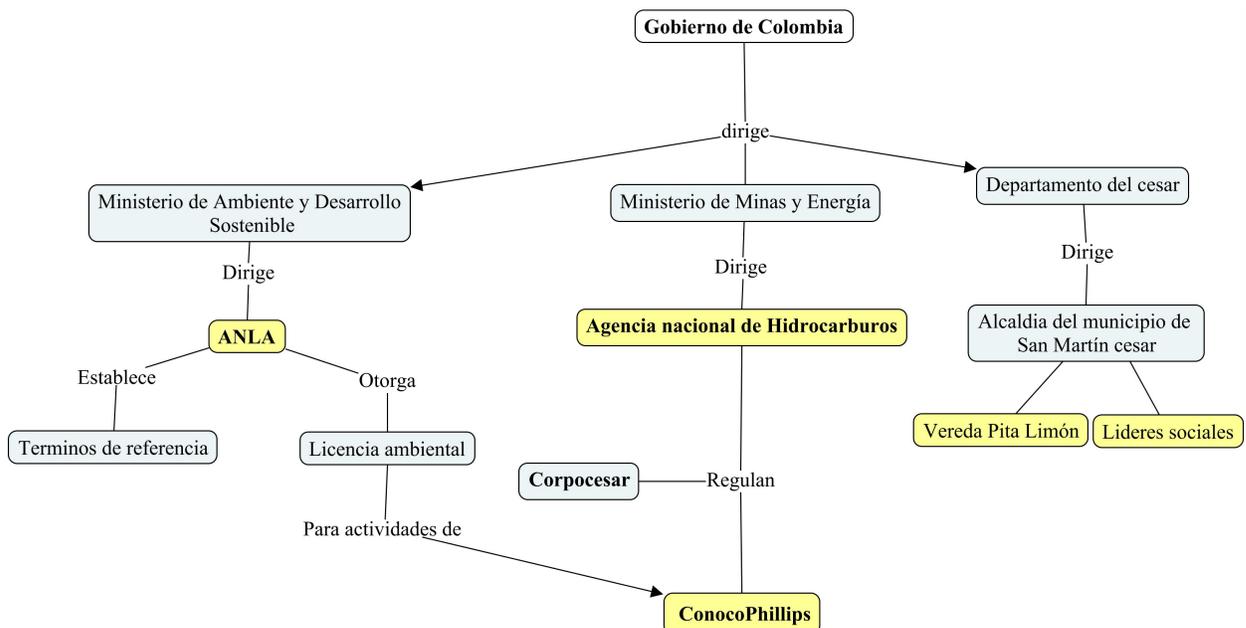


Figura 4. Marco Institucional. Realizado por Autora

7. METODOLOGÍA

7.1. Enfoque

El enfoque mixto representa un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos de investigación que implican la recolección y análisis de datos cuantitativos y cualitativos. En ese orden de ideas, este proyecto tiene un enfoque mixto, pues cualifica la cuenca del río Lebrija desde aspectos como pendiente, tipos y usos del suelo y precipitación para comprender las dinámicas hidrológicas de la misma a partir del modelo lluvia- caudal de SCS que permitió cuantificar en caudal de la cuenca del río lebrija y a partir de esto se evaluó si dicho caudal puede abastecer las actividades de explotación de hidrocarburos de yacimientos no convencionales mediante la técnica de fracturamiento hidráulico sin afectar el caudal ambiental. (Sampieri, 2014)

En cuanto al primer objetivo específico que busca definir la cuenca del Río Lebrija y determinar los principales factores morfométricos tiene un enfoque de carácter cuantitativo porque al calcular área, perímetro, longitud de cauce, factor de forma e índice de compacidad y pendiente, se describen características cuantitativas de la cuenca.

Respecto al segundo objetivo que busca determinar la oferta la cuenca del río Lebrija, este tiene un enfoque cuantitativo y cualitativo; cuantitativo ya que se determinaron la escorrentía superficial y el caudal de la cuenca a partir de la información numérica de la precipitación proporcionada por el IDEAM, y cualitativo puesto que, a partir de la información proporcionada por el IGAC sobre características fisicoquímicas de los suelos, se clasificó el tipo de textura del los suelos de la zona y a partir de la teledetección de imágenes satelitales de

la base de datos *Libra* se determinó el uso de los suelos para determinar la escorrentía de la cuenca y por ende su oferta hídrica.

A partir de los resultados de oferta hídrica de la cuenca se determinó si el caudal disponible de la cuenca puede abastecer las actividades de fracturamiento hidráulico, al hacer uso de datos numéricos el método para este objetivo es de carácter cuantitativo.

7.2. Alcance

El alcance de este proyecto es de carácter exploratorio pues en Colombia, específicamente en el área de estudio, se desconocen los efectos que puede generar la extracción de petróleo por medio de fracturamiento hidráulico, ya que toda actividad humana genera impactos tanto positivos como negativos sobre el ambiente; se debe tener en cuenta que específicamente en la extracción mediante fracturamiento hidráulico en algunas zonas de extracción en Estados Unidos se ha generado problemáticas sobre el recurso hídrico, por esta razón se caracterizó el estado del caudal disponible del río Lebrija la capacidad de abastecimiento, para así determinar los posibles efectos nocivos sobre este por actividades de fracturamiento hidráulico.

Krupnick, (citado por Naranjo Plata, 2016) considera que el debate en EEUU sobre el desarrollo de shale gas se caracteriza por la falta de consenso en sus implicaciones ambientales, económicas y sociales. Este estudio permite asentar las bases para un estudio de impacto ambiental más general sobre todos los factores ambientales del entorno que se pueden ver afectados por la el fracturamiento hidráulico y ampliar los conocimientos sobre los impactos que puede generar el desarrollo de esta actividad.

7.3. Método(s)

Los métodos utilizados son de carácter analítico, puesto que a partir de los procesos de cada método se obtuvieron resultados donde se identifica cada una de las partes que caracterizan la realidad del recurso hídrico en el área de influencia del proyecto, en razón de la búsqueda por comprender los posibles fenómenos que se pueden presentar si se llevase a cabo actividades de fracturamiento hidráulico y comprender como esta actividad realmente puede afectar el recurso hídrico.

7.3.1. Método para objetivo 1 Definir la cuenca del río Lebrija, su ubicación y sus características morfométricas.

Para definir la cuenca del río Lebrija, su ubicación y sus diferentes características morfométricas se hizo uso del software Arcgis, el cual es un instrumento que permite recopilar, organizar y administrar información geográfica que contiene diferentes herramientas para la elaboración y uso de SIG (sistemas de información geográfica). Para definir la cuenca, inicialmente se hizo uso de de los archivos tipo SHAPEFILES que se obtuvieron de la base de datos *SIGOT*, donde la cuenca ya se encuentra delimitada y georreferenciada en el sistema de coordenadas Magna Sirgas Bogotá, lo cual permitió reconocer y ubicar la cuenca espacialmente. Además, se utilizaron modelos digitales elevación (DEM) de la zona, que dan cuenta de una representación de la elevación y contienen un valor numérico que es una medida o estimación correspondiente a la altura de una zona. (ESRI, 2017)

Los modelos de elevación son elaborados por diferentes organizaciones; los utilizados para este trabajo fueron descargados de la base de datos *USGS EROS archive* DEM (USGS EROS archive, s.f.).

La información de este modelo de elevación fue procesada en el programa Arcgis por medio del grupo de herramientas de *Spatial Analyst*, que fueron utilizadas para calcular los parámetros básicos morfométricos: área, perímetro, longitud de drenaje, índice de compacidad, factor de forma, densidad de drenaje, tiempo de concentración. Estos se calcularon de acuerdo a las ecuaciones que se encuentran en el marco conceptual. A su vez, el uso de este modelo permitió reconocer la pendiente máxima y mínima de la cuenca y así mismo de las subcuencas que conforman la cuenca del Lebrija.

Tras haber reconocido la cuenca y sus características morfométricas, se procedió a identificar las características de abastecimiento y uso actual la cuenca del río Lebrija, a partir de información secundaria obtenida vía web a través del portal de atención al ciudadano del IDEAM, que ofrece los datos de precipitación y la ubicación de las estaciones más aproximadas a la cuenca, además se identificaron a partir de mapas temáticos del IGAC y de teledetección el tipo de suelos y las actividades productivas que se llevan a cabo en la zona (Sanchez , Jimenez, Velasquez, Piedra, & Romero, 2004) con el fin de cumplir el segundo y tercer objetivo.

7.3.2. Método para objetivo 2: Determinar la oferta hídrica de la cuenca del río Lebrija a partir del modelo Lluvia – caudal de Soil conservation Services (SCS).

Mediante la evaluación de la oferta hídrica se reconoció el caudal disponible de la cuenca, que permitió determinar la capacidad de abastecimiento y resiliencia de los sistemas acuáticos superficiales para abastecer la inyección de altos caudales de agua necesarios para el fracturamiento hidráulico sin afectar el caudal ambiental, para tal fin se calculó la oferta hídrica mediante el modelo lluvia – caudal del Soil Conservation Service (SCS), propuesto en el IDEAM en el documento del estudio regional del agua. (EMPAM S.A., 2014)

El uso de modelos lluvia – caudal se utiliza cuando los datos para el cálculo de la oferta no son suficientes o no se disponen de los mismos, esto permite calcular los caudales extremos y medios mediante modelos de lluvia - escorrentía, estos parten del conocimiento de lluvia, como variables de entrada y características de la cuenca, para estimar la escorrentía directa. Las características más importantes son las morfométricas (área, perímetro, pendiente, forma), el tipo de suelos y cobertura vegetal. (EMPAM S.A., 2014)

La información necesaria se contempla en la tabla 2:

Tipo de información	Información necesaria
Cartográfica	Planchas topográficas de IGAC a escala 1:25.000 y 1:10.000 o mayor, acordes a la escala.
	DEM 30
Generales de la cuenca	Parámetros morfométricos: área perímetro, longitud de la corriente, sinuosidad, densidad de drenaje, patron de drenaje, factor de forma, elevación media de la cuenca, pendiente media de la corriente y tiempo de concentración
Fisiográficas de la cuenca (Mapas temáticos)	Mapa distribución de pendientes (DEM)
	Mapa de suelos y aptitud
	Mapa de coberturas de la tierra
Climatológicas	Lluvia diaria

Lluvias máximas diarias (en 24h)

Tabla 2. Insumos necesarios para determinar la oferta hídrica a partir de modelo caudal- lluvia Fuente (EMPAM S.A., 2014)

Para la aplicación del modelo lluvia -caudal los principales elementos se tuvieron en cuenta para convertir la precipitación en escorrentía son: Área de la cuenca, altura de precipitación total, características básicas de la cuenca y la distribución temporal y espacial de la precipitación. (Bateman, 2007)

7.3.2.1. Modelo SCS lluvia - caudal

El modelo utilizado para llevar a cabo el cálculo de la oferta hídrica es el modelo planteado por Soil Conservation Service (SCS) de Estados Unidos en el que se contempla el uso de la selección de lluvias máximas diarias (24 horas) de estaciones vecinas y el análisis de frecuencias de las mismas, que determinaron las lluvias máximas en un periodo de retorno determinado, a partir de estas con ayuda del modelo HMS (Hidrologic modeling system) se determinó los caudales y el hidrograma correspondientes. (EMPAM S.A., 2014)

El método del SCS se fundamenta en la conservación de la masa y la capacidad potencial de infiltración del terreno, donde se definen dos tipos de lluvia, la que es infiltrada y la que se convierte en escorrentía directa, que depende del valor del coeficiente de escorrentía. El SCS divide este valor de coeficiente según el tipo y uso del suelo de la cuenca, por lo tanto, se manejan distintos valores de coeficientes los cuales dependen del tipo de textura del suelo y uso del mismo (Bateman, 2007). Este coeficiente se denomina un número de curva (CN), el cual se utiliza para identificar la escorrentía media mensual de la zona de estudio, la recarga a los acuíferos y de la humedad del suelo. El CN considera la relación entre el suelo y la respuesta que se presenta sobre la escorrentía de la cuenca, durante un evento de lluvia, afectado por la condición de humedad: seca, normal y húmeda, este valor va de cero a cien, donde cero implica un área sin escurrimiento y 100 una zona que genera escorrentía neta, por tanto, se considera impermeable. (López, L., J., & Cruz, 2016)

Dichos valores se encuentran tabulados dependiendo el tipo de suelo de la zona y el uso de la tierra. (Segovia; s.f.) Y se encuentran en la tabla 3:

Uso de la tierra		Pendiente (%)	Tipo de suelo			
			A	B	C	D
Sin cultivo	Surcos rectos	---	77	86	91	94
		>1	72	81	88	91
		<1	67	78	85	89
Cultivos en surco	Contorneo	>1	70	79	84	88
		<1	65	75	82	86
	Terrazas	>1	66	74	70	82
		<1	62	71	78	81
		>1	65	76	84	88

	Surcos rectos	<1	63	75	83	87
Cereales						
	Contorneo	>1	63	74	82	85
		<1	61	73	81	84
	Terrazas	>1	61	72	79	82
		<1	59	70	78	81
	Surcos rectos	>1	66	77	85	89
		<1	58	72	81	85
Leguminosas o praderas						
	Contorneo	>1	64	75	83	85
		<1	58	72	81	85
	Terrazas	>1	63	73	80	83
		<1	51	67	76	80
Pastizales						
	Contorneo	<1	39	61	74	80
		>1	47	67	81	88
		<1	6	35	70	79
Pradera Permanente		>1	30	58	71	78
Bosques Naturales						
Muy ralo			56	75	86	91
Ralo			46	68	78	84
Normal			36	60	70	77
Espeso			26	52	62	69
Muy Espeso			15	44	54	61
Caminos de terracería			72	82	87	89
Con superficie dura			74	84	90	92

Tabla 3. Valores CN
Fuente: (Hidrología 1: Ciclo Hidrológico)

La condición de humedad del suelo varía de la capacidad de infiltración del mismo, pues esta cambia según la permeabilidad del tipo de suelo y las condiciones de uso del suelo (uso y cobertura vegetal), este método distingue 4 tipos de suelos (A,B,C,D) donde los suelos tipo A

corresponden a suelos arenosos o limo-arenosos con bajo potencial de escurrimiento, son suelos con buen drenaje, aproximado a 7mm/h. Los suelos tipo B tienen tasas de infiltración moderadas y son de tipo limoso. Su drenaje de infiltración oscila en el orden de 3 a 6 mm/h. Los suelos tipo C son aquellos que tienen una baja capacidad de infiltración son limo-arcillosos. Finalmente, los suelos tipo D son aquellos que su capacidad de infiltración es muy baja, su drenaje es del orden de 1mm/h, son suelos muy finos de carácter limoso o arcilloso (López, L., J., & Cruz, 2016).

La clasificación de tipos de suelos se hizo de acuerdo con la información disponible sobre suelos del IGAC y la clasificación de estos realizada por el IGAC de acuerdo con los aspectos de ubicación, pendiente y textura. Lo que se hizo en esencia fue clasificar la textura de los suelos de acuerdo con la clasificación del SCS que divide el tipo de suelos en A, B, C, D. La tabla 4 explica a que corresponde cada clasificación.

Grupo	Infiltración cuando está muy húmedos	Potencia	Textura	Drenaje
A	Rápida	Grande	Arenosa y Areno-limosa	Perfecto
B	Moderada	Media a grande	Franco - arenosa	Bueno a Moderado
			Franca	
			Franco - Arcillosa - Arenosa	
			franco -limosa	
C	Lenta	Media a pequeña	Franco - arcillosa	Imperfecto
			Franco - arcillosa - limosa	
			Arcillo- Arenosa	
D	Muy lenta	Pequeña (horizontes de arcilla)	arcillosa	Pobre o muy pobre

Tabla 4. Clasificación de suelos a efectos del umbral de escorrentía del SCS.

Fuente: (Hidrología 1: Ciclo Hidrológico)

Este modelo es conocido como el método de curva número para representar la escorrentía superficial de una cuenca hidrográfica, este cuenta con dos etapas: cálculo de volumen de escorrentía o lluvia efectiva y estimar el caudal máximo y la forma del hidrograma de crecida.

Determinación del volumen de escorrentía: el volumen de escorrentía expresado en unidades de lluvia efectiva (Q) se calcula mediante la ecuación 7:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Ecuación 7. Ecuación para determinar el volumen de escorrentía.

Donde Q corresponde al volumen de escorrentía, P a la precipitación la cual se encuentra en unidades de mm, la capacidad de retención de agua (s) y las pérdidas iniciales (Ia) las cuales se estiman en un 20% del potencial máximo.

Habiendo reconocido el tipo de suelo y cobertura vegetal, se estableció el valor CN de la cuenca, dividiendo la misma por subcuencas y a cada subcuenca se le estableció los diferentes valores de CN correspondientes, dado que cada subcuenca cuenta con diferentes valores de CN debido a las condiciones de uso de suelo se calculó un solo valor CN para cada subcuenca mediante la siguiente ecuación:

$$CN = \sum_i CN_i * A_i$$

Ecuación 8. Ecuación para determinar el CN general de cada subcuenca.

Luego, se procedió a calcular el potencial de retención de agua es la función de la curva de número y se calcula mediante:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \text{ (mm)}$$

Ecuación 9. Ecuación para determinar el potencial máximo de retención en unidades del sistema internacional. (Soulis & J.D., 2012)

Donde S se encuentra en mm y CN corresponde al factor de curva de número el cual depende del tipo y uso del suelo (Soulis & J.D., 2012) de acuerdo a esto se calcula la abstracción inicial mediante la siguiente ecuación:

$$Ia = 0.2 S$$

Ecuación 10. Ecuación para determinar la abstracción inicial. (Soulis & J.D., 2012)

Seguido de esto se estableció que información de precipitación alimentan de información al modelo de acuerdo al área de influencia de la estación meteorológica sobre la cuenca, para determinar por medio de la ecuación 7 el caudal de la cuenca.

7.3.2.2. Modelo SCS en HEC- HMS

Para realizar la simulación del proceso de precipitación – escurrimiento (lluvia – caudal) se ingresaron los datos obtenidos anteriormente en el programa Hydrologic Engineering Center’s -Hydrologic Modeling System (HEC – HMS), el cual utiliza el método de número de curva para realizar la distribución espacial de los cálculos de infiltración. (López, L., J., & Cruz, 2016), a partir de los datos obtenidos se analizó el comportamiento hídrico de la cuenca en época seca y lluviosa. (López, L., J., & Cruz, 2016)

El funcionamiento adecuado de este programa, requiere el ingreso de los datos de precipitación, tipo de suelo según el SCS (determinado anteriormente) y el área correspondiente para cada subcuenca. El procedimiento que se llevó a cabo fue el siguiente:

- Se determinaron los polígonos de Thiessen y con ellos se estableció el área de influencia de cada estación pluviométrica de la cuenca.

- Después se calculó el área correspondiente para cada subcuenca, comprendiendo que existen polígonos que se encuentran entre dos subcuencas distintas teniendo en cuenta que cada subcuenca tiene un valor de abstracción inicial y CN diferente.
- Se ingresaron los datos de las características biofísicas (área, valor CN, abstracción inicial y tiempo de concentración) en el programa HEC-HMS, para esto se creó una cuenca de entrada que corresponde a la cuenca del Río Lebrija, así mismo dentro de esta se establecieron los diferentes puntos de entrada, teniendo en cuenta las áreas anteriormente calculadas.
- Se ingresaron los datos de precipitación diaria correspondientes a cada estación y con ayuda de diferentes componentes del software, dichas precipitaciones se conectaron con los puntos de entrada que previamente fueron establecidos.
- De acuerdo con todos los datos ingresados previamente se procedió a correr el programa HEC-HMS y se obtuvo el caudal de la cuenca en un periodo de tiempo de enero de 2011 a diciembre de 2016.
- Finalmente, al obtener los caudales de la cuenca Lebrija, se procedió a validar el modelo.

7.3.2.3. Validación/ calibración del modelo SCS en HEC-HMS

En razón de que no se cuentan con aforos en campo a lo largo del río que permitan reconocer los caudales sobre todo el largo de la cuenca, se validó el modelo con el caudal de aforo obtenido por ConocoPhillips observado mediante la ecuación de raíz del error cuadrático medio, esta ecuación permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los valores observados, dicha ecuación se encuentra a continuación:

$$RMSE = \sqrt{\sum \frac{(Q_{sim} - Q_o)^2}{n}}$$

Ecuación 11. Ecuación para calibrar el modelo hidrológico

Donde Q_{sim} son los caudales simulados y Q_o son los caudales observados en un mismo tiempo y n es el número de observaciones en el periodo considerado. Dado a que solo se tiene un solo caudal de aforo se realizó este cálculo con los datos del caudal simulado para la misma fecha del caudal observado por ConocoPhillips en la fecha del 11/03/2015. (Cabrera)

Como solo se encuentra el valor de aforo en una sola fecha y en un solo punto de la cuenca se modificó la ecuación para los datos disponibles y se calibró con estos datos el modelo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{(Q_{sim} - Q_o)^2}{n}}$$

Ecuación 12. Ecuación utilizada para calibrar el modelo hidrológico

El procedimiento que se llevó a cabo fue calcular la media de los caudales simulados para la misma fecha del caudal de aforo y se efectuó la ecuación 12.

Al calibrar el modelo se obtuvo el margen de error y se determinó que los caudales obtenidos son óptimos para el desarrollo del presente proyecto.

7.3.3. Determinar si el caudal disponible de la cuenca del Río Lebrija es óptimo para la demanda hídrica de las actividades de fracturamiento hidráulico en el municipio de San Martín cesar, sin afectar el caudal ambiental de la cuenca.

Finalmente, para cumplir con el objetivo número 3 se procedió a identificar la demanda hídrica diaria de las actividades de fracturamiento hidráulico. Se realizó también la curva de duración de caudales, que sirve para determinar el caudal ambiental del río y si una fuente es suficiente para suministrar la demanda de una actividad o proyecto. (IDEAM, 2014)

Para este caso se realizó de acuerdo a la demanda de uso de agua para las actividades de explotación de hidrocarburos, puesto que se tendrá en cuenta solo la fase de extracción de hidrocarburos de yacimientos no convencionales, la cual corresponde a la fase de inyección de agua, es decir, la fase donde se lleva a cabo el fracturamiento hidráulico. Se determinó la demanda hídrica como el caudal de agua requerido por pozo para su fracturación, teniendo en cuenta que el volúmen de agua utilizado siempre será el mismo porque el agua inyectada para el fracturamiento es tratada y reinyectada en cada uno de los pozos.

7.4. Técnicas utilizadas

1. Cartografía digital (SIG.). (Gaspari , y otros, 2012)
2. Morfometría de la cuenca. (Jiménez Cortes, 2017)
3. Fotointerpretación (Jiménez Cortes, 2017; IGAC)
4. Método lluvia- caudal del SCS. (IDEAM, 2018)
5. Modelo HEC- HMS (IDEAM, 2018)

7.5. Instrumentos

Para obtener los insumos climatológicos necesarios se solicitaron vía web al IDEAM donde proveyeron los datos correspondientes a las estaciones meteorológicas de la categoría pluviométrica que se encuentran dentro de la cuenca del Río Lebrija.

Por otra parte, los insumos cartográficos fueron adquiridos en el IGAC, que corresponde a los mapas temáticos. Para la caracterización topográfica de la zona se utilizó el modelo de elevación digital de 30m el cual corresponde a una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar y caracteriza las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. (Soto & M., 2014)

1. Cartografía digital del área de estudio. Plancha base de la zona 1: 5000.
2. Cartografía del área de estudio.
3. Fotografías aéreas.
4. Software ARGIS.
5. Software HEC-HMS
6. Software de Excel.

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1. *Objetivo 1: Definir la cuenca del Río Lebrija, su ubicación y sus características morfométricas.*

A partir de la espacialización de la cuenca del Río Lebrija mediante el uso de del software ArcGIS y la herramienta Excel fue posible obtener las características morfométricas de la está cuenca que se encuentran plasmados en la tabla 5 y figura 5.

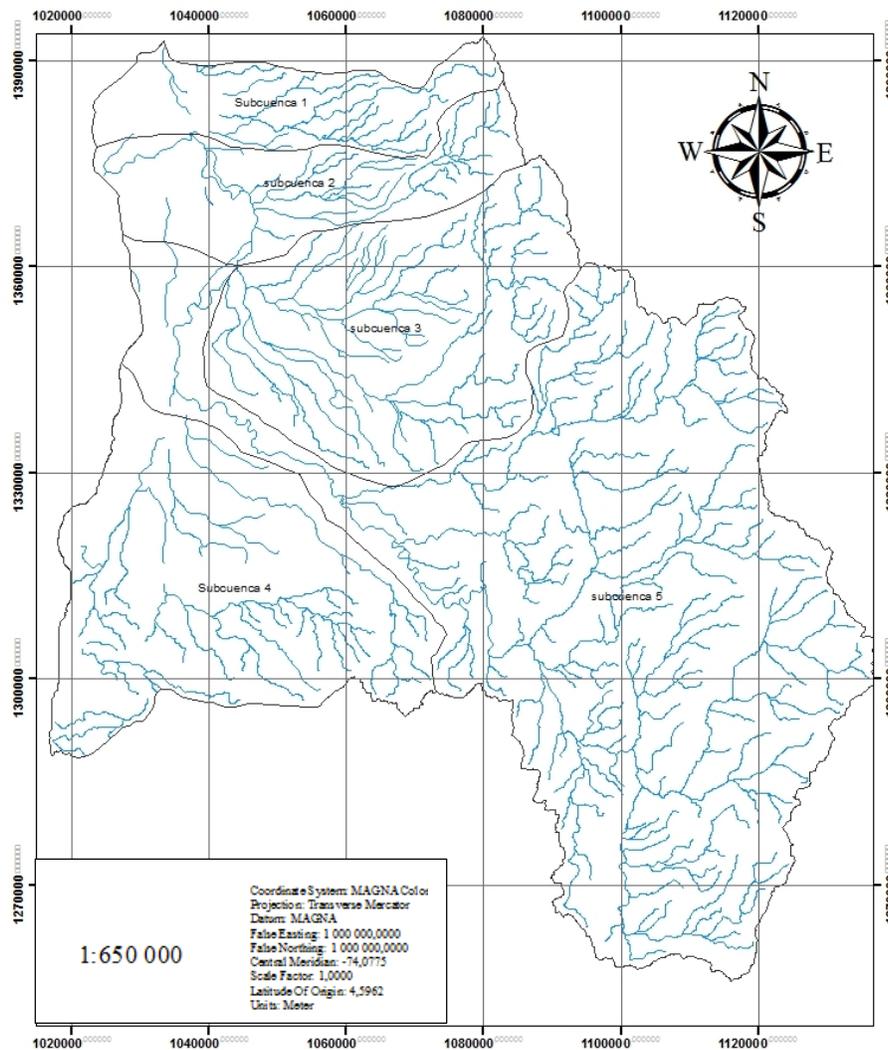


Figura 5. Cuenca Río Lebrija dividida por subcuencas. *MAGNA SIRGAS- BOGOTÁ*
COLOMBIA

Fuente: Shapefiles SIGOT, DEM (USGS EROS archive, s.f.)

Realizado por Autora

Variable	valor
Área (km ²)	9641,82
Perímetro (Km)	557,77
Longitud de Cauce principal (Km)	28,60
Longitud Cauce principal (m)	28600
Longitud de red hídrica (km)	23126.73
Índice de compacidad	1,59
Factor de forma	11,78
Densidad de drenaje (km/km ²)	2,39
Pendiente de la corriente (m.s.n.m)	0.113
Cota máxima de la cuenca (m.s.n.m)	3260
Cota mínima de la cuenca (m.s.n.m)	7
Pendiente promedio de los cauces (%)	16.6975
Tiempo de concentración (minutos)	121.59

Tabla 5. Variables morfométricas de la cuenca.

Para el desarrollo del modelo en el software HEC-HMS fue necesario calcular el tiempo de concentración para cada subcuenca, por ello en la tabla 6 se encuentran los valores de dichos tiempos de concentración:

Subcuenca 1	Valor
Cota máxima de la subcuenca (m.s.n.m)	2295
Cota mínima de la subcuenca (m.s.n.m)	34
Tiempo de concentración (minutos)	139.87
Subcuenca 2	
Cota máxima de la subcuenca (m.s.n.m)	2815
Cota mínima de la subcuenca (m.s.n.m)	7
Tiempo de concentración (minutos)	128.67
Subcuenca 3	
Cota máxima de la subcuenca (m.s.n.m)	1506
Cota mínima de la subcuenca (m.s.n.m)	44
Tiempo de concentración (minutos)	165.43
Subcuenca 4	
Cota máxima de la subcuenca (m.s.n.m)	256
Cota mínima de la subcuenca (m.s.n.m)	47
Tiempo de concentración (minutos)	347.93
Subcuenca 5	
Cota máxima de la subcuenca (m.s.n.m)	3260
Cota mínima de la subcuenca (m.s.n.m)	37
Tiempo de concentración (minutos)	122.027

Tabla 6 Tiempo de concentración de la escorrentía en cada subcuenca

Estos datos fueron calculados a partir de las ecuaciones explicadas en el marco conceptual y el uso de la herramienta Arcgis. Vásquez (2016) asegura que “Los estudios han demostrado que la precisión de los parámetros extraídos de forma automática con los modelos numéricos de terreno es muy similar a la obtenida con métodos manuales” lo que indica confiabilidad sobre los datos obtenidos ya que de realizarse de manera manual se obtendrían valores muy cercanos o los mismos valores.

8.1.1. *Análisis y discusión de resultados objetivo 1*

Una vez obtenidos los resultados se demostró la cuenca del río Lebrija se encuentra ubicada al noroccidente del país, la jurisdicción de esta cuenca corresponde a 3 diferentes corporaciones autónomas regionales las cuales son: Corponor, Corpocesar, y CAS, debido a su gran extensión de 9641,82 Km² que se ubica en los departamentos del Norte de Santander, Santander y Cesar. El Caño Icacal hace parte de la cuenca baja de la cuenca del río Lebrija, este caño corresponde a una bifurcación del Río Lebrija, por ello este Caño, a pesar de pertenecer a una subcuenca del Lebrija, siempre se encuentra alimentado de agua pues se alimenta de escorrentía de las diferentes quebradas y drenajes de su subcuenca y además es una salida de agua del Lebrija. (AnteaGroup & ConocoPhillips, 2017)

Como se evidencia en la figura 5 y la tabla 6, la cuenca de Río Lebrija se divide en 5 subcuencas de acuerdo a la divisoria de aguas. También se puede evidenciar que ninguna de las subcuencas comparte la misma cota máxima y mínima. Esto ocurre en razón de la gran extensión de la cuenca, además el nacimiento de los drenajes de primer orden que la alimentan se ubican en la cordillera oriental y bajan hacia la planicie del valle medio del Magdalena.

Considerando esta diferencia de pendientes y geoformas, se evidenció en los resultados obtenidos que, ellos tienen influencia directa sobre el tiempo de concentración de la cuenca, pues en las zonas más planas el tiempo de recorrido de la precipitación para llegar a la parte más distal de la cuenca es mayor.

Por otro lado, el drenaje principal se encuentra rodeado de un sistema de lagunas y charcas inundables, esto debido a que la cuenca baja del Río Lebrija es una zona demasiado plana con pendientes entre el 1% y 3%, sin embargo, estas lagunas tienden a colmatarse debido al transporte de sedimentos que transportan los drenajes desde la cuenca alta.

En cuanto a las características morfométricas de la cuenca, de acuerdo a las afirmaciones de Vásquez y otros, (2016) en el libro *Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas*, la cuenca del Río Lebrija se caracteriza por tener una forma oval redonda – oval oblonga, ello indica menor retención y susceptibilidad a crecidas; del mismo modo, la cuenca se caracteriza por tener una forma alargada, dado que su factor de forma es un valor mayor a 1, haciéndola susceptible a inundaciones.

Dichas inundaciones se ven reflejadas en los terrenos de inundación aledañas al cauce principal, lo que se relaciona también con el terreno plano de esta región, especialmente en el norte de la cuenca, en la jurisdicción del municipio de San Martín, Cesar, donde se encuentra un sistema de lagunas inundables.

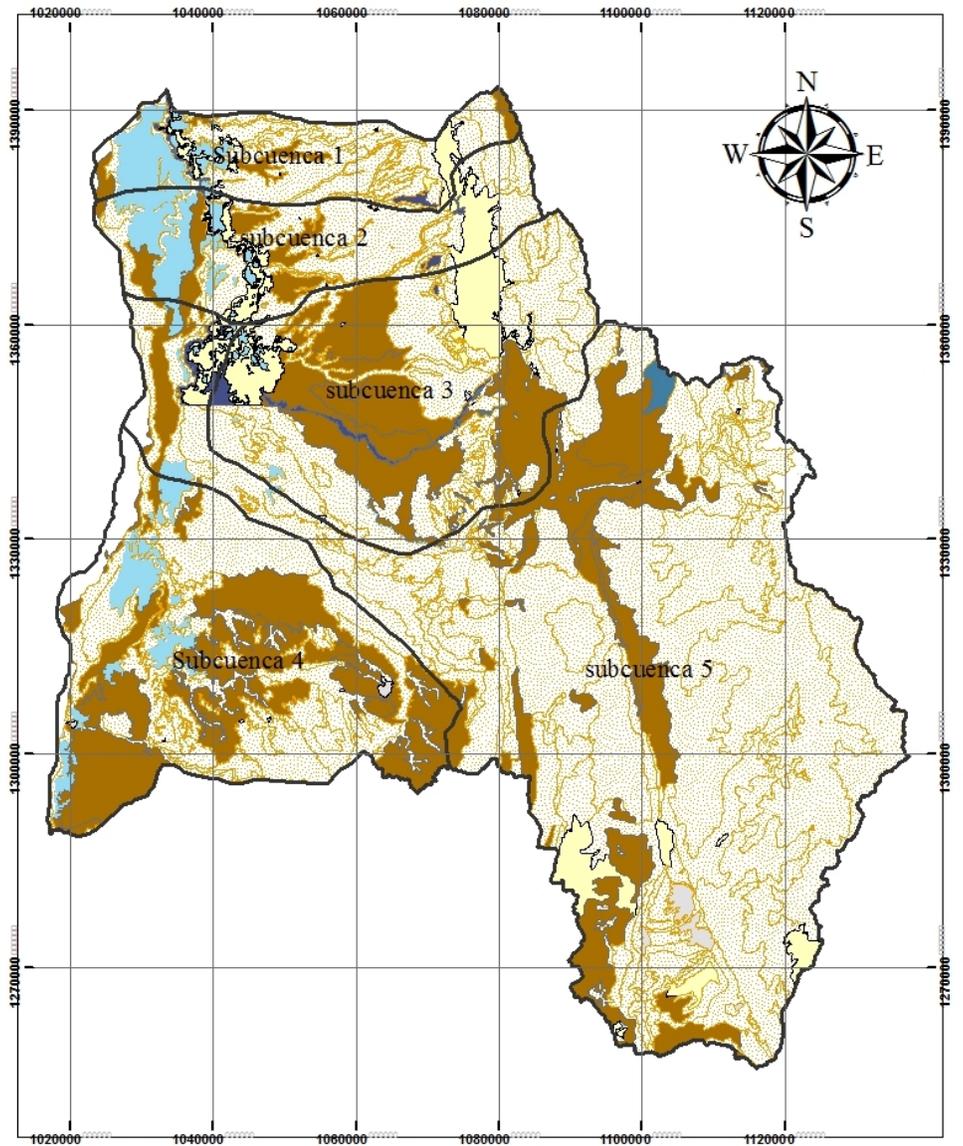
En relación a la densidad de drenaje de la cuenca que corresponde a un valor de 2,39 km/km² indica que la cuenca cuenta con un buen drenaje. (Vásquez, 2016)

8.2. *Objetivo 2: Determinar la oferta hídrica de la cuenca del río Lebrija a partir del modelo Lluvia – caudal de Soil conservation Services.*

La determinación de la oferta hídrica de la cuenca se realizó a partir del método lluvia- caudal del SCS; para ello fue necesario reconocer el tipo de suelo de acuerdo a la textura del mismo que se encuentra dentro de la cuenca.

Para tal fin, se hizo uso de los mapas de suelos, donde se encuentran clasificados el tipo de suelo de acuerdo a sus grupos taxonómicos y perfiles de los mismo de los departamentos de Cesar, Santander y Norte de Santander obtenidos en el IGAC, que permitieron identificar el grupo de suelos que se encuentra dentro de la cuenca. En cuanto a los suelos del departamento del Cesar, estos fueron divididos por el tipo de textura (según el triangulo de textura USDA): arcillosos, francos, limosos y arenosos, puesto que estos no se encontraban divididos según su textura.

En última instancia, con ayuda del Software Arcgis se cargaron los shapefiles obtenidos en el portal Web del IGAC y se agregaron en las correspondientes tablas de atributos las características faltantes. En la figura 6 se encuentran la división de la cuenca de acuerdo a la textura del suelo y de igual forma a la división de textura de acuerdo al SCS.



Coordenado System: MAGNA Colombia Bogota
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: MAGNA
 False Easting: 1 000 000,0000
 False Northing: 1 000 000,0000
 Central Meridian: -74,07715
 Scale Factor: 1,0000
 Latitude Of Origin: 4,5942
 Units: Meter

1:650 000

Figura 6. Textura suelos de Cuenca Río Lebrija de acuerdo a SCS.
 Fuente. Información y shapefiles (IGAC). Delimitación de la cuenca SIGOT.

Mapa: Realizado por Autora

El área correspondiente a cada tipo textura se encuentra en la tabla 7

Porcentaje de textura de suelo sobre la cuenca		
Tipo de suelo SCS	Área en KM	Porcentaje sobre la cuenca
A	54.44	1%
B	5944.5458	62%
C	2483.9237	26%
D	422.3664	4%
Zona Urbana	139.5928	1%
Cuerpos de agua	596.8824	6%
Total área de la cuenca	9641.75102	100%

Tabla 7. Áreas para cada tipo de suelo sobre la cuenca

8.2.1.1. *Análisis y discusión resultados Textura suelos*

La textura de los suelos va directamente relacionada con la escorrentía en la cuenca. En suelos arenosos la capacidad de infiltración es mayor y en suelos arcillosos, la capacidad de infiltración es la menor.

La infiltración se entiende como el proceso por el cual el agua circula a través del perfil de suelo desde la superficie terrestre hasta los acuíferos subterráneos, este proceso mantiene el caudal un río en periodos de sequías. (Ruiz & Martinez, 2015)

En primera instancia, se evidencia en la cuenca baja en las zonas aledañas a los cuerpos de agua suelos arcillosos, los cuales son los que tienen la menor capacidad de drenaje dado que su capacidad de infiltración es muy lenta, además, estos corresponden a llanuras aluviales es decir suelos inundables, lo que indica que sobre estos en eventos de crecidas de agua pueden llegar a inundarse y ampliar el área de cuerpos de agua. (Hidrología 1: Ciclo Hidrológico)

En cuanto a las áreas correspondientes a los diferentes tipos de suelos se puede evidenciar que los suelos tipo A son los que tienen menor influencia sobre la totalidad de la cuenca (1%), siendo así solo un área de 54.4 Km² lo que indica que áreas con infiltración de agua rápida y llegada directa a acuíferos subterráneos es baja. Respecto a los suelos tipo B, que se clasifican como el tipo de suelo que tiene mayor influencia sobre la cuenca (62%) indica que son suelos con capacidad de infiltración moderada, lo que resulta es favorable para la llegada de agua superficial al cauce principal y agua superficial disponible en la cuenca (López, L., J., & Cruz, 2016)

En relación a los suelos tipo C que corresponden al 4% de área sobre la cuenca, son suelos que tienen una capacidad de infiltración lenta. No obstante, en este tipo de suelos se puede asegurar infiltración, a diferencia de los suelos tipo D donde la capacidad de infiltración es muy pobre. Por tanto, en este tipo de suelos al ser arcillosos cuando se presentan eventos de lluvia las arcillas se hinchan y ello inhibe la infiltración. (Ruiz & Martinez, 2015)

En cuanto las zonas urbanas que corresponden al 1% la infiltración en estas zonas es nula debido a que el concreto y materiales de construcción son impermeables, por lo tanto impermeabilizan el terreno. (Ruiz & Martinez, 2015)

El uso actual del suelo se reconoció a partir de fotointerpretación se utilizó la imagen satelital *landsat* obtenida vía web de la página *libra*, esta fue georreferenciada en el programa *Arcgis* de acuerdo a la ubicación de la cuenca y para luego crear los polígonos correspondientes a cada uso del suelo.

En la figura 7. se encuentra la división de la cuenca de acuerdo al uso de suelos según la clasificación de SCS:

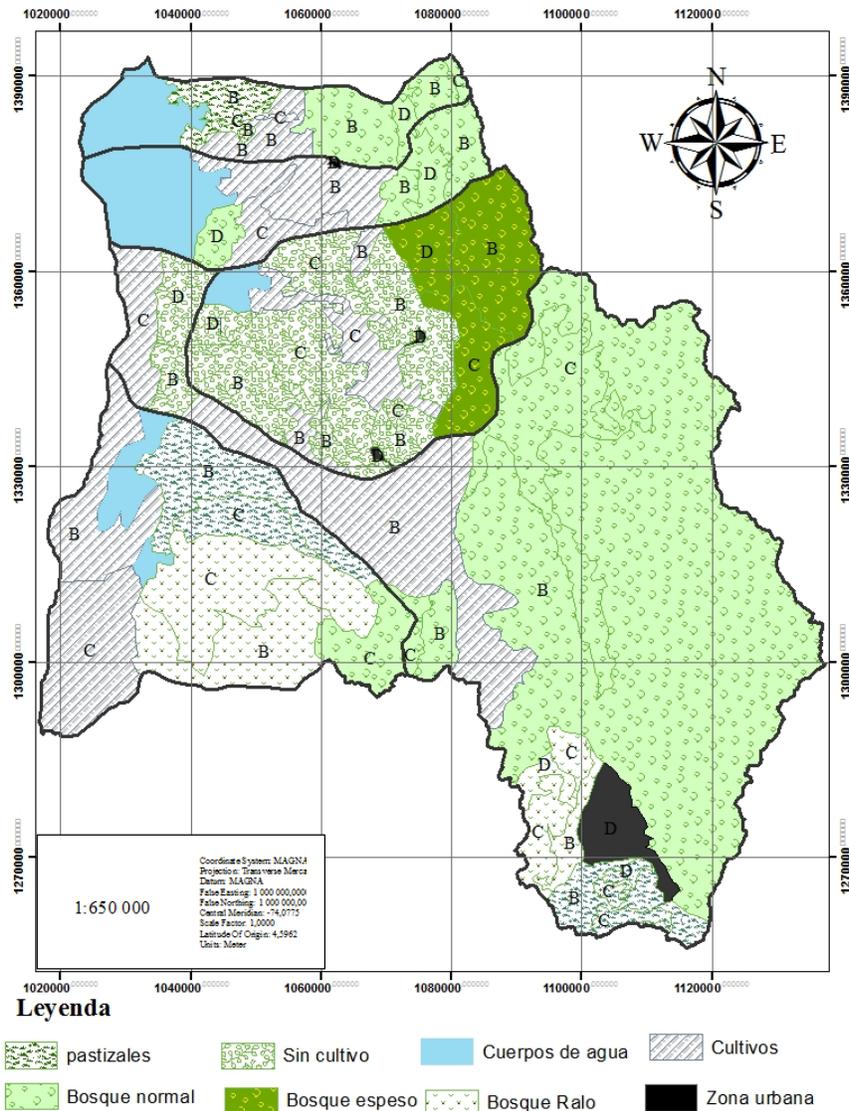


Figura 7. Uso de suelos de cuenca Río Lebrija *MAGNA SIRGAS- BOGOTÁ COLOMBIA*
 Fuente. Fotografías aéreas obtenidas de *Libra* (developmentseed, s.f.). Delimitación de la cuenca (SIAC, 2013).

Mapa: Realizado por Autora

El área correspondiente a cada uso del suelo en la cuenca se encuentra en la tabla 8

Porcentaje de Uso del suelo sobre la cuenca		
Uso y cobertura de la tierra	Área en KM	Porcentaje sobre la cuenca
Bosque Normal	3879.1551	40%
Bosque espeso	512.2663	5%
Bosque ralo	868.1500	9%
Cultivos	1954.9823	20%
Sin cultivos	1020.4126	11%
Pastizales	670.3095	7%
Cuerpos de agua	596.8824	6%
Zona Urbana	139.5928	1%
	9641.7510	100%

Tabla 8. Área de usos del suelo de la cuenca

8.2.2. Análisis y discusión resultados uso de suelo

En lo correspondiente al uso del suelo, se evidenció que en la cuenca existen diferentes sistemas de bosques normales, bosques espesos y bosques ralos, específicamente en un 54% del área total de la cuenca.

La presencia de cobertura vegetal asegura el control de la escorrentía durante mayores periodos de tiempo en comparación a zonas donde no existe cobertura vegetal pues esta ayuda a retener el agua en periodos de lluvias y liberarla lentamente a lo largo del año. Sin embargo, la presencia de bosques no influye sobre la permeabilidad del suelo ni en la velocidad de escorrentía, por esto, (Gallart & Llorents, s.f.) asegura que el retraso de la escorrentía en zonas boscosas no debe atribuirse a una menor velocidad de la escorrentía superficial (que no suele producirse), sino al hecho de que los suelos forestales suelen estar normalmente más secos que los pastos, de modo que requieren mayores volúmenes de precipitación antes de generar respuesta hidrológica. (p.3).

De acuerdo a las afirmaciones de Gallart & Llorents, la respuesta hidrológica de la cuenca alta puede tardarse más y requerir altos volúmenes de precipitación debido a que esta zona de la cuenca corresponde a la zona donde se encuentra mayor densidad de cobertura vegetal.

Estas cubiertas vegetales protegen la cuenca ante crecidas, pero dicha protección decrece al aumentar la magnitud del evento como se ocurrió en el fenómeno de la niña del 2011, donde el río Lebrija aumento su caudal inundando las llanuras aluviales de la cuenca y así mismo aumentando bifurcaciones drenaje. (Dirección de Gestión del Riesgo - Ministerio de Interior y Justicia, 2011)

En cuanto a los usos del suelo para actividades socioeconómicas, en primer lugar se reconoció que un 27% del área total de la cuenca corresponde a suelos utilizados para el desarrollo de actividades como cultivos y pastoreo. La influencia de esto sobre la escorrentía de la cuenca indica que los cultivos, al igual que los bosques, tienden a retener el agua; pero esto depende mayormente del tipo de cultivo. En razón de esto el tiempo de retención varía, al igual que la retención de agua por parte de un cultivo es menor con respecto a la de los bosques.

En cuanto a la infiltración en las zonas urbanas, como se explicó anteriormente, el valor de esta es nulo. En consecuencia, la esorrentía hacia la cuenca baja es mayor en estas zonas ya que no existe ningún elemento que retenga el agua. (Ruiz & Martinez, 2015). Las zonas urbanas que se encuentran sobre la cuenca, corresponden a la ciudad de Bucaramanga que tiene un área total 162 km² correspondiente al 1% del área de la cuenca.

La textura del suelo se relacionó con el uso actual del suelo para así determinar los distintos valores de CN de la cuenca que determinan la escorrentía de la misma, en la figura 8 se encuentra la cuenca dividida de acuerdo a los valores CN.

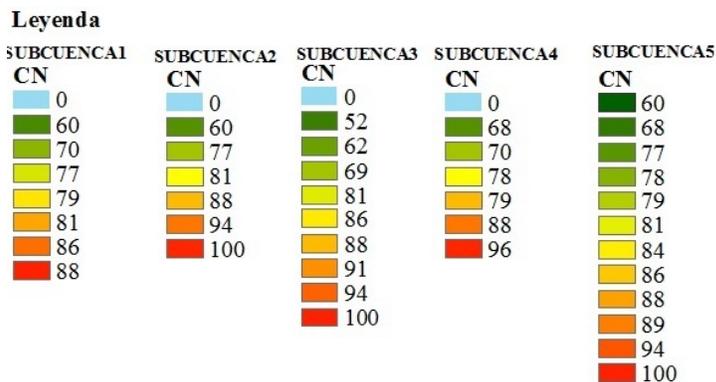
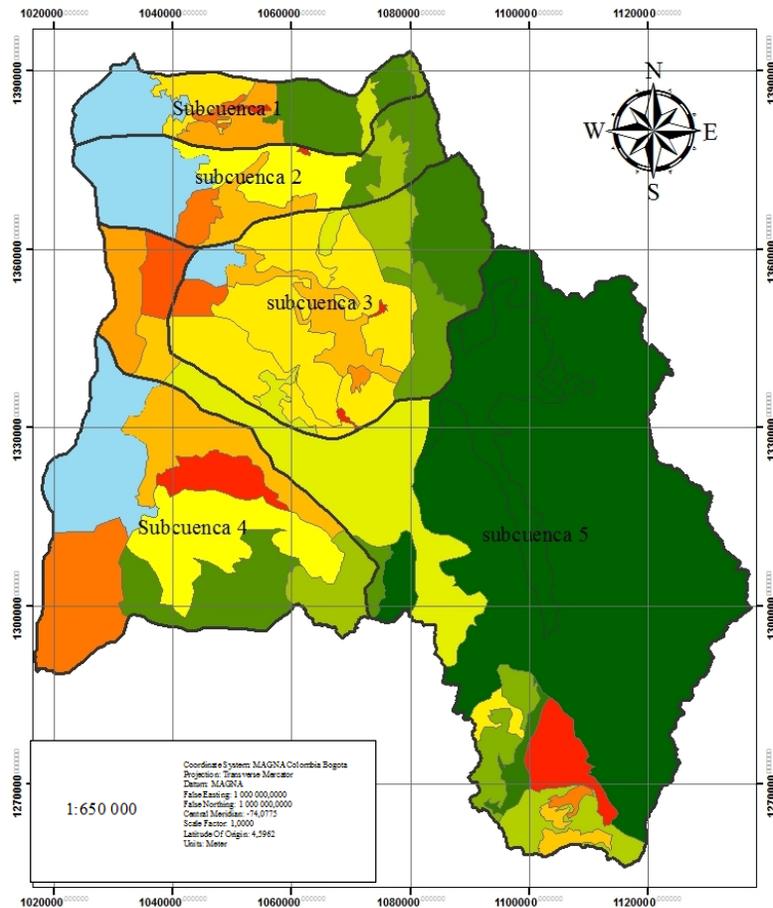


Figura 8. Valores CN de cuenca Río Lebrija *MAGNA SIRGAS- BOGOTÁ COLOMBIA*
Fuente. Delimitación de la cuenca SIGOT.

Mapa: Realizado por Autora

Como se evidenció en la figura 8, las zonas con mayor infiltración de agua se encuentran en la cuenca Alta del Lebrija, esto se relaciona con el tipo de suelo de la cuenca como lo muestra en

la figura 6, en la que el tipo de suelo de esta zona corresponde a suelos arenosos, franco-arenosos y francos.

Se determinó además que, a medida que la cuenca va disminuyendo sus pendientes se evidenció menor capacidad de infiltración del agua, es decir que en la cuenca media la infiltración es menor a la cuenca alta y así mismo en la cuenca baja la infiltración es la más baja.

Esto, puesto que las pendientes de la cuenca alta son pronunciadas, lo que afecta la velocidad de flujo del agua. Esta es mayor al igual que el transporte de sedimentos, por lo tanto en esta zona los suelos suelen tener partículas más gruesas, que al descender por la escorrentía de la cuenca se van quebrando y minimizando su tamaño de partícula, así, cuando estas partículas llegan a la cuenca baja su tamaño se ha reducido considerablemente hasta tener la finura característica de una arcilla, por ello en la cuenca baja la infiltración es muy baja, dada la sedimentación de estas partículas. Este fenómeno da lugar a las lagunas inundables características de la cuenca baja.

La tabla 9 Se encuentran los valores de CN para cada subcuenca del Lebrija y el área correspondiente para cada valor y su porcentaje en cada subcuenca.

CN Subcuenca 1				
Uso y cobertura de la tierra	área km	Porcentaje	CN	Tipo suelo SCS
Cuerpos de agua	167.2371	27%	0	Agua
Bosque normal	151.3015	24%	60	B
Bosque normal	45.6283	7%	60	B
Bosque normal	13.2671	2%	70	C
Bosque normal	27.2850	4%	77	D
pastizales	89.4910	14%	79	B
pastizales	2.3637	0%	79	B
cultivos	102.7593	17%	81	B
pastizales	15.0166	2%	86	C
cultivos	5.0965	1%	88	C
TOTALES	619.4461	100%		
CN Total Subcuenca 1				
51.93				
CN Subcuenca 2				
Uso y cobertura de la tierra	área km	Porcentaje	CN	Tipo suelo SCS
Cuerpos de agua	270.4391	33%	0	Agua
Bosque normal	94.3031	12%	60	B
Bosque normal	38.6254	5%	60	B
Bosque normal	59.6727	7%	77	D
Cultivos	203.5414	25%	81	B
Cultivos	93.0221	11%	88	C

Bosque normal	50.7145	6%	94	D	
Zona urbana	1.6862	0.21%	100	ZU	CN Total Subcuenca 2
TOTALES	812.0044	100%			51.94
CN Subcuenca 3					
Uso y cobertura de la tierra	área_km	Porcentaje	CN	Tipo suelo SCS	
Cuerpos de agua	49.1668	3%	0	Agua	
Bosque espeso	260.1753	16%	52	B	
Bosque espeso	151.0708	9%	62	C	
Bosque espeso	101.0203	6%	69	D	
Cultivos	21.2800	1%	81	B	
Cultivos	36.0005	2%	81	B	
Sin cultivo	355.2279	21%	86	C	
Sin cultivo	201.0222	12%	86	B	
Sin cultivo	40.3119	2%	86	B	
Sin cultivo	59.0894	4%	86	B	
Sin cultivo	164.5022	10%	86	B	
Cultivos	157.8456	10%	88	C	
Sin cultivo	11.0696	1%	91	C	
Sin cultivo	45.1623	3%	94	D	
Urbano	2.7653	0.17%	100	ZU	CN Total Subcuenca 3
Urbano	3.9104	0.24%	100	ZU	75.23
TOTALES	1659.6205	100%			
CN Subcuenca 4					
Uso y cobertura de la tierra	área_km	Porcentaje	CN	Tipo suelo SCS	
Cuerpo de agua	20.6335	1%	0	Agua	
Cuerpo de agua	89.4059	5%	0	Agua	
Bosque ralo	282.4418	16%	68	B	
Bosques normal	138.8812	8%	70	C	
Bosque ralo	372.2758	20%	78	C	
Pastizales	262.3741	14%	79	B	
Cultivos	239.4919	13%	81	B	
Cultivos	302.3038	17%	88	C	
Pastizales	108.9358	6%	96	C	CN Total Subcuenca 4
TOTALES	1816.7438	100%			74.39
CN Subcuenca 4					

Uso y cobertura de la tierra	área km	porcentaje	CN	Tipo suelo SCS	
Bosque normal	2738.2940	58%	60	B	
Bosque normal	69.3796	1.47%	60	B	
Bosque normal	420.4089	9%	60	C	
Bosque Ralo	53.2814	1.13%	68	B	
Bosque normal	31.3937	0.66%	77	C	
Bosque Ralo	124.8606	2.64%	78	C	
Pastizales	131.4561	2.78%	79	B	
Cultivos	654.6656	14%	81	B	
Bosque Ralo	35.2904	0.75%	84	D	
Pastizales	12.4280	0.26%	86	C	
Pastizales	31.8440	0.67%	86	C	
Sin cultivo	57.2061	1.21%	86	B	
Cultivos	138.9755	2.94%	88	C	
Pastizales	16.4002	0.35%	89	D	
Sin cultivo	86.8210	1.83%	94	D	
Urbano	131.2309	2.77%	100	ZU	CN Total Subcuenca 5
TOTALES	4733.9361	100%			67.50
Cuenca Lebrija					
	área km	Porcentaje			
subcuenca 1	619.4461	6%			
subcuenca 2	812.0044	8%			
subcuenca 3	1659.6205	17%			
subcuenca 4	1816.7438	19%			
subcuenca 5	4733.9361	49%			
TOTALES	9641.7510	100%			

Tabla 9. Valores CN para las subcuencas de la cuenca de Río Lebrija Realizada por Autora.

Al obtener el valor CN se procedió a calcular el valor S de cada subcuenca para así mismo calcular la abstracción inicial y proceder a determinar el caudal correspondiente a cada zona de la cuenca con ayuda del programa HEC-HMS.

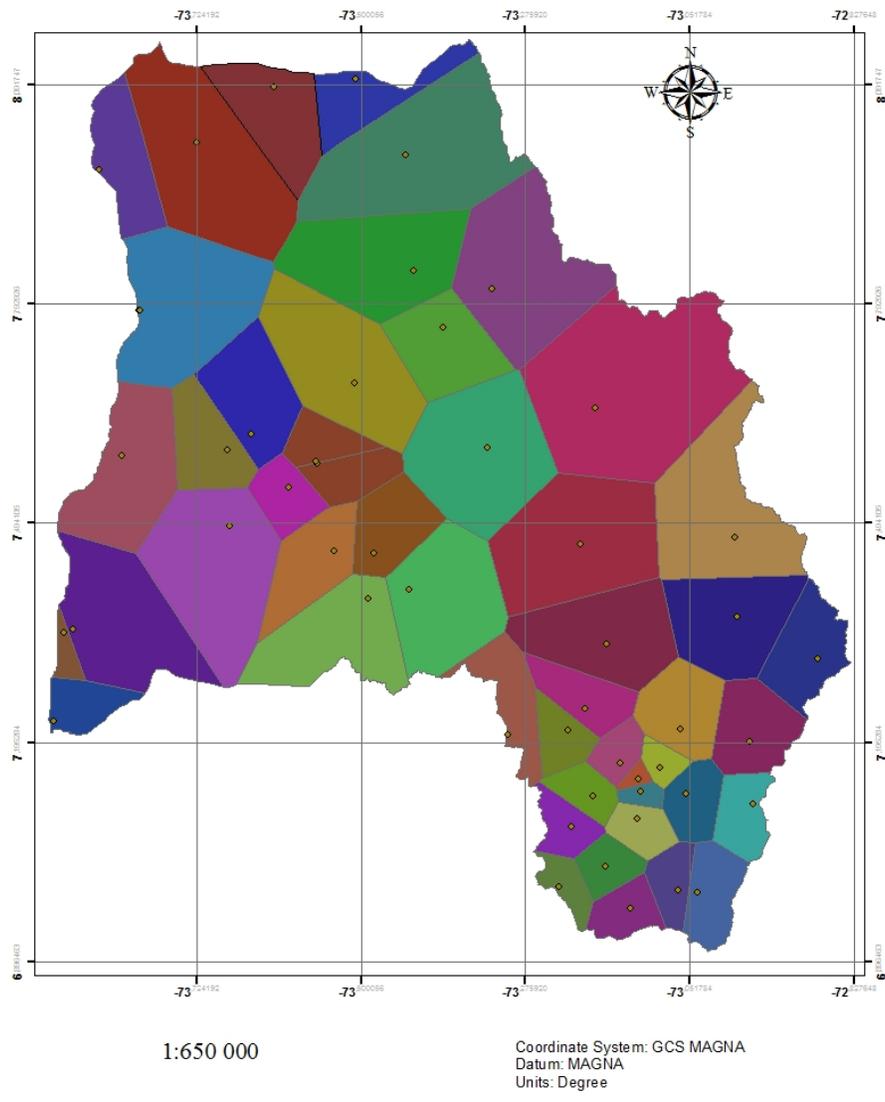
Subcuenca	Valor CN	Valor S (mm)	Abstracción Inicial
Subcuenca 1	51.93	235.12	47.0240
Subcuenca 2	51.94	235.03	47.0052
Subcuenca 3	75.23	83.63	16.7263
Subcuenca 4	74.39	87.44	17.4887
Subcuenca 5	67.5	122.30	24.4593

Tabla 10. Valores de CN, S= potencial máximo de retención y de abstracción Inicial para cada subcuenca de la cuenca Río Lebrija.

Realizada por Autora.

La abstracción inicial se considera como el volumen de agua que no escurre directamente, es decir aquel volumen de agua que dadas a las características de textura y uso de suelo mencionadas anteriormente es retenido. Tal fenómeno se relaciona y se entiende de acuerdo a lo explicado anteriormente en el análisis de textura y uso del suelo.

Como se explicó en la metodología fue necesario crear polígonos de Thiessen para ubicar el área correspondiente para cada estación meteorológica, en la figura 9 se encuentra el mapa de dichos polígonos.



Legenda

- | | | | | | |
|----------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|------------------|--------------------|
| Estaciones Meteorológicas | EL CAOBO | EL PLAYON | LLANO DE PALMAS | PALOGORDO | SAN DANIEL |
| Poligonos de Thiessen | EL CONQUISTADOR | EL PROVENIR | LLANO GRANDE | PATUIRA | SAN RAFAEL |
| | EL ESTABLO | ELOY VALENZUELA | LOS ANGELES | PIE DE CUESTA | STIO NUEVO |
| | APTO PALONEGRO | LA COQUERA | LOS PLANES | PORTACHUELO | TONA |
| | BADILLO | LADORADA | MAGARA | PROVINCIA | UNIV IND SANTANDER |
| | BARRANCA LEBRIJA | LA FLORESTA | MAJADAS | PUERTO WILCHES | VETAS EL POZO |
| | BUCARAMANGA IDEAM | LA GLAMCIA | MATAJAIRA | PUERTO WILCHES1 | VILLA LEIVA |
| | CACHIRI | EL PANTANO | PALMAS | SABANA DE TORRES | VVERO SURATA |
| | | EL PAPAYAL | | SAN ALBERTO | |
| | | LA LAGUNA | | | |
| | | | | | |

Figura 9. Cuenca Río Lebrija dividida polígonos de Thiessen. CGSMAGNA
Fuente: SIAC, shapefile estaciones IDEAM (SIAC, 2013)
Realizado por Autora

Tras ingresar los datos necesarios para el modelamiento hidrológico de la cuenca en el programa HEC-HMS se procedió a correr el programa de donde se obtuvieron los datos de los caudales diarios del Río Lebríja, los cuales se encuentran expresados en la tabla 11

Caudales Lebríja diarios 2011													
Día	Q(m ³ /s)												
1	0.04	8.8	988.2	630.6	608.4	2024.9	1176.3	1354.2	379.5	318.7	776.1	1330.2	
2	0.03	4.2	1726.5	807.2	1122.9	2149.9	1065.0	795.1	451.1	580.8	465.5	1007.6	
3	1.1	2.5	1673.8	1203.1	1050.5	1799.9	1085.4	1570.0	691.4	743.8	774.6	1275.8	
4	10.8	30.5	1737.2	1020.1	815.6	1452.3	906.4	864.7	423.0	1391.3	2146.9	1560.2	
5	17.9	13.3	883.2	945.4	1160.7	1186.5	1673.7	570.1	286.8	1043.2	1523.9	1425.3	
6	35.0	8.0	832.8	1128.3	1146.0	1002.7	833.2	397.2	171.1	1338.8	1026.8	1295.5	
7	81.5	22.0	642.6	1102.0	599.8	1076.8	902.9	249.9	527.4	990.3	1012.5	3007.2	
8	173.1	283.0	705.3	1646.0	495.1	604.4	623.7	150.2	1058.5	755.5	1666.8	3562.4	
9	114.2	997.3	992.4	1764.3	365.3	367.2	439.6	199.7	1420.4	1497.9	1521.7	2220.4	
10	93.4	681.3	1646.7	2958.7	387.5	226.4	1620.7	349.8	681.2	1963.0	1055.1	1286.5	
11	49.9	385.7	826.0	1787.4	386.2	192.6	947.5	299.3	485.0	1647.5	1993.6	1556.0	
12	29.4	782.1	515.2	1819.5	754.8	170.1	1235.9	619.1	426.1	2862.6	2469.8	1885.0	
13	20.0	708.7	308.5	2476.6	1357.1	146.0	1157.3	343.7	421.0	3392.9	1505.0	2263.1	
14	11.3	914.4	184.2	1443.9	2266.2	259.2	2144.1	985.4	355.6	2385.2	1491.2	1718.3	
15	31.3	551.1	184.3	1281.1	1367.0	241.6	1705.3	930.2	223.2	1992.8	1676.7	1556.8	
16	102.0	702.9	114.2	2719.8	1900.2	710.1	951.4	725.6	668.6	1369.4	2107.7	1481.8	
17	328.7	1172.5	67.4	1533.1	2751.4	577.4	723.2	881.5	843.4	1121.2	2847.1	1597.1	
18	239.0	1000.4	78.2	1842.6	1767.7	509.3	922.4	2122.8	1748.9	1155.4	2776.3	1222.2	

19	120.5	791.9	227.0	2312.6	1211.2	652.5	824.0	1976.8	1175.0	1039.4	2962.6	1473.7
20	72.3	450.3	629.6	2307.6	1320.1	578.3	693.4	1317.2	1782.4	764.5	2556.0	875.7
21	43.1	376.7	742.3	2137.8	921.6	431.1	416.6	2123.0	938.9	566.8	2392.0	524.5
22	62.9	223.3	1238.4	1417.7	2194.7	368.0	296.0	1556.4	568.7	332.5	1744.0	326.1
23	31.1	359.7	743.6	1347.3	1688.1	820.5	323.1	1441.6	443.6	233.3	1453.4	190.1
24	18.7	365.1	483.8	1140.2	1059.4	1128.8	783.6	2050.8	385.7	280.5	1469.9	171.6
25	11.2	517.4	872.9	1261.8	1348.8	1365.1	563.0	1554.4	353.0	882.1	1707.5	91.5
26	13.8	322.1	469.0	834.6	1872.9	795.6	736.7	1044.7	477.8	872.0	1370.8	55.4
27	7.4	212.5	572.3	732.3	1951.4	741.8	1273.6	719.5	253.6	580.2	1270.5	137.5
28	4.5	488.8	434.5	1605.8	1469.1	469.8	876.6	565.9	173.3	1129.5	1183.2	330.7
29	2.7		921.4	985.5	1088.1	684.7	671.4	335.6	667.1	775.7	1052.5	269.4
30	9.2		505.5	951.6	1286.9	895.6	1320.5	305.7	332.3	2223.4	902.0	151.0
31	4.5		420.2		1458.4		1174.1	173.7		1296.8		93.1

Tabla 11. Caudales totales Río Lebríja periodo 2011

Caudales Lebríja diarios 2012		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiem bre	Octubre	Noviem bre	Diciemb re
Día	Q(m ³ /s)												
1	75.4	80.3	57.7	555.8	578.6	314.5	394.6	269.9	488.7	329.4	418.0	769.0	
2	168.8	47.0	102.5	966.0	494.7	871.0	434.4	170.2	920.4	460.5	751.0	846.0	
3	902.0	27.6	82.5	663.9	1035.9	453.5	1543.8	200.0	565.7	1071.7	798.2	1091.0	
4	527.1	112.1	680.3	911.9	2324.7	422.3	1510.0	286.4	387.5	1063.3	774.5	593.0	
5	510.6	425.3	352.2	1192.5	1343.1	264.3	793.9	824.2	370.8	1287.6	453.2	476.3	
6	260.7	193.6	217.7	1178.2	1184.2	159.6	606.4	1137.8	534.2	1075.0	369.2	348.4	
7	184.6	115.2	170.7	1758.3	884.4	124.3	424.0	858.2	315.1	810.2	215.7	223.8	

8	109.1	131.3	572.4	1940.6	1023.7	159.2	297.0	643.1	426.7	942.6	258.9	132.9
9	95.5	160.6	342.3	1387.7	749.2	495.6	610.3	734.0	375.8	898.3	313.9	79.0
10	110.7	256.0	210.3	2506.0	1408.5	1018.9	698.4	654.3	300.3	560.7	735.8	46.8
11	132.3	392.8	171.8	1983.2	1084.8	1661.2	1666.2	754.7	547.5	950.5	912.3	101.8
12	109.8	311.3	229.3	2235.9	971.2	1327.2	1079.2	1869.6	1126.3	2619.7	557.2	752.4
13	110.2	175.0	130.8	2019.6	660.3	1097.8	1404.9	1634.4	691.7	1472.3	668.1	1527.3
14	65.4	102.2	278.2	1131.6	627.1	1158.2	788.2	889.1	438.5	961.2	1801.1	819.2
15	46.1	60.6	347.6	843.3	699.2	2374.5	560.0	630.1	276.5	713.6	1945.1	520.9
16	45.9	59.4	639.8	969.1	545.8	1187.0	361.4	426.9	454.0	891.6	1154.0	307.1
17	153.3	54.9	579.0	1908.9	624.5	821.5	366.2	417.7	494.8	926.5	1903.2	190.4
18	257.9	30.2	595.8	1991.8	2017.6	706.7	641.5	335.2	673.7	954.8	1159.7	174.2
19	280.6	76.6	408.8	1664.2	1197.1	678.9	509.2	330.9	433.6	840.0	679.7	141.6
20	139.8	40.8	811.2	1331.8	1406.6	1015.6	411.5	434.0	864.2	598.5	601.8	76.7
21	82.4	54.0	1238.5	1088.8	818.3	570.4	224.6	728.0	1579.2	857.5	1155.8	68.8
22	78.1	42.1	589.4	1087.2	596.1	759.3	245.8	701.5	794.1	704.8	1158.3	123.4
23	335.5	128.3	471.8	1335.5	756.7	557.9	222.3	685.2	929.6	860.4	637.8	281.9
24	692.9	199.2	1657.6	989.7	554.3	505.5	204.3	1073.0	1048.8	1324.8	617.3	327.2
25	325.4	94.1	2467.4	902.8	483.0	429.7	176.7	805.6	831.2	814.4	399.6	358.9
26	277.8	139.8	1263.9	1365.9	576.6	555.6	143.1	605.2	668.0	953.0	254.5	186.8
27	193.3	78.2	1059.0	1098.6	429.4	317.0	524.6	419.9	517.4	789.2	396.8	110.4
28	243.4	110.9	748.3	1597.7	377.8	271.8	515.1	434.1	301.8	979.6	212.2	188.0
29	320.4	82.8	1029.3	1084.3	560.9	840.5	649.7	449.6	226.1	889.1	614.8	90.3
30	246.8		581.5	951.0	314.5	725.1	639.3	500.5	442.1	1186.9	858.0	63.9
31	135.4		506.8		204.9		327.1	511.5		662.7		36.3

Tabla 12. Caudales totales Río Lebríja periodo 2012

Caudales Lebrija diarios 2013		enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiem bre	octubre	noviem bre	diciemb re
Día	Q(m ³ /s)												
1	20.5	449.9	1155.6	616.7	1468.8	477.0	322.4	459.7	736.8	731.5	658.4	878.2	
2	12.3	468.4	841.8	347.6	952.8	475.0	437.9	456.6	1038.9	1682.4	790.2	548.9	
3	7.3	359.3	1275.7	396.3	1069.6	842.9	678.0	491.2	753.7	1281.9	1487.9	587.9	
4	4.4	681.0	1188.0	914.0	1850.0	487.2	1068.1	529.3	682.0	797.9	1086.9	473.4	
5	2.6	589.6	690.5	894.6	1538.7	1001.0	559.1	810.0	1165.3	536.3	1717.0	471.8	
6	1.6	910.0	799.8	856.2	1041.4	503.0	512.7	1256.8	1183.6	471.2	1335.1	487.4	
7	0.9	1055.5	631.5	827.9	842.5	315.8	510.8	1797.3	1487.4	782.1	883.8	471.0	
8	0.6	1006.5	668.7	738.7	1430.3	199.8	566.7	1509.2	1076.7	661.2	920.9	350.7	
9	0.3	773.5	459.9	921.3	985.2	901.4	536.6	2236.2	785.3	427.0	619.7	208.3	
10	2.6	549.8	703.6	470.6	633.2	1382.0	688.7	2504.1	965.3	991.3	339.2	122.3	
11	1.1	368.2	568.9	398.8	558.2	703.6	393.9	1452.6	1741.9	1320.5	617.0	218.1	
12	14.8	224.2	835.4	238.6	916.1	533.4	327.9	946.5	988.4	1652.6	549.8	106.8	
13	27.1	363.7	935.0	742.6	747.8	960.9	194.0	566.9	588.6	1494.3	315.0	64.2	
14	17.7	256.8	1310.8	639.5	1155.4	649.3	209.5	813.0	360.0	1654.4	272.9	38.9	
15	11.9	425.7	978.1	846.4	1471.7	576.4	187.4	770.0	263.9	1346.5	316.0	171.1	
16	26.9	1846.2	890.4	782.5	914.8	419.5	328.3	1162.7	1739.8	798.7	342.9	126.1	
17	441.2	866.4	1308.3	1270.1	1026.6	1011.4	347.2	1142.8	1738.0	616.4	1117.5	295.1	
18	249.3	515.7	855.5	1252.3	1275.1	757.1	186.4	1645.5	970.8	620.1	1036.1	205.7	
19	156.2	309.2	884.0	1831.1	1333.6	459.9	224.1	1336.1	648.0	558.8	1302.7	115.7	
20	177.2	184.4	1822.8	2341.2	1980.0	434.2	151.5	929.0	408.7	704.1	1084.3	70.0	

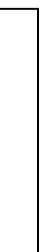
21	160.1	121.2	974.0	1212.0	1965.1	412.2	232.2	789.1	273.1	864.6	985.7	86.0
22	320.5	95.9	670.1	847.8	1493.2	681.9	131.4	1661.0	231.9	522.3	1347.0	939.8
23	348.0	170.5	1432.6	1316.6	867.7	856.3	183.7	1017.4	408.3	359.6	2223.7	412.5
24	551.8	191.9	829.9	1126.2	752.9	454.7	323.2	948.0	347.4	336.4	1536.9	267.2
25	339.3	372.1	638.5	861.1	845.7	322.0	382.6	773.0	466.0	256.7	1735.5	181.0
26	218.4	1453.2	740.3	1690.4	678.8	1045.7	289.0	571.2	3035.2	499.9	1665.7	121.5
27	150.0	2245.2	634.4	1172.1	1090.2	741.5	340.9	1116.1	1515.9	1080.2	996.5	240.3
28	88.8	1186.5	705.8	904.2	942.3	729.8	357.1	1593.3	2015.3	769.4	784.2	117.7
29	67.6		566.5	1307.9	1228.0	925.5	610.1	824.1	1374.3	773.2	1045.9	74.0
30	408.5		339.1	805.3	1206.8	475.2	732.2	582.1	881.1	1679.2	904.4	153.2
31	251.8		247.1		688.5		367.6	357.6		1068.2		77.3

Tabla 13. Caudales totales Río Lebríja periodo 2013

Caudales Lebríja diarios 2014		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiem bre	Octubre	Noviem bre	Diciemb re
Día	Q(m ³ /s)												
1	58.8	297.1	626.4	112.2	1321.4	416.5	395.4	674.5	261.9	663.5	907.5	218.7	
2	41.8	191.7	486.3	184.7	1064.4	785.5	478.8	378.5	346.9	675.4	1164.9	320.5	
3	246.4	258.7	682.8	559.8	894.8	566.7	561.9	330.9	439.3	2148.1	1969.6	624.8	
4	223.5	142.6	766.9	367.1	814.4	401.7	370.5	442.4	462.7	2654.9	1193.3	653.5	
5	524.9	300.4	803.0	474.6	1412.3	1040.2	215.0	730.6	343.5	2026.8	1006.9	532.7	
6	394.9	575.2	794.5	420.7	1656.1	1086.8	153.7	972.1	203.2	2009.8	1112.7	450.8	
7	244.1	354.3	1546.4	437.1	1875.4	714.0	167.2	732.0	157.7	2395.6	1328.3	368.5	
8	142.5	346.0	918.6	575.4	1286.1	422.2	161.5	756.7	492.5	1453.1	1462.1	337.9	
9	83.8	515.9	627.0	295.0	1851.4	320.7	262.8	890.8	825.7	1029.1	1181.8	376.6	

10	56.2	278.9	499.4	431.6	1141.9	189.6	323.8	625.7	1357.3	1816.5	2098.6	378.5
11	32.6	415.9	522.4	354.8	707.9	274.9	317.0	421.5	876.3	1268.6	1828.2	304.0
12	24.0	736.0	673.2	338.3	850.3	510.3	181.5	597.3	1147.0	1171.2	1452.0	333.5
13	44.9	539.4	433.1	391.2	1451.6	736.6	460.7	306.9	872.2	825.8	1068.2	375.0
14	63.0	343.0	448.7	725.8	1155.5	387.6	357.6	304.0	749.4	569.4	822.6	333.9
15	219.8	221.2	559.8	1274.2	851.5	239.6	292.0	514.3	1099.5	966.4	723.0	227.0
16	342.1	135.2	429.6	1091.3	751.3	233.8	193.7	1336.5	2335.8	1188.9	1219.8	130.3
17	164.7	112.0	317.2	788.5	832.5	342.3	165.5	2049.1	1792.4	1468.5	1113.1	103.7
18	138.0	65.7	759.9	663.8	942.0	595.1	96.9	1453.9	2013.6	1709.3	914.5	232.8
19	449.1	382.8	549.7	1140.8	802.5	673.5	73.9	842.3	1189.5	948.0	622.6	148.8
20	632.3	225.6	1161.4	1195.4	1262.6	378.7	76.6	740.2	1309.0	795.4	699.6	150.6
21	1189.6	169.3	765.4	1401.6	972.5	399.1	88.1	645.0	1280.7	1078.1	529.3	131.9
22	689.2	167.5	603.8	1282.1	566.3	472.0	201.0	943.4	839.6	1535.9	319.2	68.1
23	402.1	495.7	716.9	965.2	397.7	257.6	244.0	930.2	724.3	1752.2	235.6	42.2
24	271.8	811.0	986.0	1295.0	492.0	161.5	175.7	693.8	544.7	1173.5	585.8	44.2
25	217.0	1595.4	576.7	939.5	413.3	254.9	162.7	982.9	624.2	1855.6	966.2	26.0
26	123.2	2280.1	328.6	684.5	471.4	554.5	89.6	1451.7	433.2	1222.1	752.6	13.9
27	174.6	1495.4	205.6	580.6	1306.5	337.2	60.7	836.7	288.1	1030.4	411.0	8.4
28	116.5	967.9	124.6	1111.9	1380.1	580.6	282.0	548.8	164.5	1366.2	362.0	4.9
29	295.5		105.9	828.1	775.4	605.6	272.1	337.5	118.1	2015.6	332.7	2.9
30	181.9		224.1	573.5	487.4	372.9	232.9	260.6	90.5	1270.4	187.8	1.7
31	158.7		153.2		499.3		269.4	333.4		838.3		1.0

Tabla 14. Caudales totales Río Lebríja periodo 2014



Caudales Lebrija diarios 2015		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiem bre	Octubre	Noviem bre	Diciemb re
Día	Q(m ³ /s)												
1	0.6	191.5	233.4	653.2	664.4	623.0	65.3	176.2	717.4	347.4	1559.9	481.1	
2	0.4	153.4	158.3	914.0	630.5	366.8	30.6	135.7	609.5	197.5	1235.6	469.5	
3	0.2	158.6	212.4	811.0	609.0	363.5	22.3	291.1	657.2	183.2	1533.0	491.5	
4	10.2	448.9	208.5	781.2	573.0	466.7	204.6	421.8	1332.7	200.5	1455.0	297.6	
5	15.6	809.1	431.6	609.6	542.4	790.2	375.4	690.5	725.6	706.4	1152.5	298.0	
6	35.1	812.0	370.9	478.6	613.1	1029.9	316.1	568.3	892.7	621.1	1236.2	318.9	
7	15.2	1486.9	195.1	318.2	429.5	938.1	370.0	623.8	840.5	838.0	872.4	174.6	
8	9.1	1469.6	133.0	350.8	296.5	750.2	284.0	683.7	1078.8	704.5	1361.0	116.2	
9	5.5	1583.0	79.2	418.9	341.4	837.1	357.2	503.2	772.5	563.6	818.6	88.2	
10	50.1	1414.5	74.1	650.1	238.3	539.5	595.8	285.3	515.4	1185.2	878.3	114.0	
11	24.0	758.3	60.9	835.9	371.7	319.2	674.2	229.3	299.1	891.0	544.7	133.6	
12	39.8	508.5	75.4	1207.9	495.6	205.4	526.9	271.4	281.9	1178.2	337.6	306.8	
13	219.9	368.7	118.0	2165.9	425.9	369.4	1140.1	165.7	581.9	717.6	459.5	231.5	
14	345.2	215.1	87.8	1712.3	569.3	215.4	831.0	338.9	640.6	648.9	876.1	240.6	
15	626.1	223.6	367.6	1380.7	1075.7	134.6	1327.6	307.9	877.5	436.6	1148.3	287.7	
16	468.0	243.8	923.5	1007.4	1200.5	158.5	1041.4	174.1	1181.3	1394.3	1255.0	293.0	
17	473.0	325.9	2049.2	1461.8	992.6	297.4	1002.9	416.6	2088.1	856.7	941.7	203.9	
18	320.3	336.5	2599.7	1048.7	811.0	192.8	681.1	247.5	1542.8	839.1	645.2	135.2	
19	258.2	229.9	1791.7	1300.3	537.8	134.8	553.2	204.2	986.8	1729.0	474.0	78.5	
20	419.4	574.8	1538.1	1027.0	1176.0	244.6	465.3	166.7	675.2	1134.7	384.1	46.4	
21	870.9	266.9	1080.6	738.8	786.2	167.6	584.4	473.4	657.1	1221.7	569.2	27.5	
22	692.1	183.6	698.7	658.3	822.6	99.8	376.7	670.7	873.4	1018.4	449.3	19.7	
23	643.8	123.8	560.3	1053.8	1657.3	59.6	349.3	759.3	652.5	991.1	505.6	35.5	

24	497.6	230.6	445.9	834.2	941.0	178.7	230.8	810.0	720.4	1323.7	1038.0	28.4
25	390.8	137.1	291.7	487.7	812.5	154.2	568.6	975.1	473.7	889.6	671.5	17.0
26	999.5	209.0	534.2	660.6	1683.2	115.2	631.4	630.3	326.4	789.3	785.2	10.3
27	534.0	379.6	1044.4	447.5	1751.0	98.8	363.1	366.1	320.5	892.3	673.0	22.8
28	431.0	187.0	988.1	692.5	1540.0	54.8	264.9	353.8	380.3	801.9	547.2	22.8
29	289.2		610.5	972.6	1152.4	37.0	205.1	404.4	438.8	1428.9	1064.0	12.1
30	245.3		671.3	538.0	1030.6	31.4	420.7	830.8	269.4	1015.4	571.7	23.1
31	264.5		656.8		716.5		248.0	730.1		979.3		37.5

Tabla 15. Caudales totales Río Lebríja periodo 2015

Caudales Lebríja diarios 2016		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiem bre	Octubre	Noviem bre	Diciemb re
Día	Q(m ³ /s)												
1	83.2	10.1	315.1	1069.6	1682.3	925.6	744.1	922.0	725.8	605.6	986.2	752.5	
2	134.4	11.4	185.1	653.6	1582.0	733.3	780.3	834.4	1047.1	468.8	1342.1	1087.4	
3	159.2	124.6	204.4	695.2	1153.9	791.7	644.4	656.0	748.1	643.9	859.7	612.2	
4	454.1	119.1	191.2	423.5	1540.8	1878.7	445.9	419.7	888.4	1135.8	826.1	635.8	
5	794.3	71.2	217.2	485.4	1500.1	1948.4	316.6	349.7	1429.6	1708.4	659.0	696.9	
6	422.4	105.0	375.7	441.3	1732.3	1418.0	191.2	288.6	834.8	1629.7	1070.7	873.8	
7	247.7	207.4	243.9	374.1	1189.7	953.8	146.4	244.6	802.9	1637.6	892.1	1164.3	
8	157.4	136.3	137.9	830.7	909.2	968.0	176.4	173.9	709.7	2040.8	991.6	594.3	
9	93.3	80.0	81.9	932.4	846.1	848.6	129.4	443.4	978.7	1869.8	790.0	407.9	
10	62.0	176.5	66.2	2112.5	483.5	874.6	115.7	414.4	768.0	1080.8	1065.4	240.6	
11	160.7	170.3	38.8	1049.0	360.0	824.5	944.8	825.7	595.7	891.6	1093.0	168.5	
12	111.7	213.5	29.8	813.7	439.6	966.5	703.9	452.8	525.6	1435.8	1761.6	155.5	

13	60.0	117.1	45.0	1046.9	450.8	667.1	607.5	381.5	322.1	2034.4	1348.1	84.4
14	36.0	112.4	321.3	812.3	245.2	449.5	783.4	281.4	245.6	1414.6	1655.5	63.0
15	20.9	109.6	167.4	808.3	203.0	312.9	2007.2	294.7	854.9	1355.8	1557.2	36.4
16	12.9	187.9	223.9	537.2	186.0	424.7	1426.4	382.0	1567.5	1265.6	1630.4	44.8
17	15.4	143.0	723.1	977.7	133.0	675.0	897.5	248.0	867.7	818.3	1454.6	25.9
18	112.8	116.4	515.9	821.4	113.1	712.7	706.9	247.7	1057.4	1034.5	867.4	49.3
19	56.1	108.4	713.4	1191.9	91.8	547.2	658.3	1147.5	732.5	688.6	701.7	164.0
20	33.5	191.1	419.0	918.8	78.0	642.7	463.8	655.9	484.6	907.7	489.9	102.8
21	39.0	160.8	258.4	1939.9	245.2	563.5	780.7	643.1	972.5	1242.6	1146.8	397.8
22	43.9	189.9	168.6	1076.9	543.9	1099.7	654.9	846.1	863.9	1714.1	1846.4	255.4
23	102.3	200.9	96.2	1162.2	768.2	1178.5	364.3	842.3	526.2	1583.4	1610.4	169.6
24	85.1	124.3	138.4	1242.5	592.4	635.6	334.4	719.3	349.0	1147.9	1444.5	131.2
25	71.5	438.6	288.4	1822.2	554.6	400.5	220.0	1443.9	312.2	2206.1	1167.7	121.3
26	69.1	292.1	200.2	1554.6	549.1	260.1	153.9	823.6	428.8	1627.1	941.8	77.2
27	35.6	293.2	303.6	1746.5	716.9	197.7	366.1	1078.8	906.1	1524.6	700.5	303.6
28	23.8	152.8	869.1	2111.7	938.1	188.3	514.3	639.4	660.9	1532.5	522.4	386.7
29	46.6	137.1	1297.1	1183.7	795.3	315.0	333.5	529.5	552.4	3146.2	342.8	541.0
30	24.7		804.5	1929.8	1002.6	1375.8	365.5	809.2	409.9	1590.3	353.7	514.5
31	14.8		1001.3		1617.1		792.8	853.0		1768.1		288.6

Tabla 16. Caudales totales Río Lebríja periodo 2016.
 Los caudales expresados en la tablas 11, 12, 13, 14, 15 y 16 corresponden a los caudales totales de la cuenca total del río Lebríja. En la figura 10 se encuentra el hidrograma correspondiente.

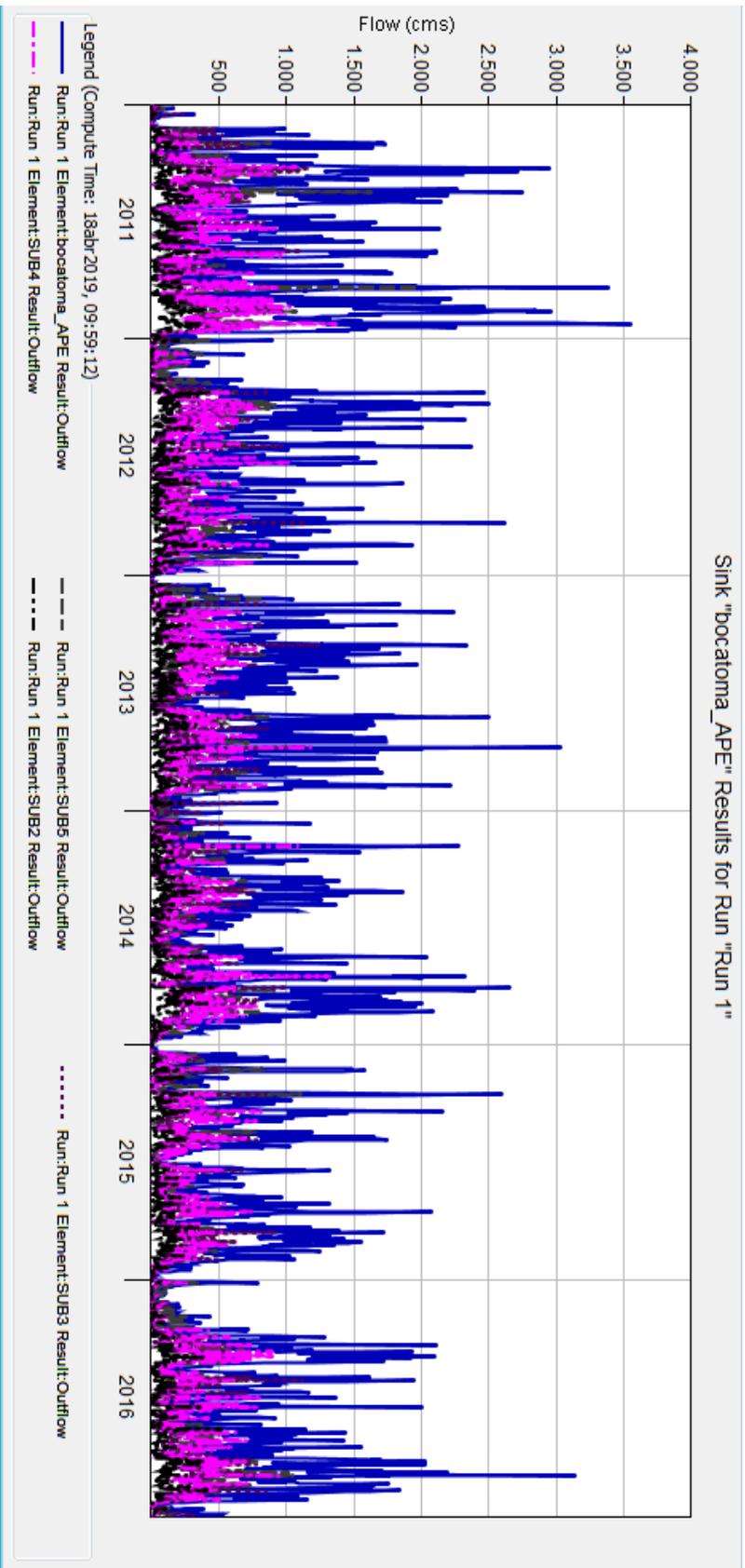


Figura 10. Hidrograma caudales Río Lebríja.

En la figura 10 se evidencia la variación de los caudales a lo largo del año, igualmente se aprecia que durante el año 2011 se alcanzaron los caudales máximos, pues durante este año se presentó el fenómeno de la niña, alterando los caudales de la cuenca.

Los caudales expresados en las tablas 11 a la 16, corresponden a los caudales totales de la cuenca total del río Lebrija, sin embargo como se explicó anteriormente el drenaje de estudio es el Caño Icacal que corresponde a una bifurcación del Lebrija la cual se encuentra las coordenadas MAGNA SIRGAS BOGOTÁ Este= 1.034.974 E y Norte= 1.342.722 N, en el corregimiento de San José de los Chorros, municipio de Ríonegro, donde el 80% del caudal drena hacia el Lebrija y el 20% restante se dirige hacia el Icacal, drenando hacia el punto de captación, en la figura 11 se puede apreciar la ubicación de dichos puntos. (AnteaGroup & ConocoPhillips, 2017) Así mismo en las tablas 17, 18, 19, 20, 21 y 22 se pueden observar los caudales correspondientes a caño Icacal.

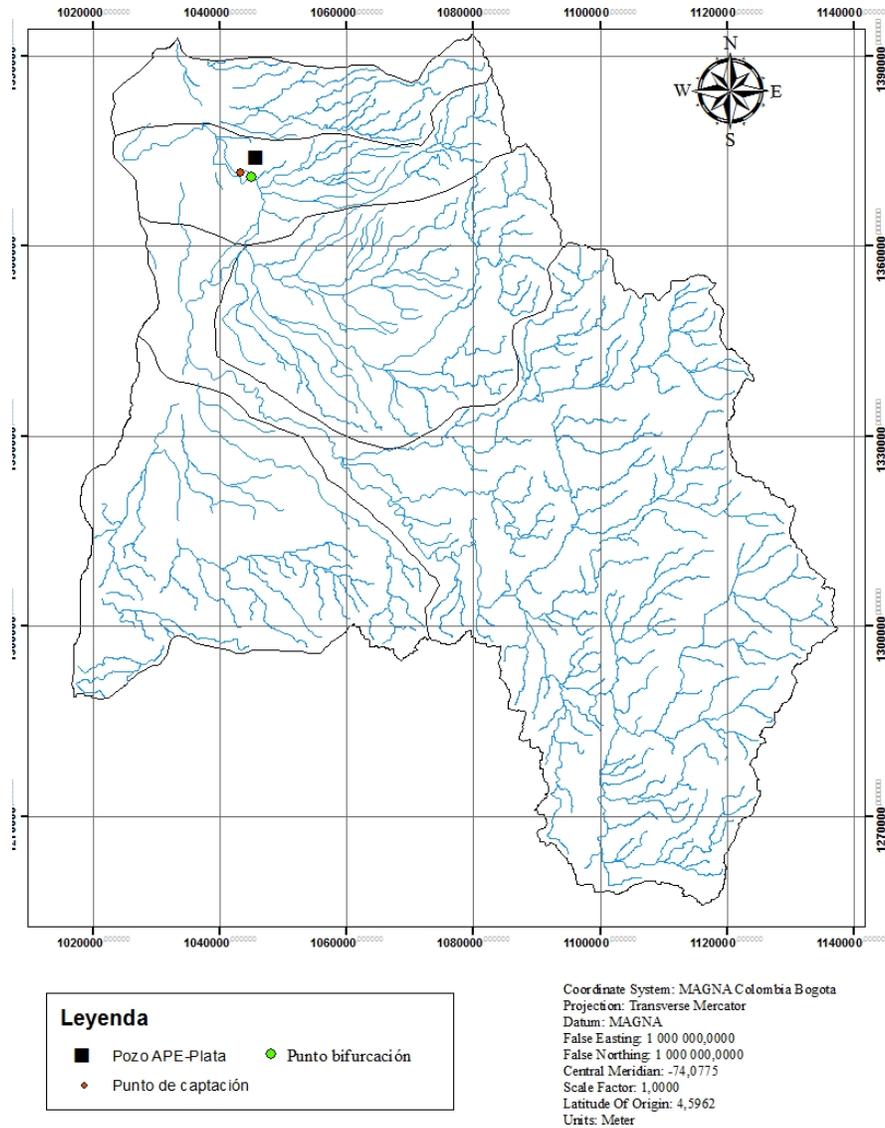


Figura 11. Ubicación puntos de captación y bifurcación del Río Lebrija *MAGNA SIRGAS-BOGOTÁ COLOMBIA*

Fuente. Delimitación de la cuenca SIGOT.

Mapa: Realizado por Autora

Caudales Icaical diarios 2011		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiem bre	Octubre	Noviem bre	Diciemb re
Dia	Q(m ³ /s)												
1	0.04	1.76	197.64	126.12	121.68	404.98	235.26	270.84	75.9	63.74	155.22	266.04	
2	0.3	0.84	345.3	161.44	224.58	429.98	213	159.02	90.22	116.16	93.1	201.52	
3	0.22	0.5	334.76	240.62	210.1	359.98	217.08	314	138.28	148.76	154.92	255.16	
4	2.16	6.1	347.44	204.02	163.12	290.46	181.28	172.94	84.6	278.26	429.38	312.04	
5	3.58	2.66	176.64	189.08	232.14	237.3	334.74	114.02	57.36	208.64	304.78	285.06	
6	7	1.6	166.56	225.66	229.2	200.54	166.64	79.44	34.22	267.76	205.36	259.1	
7	16.3	4.4	128.52	220.4	119.96	215.36	180.58	49.98	105.48	198.06	202.5	601.44	
8	34.62	56.6	141.06	329.2	99.02	120.88	124.74	30.04	211.7	151.1	333.36	712.48	
9	22.84	199.46	198.48	352.86	73.06	73.44	87.92	39.94	284.08	299.58	304.34	444.08	
10	18.68	136.26	329.34	591.74	77.5	45.28	324.14	69.96	136.24	392.6	211.02	257.3	
11	9.98	77.14	165.2	357.48	77.24	38.52	189.5	59.86	97	329.5	398.72	311.2	
12	5.88	156.42	103.04	363.9	150.96	34.02	247.18	123.82	85.22	572.52	493.96	377	
13	4	141.74	61.7	495.32	271.42	29.2	231.46	68.74	84.2	678.58	301	452.62	
14	2.26	182.88	36.84	288.78	453.24	51.84	428.82	197.08	71.12	477.04	298.24	343.66	
15	6.26	110.22	36.86	256.22	273.4	48.32	341.06	186.04	44.64	398.56	335.34	311.36	
16	20.4	140.58	22.84	543.96	380.04	142.02	190.28	145.12	133.72	273.88	421.54	296.36	
17	65.74	234.5	13.48	306.62	550.28	115.48	144.64	176.3	168.68	224.24	569.42	319.42	
18	47.8	200.08	15.64	368.52	353.54	101.86	184.48	424.56	349.78	231.08	555.26	244.44	
19	24.1	158.38	45.4	462.52	242.24	130.5	164.8	395.36	235	207.88	592.52	294.74	
20	14.46	90.06	125.92	461.52	264.02	115.66	138.68	263.44	356.48	152.9	511.2	175.14	
21	8.62	75.34	148.46	427.56	184.32	86.22	83.32	424.6	187.78	113.36	478.4	104.9	
22	12.58	44.66	247.68	283.54	438.94	73.6	59.2	311.28	113.74	66.5	348.8	65.22	

23	6.22	71.94	148.72	269.46	337.62	164.1	64.62	288.32	88.72	46.66	290.68	38.02
24	3.74	73.02	96.76	228.04	211.88	225.76	156.72	410.16	77.14	56.1	293.98	34.32
25	2.24	103.48	174.58	252.36	269.76	273.02	112.6	310.88	70.6	176.42	341.5	18.3
26	2.76	64.42	93.8	166.92	374.58	159.12	147.34	208.94	95.56	174.4	274.16	11.08
27	1.48	42.5	114.46	146.46	390.28	148.36	254.72	143.9	50.72	116.04	254.1	27.5
28	0.9	97.76	86.9	321.16	293.82	93.96	175.32	113.18	34.66	225.9	236.64	66.14
29	0.54	0	184.28	197.1	217.62	136.94	134.28	67.12	133.42	155.14	210.5	53.88
30	1.84	0	101.1	190.32	257.38	179.12	264.1	61.14	66.46	444.68	180.4	30.2
31	0.9	0	84.04	0	291.68	0	234.82	34.74	0	259.36	0	18.62

Tabla 17. Caudales del Caño Icacal que corresponden al 20% del Río Lebríja periodo 2011

Caudales Lebríja diarios 2012	Caudales Lebríja											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiem bre	Octubre	Noviem bre	Diciemb re
Día	Q(m ³ /s)											
1	15.08	16.06	11.54	111.16	115.72	62.9	78.92	53.98	97.74	65.88	83.6	153.8
2	33.76	9.4	20.5	193.2	98.94	174.2	86.88	34.04	184.08	92.1	150.2	169.2
3	180.4	5.52	16.5	132.78	207.18	90.7	308.76	40	113.14	214.34	159.64	218.2
4	105.42	22.42	136.06	182.38	464.94	84.46	302	57.28	77.5	212.66	154.9	118.6
5	102.12	85.06	70.44	238.5	268.62	52.86	158.78	164.84	74.16	257.52	90.64	95.26
6	52.14	38.72	43.54	235.64	236.84	31.92	121.28	227.56	106.84	215	73.84	69.68
7	36.92	23.04	34.14	351.66	176.88	24.86	84.8	171.64	63.02	162.04	43.14	44.76
8	21.82	26.26	114.48	388.12	204.74	31.84	59.4	128.62	85.34	188.52	51.78	26.58
9	19.1	32.12	68.46	277.54	149.84	99.12	122.06	146.8	75.16	179.66	62.78	15.8
10	22.14	51.2	42.06	501.2	281.7	203.78	139.68	130.86	60.06	112.14	147.16	9.36
11	26.46	78.56	34.36	396.64	216.96	332.24	333.24	150.94	109.5	190.1	182.46	20.36

12	21.96	62.26	45.86	447.18	194.24	265.44	215.84	373.92	225.26	523.94	111.44	150.48
13	22.04	35	26.16	403.92	132.06	219.56	280.98	326.88	138.34	294.46	133.62	305.46
14	13.08	20.44	55.64	226.32	125.42	231.64	157.64	177.82	87.7	192.24	360.22	163.84
15	9.22	12.12	69.52	168.66	139.84	474.9	112	126.02	55.3	142.72	389.02	104.18
16	9.18	11.88	127.96	193.82	109.16	237.4	72.28	85.38	90.8	178.32	230.8	61.42
17	30.66	10.98	115.8	381.78	124.9	164.3	73.24	83.54	98.96	185.3	380.64	38.08
18	51.58	6.04	119.16	398.36	403.52	141.34	128.3	67.04	134.74	190.96	231.94	34.84
19	56.12	15.32	81.76	332.84	239.42	135.78	101.84	66.18	86.72	168	135.94	28.32
20	27.96	8.16	162.24	266.36	281.32	203.12	82.3	86.8	172.84	119.7	120.36	15.34
21	16.48	10.8	247.7	217.76	163.66	114.08	44.92	145.6	315.84	171.5	231.16	13.76
22	15.62	8.42	117.88	217.44	119.22	151.86	49.16	140.3	158.82	140.96	231.66	24.68
23	67.1	25.66	94.36	267.1	151.34	111.58	44.46	137.04	185.92	172.08	127.56	56.38
24	138.58	39.84	331.52	197.94	110.86	101.1	40.86	214.6	209.76	264.96	123.46	65.44
25	65.08	18.82	493.48	180.56	96.6	85.94	35.34	161.12	166.24	162.88	79.92	71.78
26	55.56	27.96	252.78	273.18	115.32	111.12	28.62	121.04	133.6	190.6	50.9	37.36
27	38.66	15.64	211.8	219.72	85.88	63.4	104.92	83.98	103.48	157.84	79.36	22.08
28	48.68	22.18	149.66	319.54	75.56	54.36	103.02	86.82	60.36	195.92	42.44	37.6
29	64.08	16.56	205.86	216.86	112.18	168.1	129.94	89.92	45.22	177.82	122.96	18.06
30	49.36		116.3	190.2	62.9	145.02	127.86	100.1	88.42	237.38	171.6	12.78
31	27.08		101.36		40.98		65.42	102.3		132.54		7.26

Tabla 18. Caudales del Caño Icacal que corresponden al 20% del Río Lebríja periodo 2012

Caudales Lebríja diarios 2013	Caudales Lebríja											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiem bre	Octubre	Noviem bre	Diciemb re
Día	Q(m ³ /s)											

1	4.1	89.98	231.12	123.34	293.76	95.4	64.48	91.94	147.36	146.3	131.68	175.64
2	2.46	93.68	168.36	69.52	190.56	95	87.58	91.32	207.78	336.48	158.04	109.78
3	1.46	71.86	255.14	79.26	213.92	168.58	135.6	98.24	150.74	256.38	297.58	117.58
4	0.88	136.2	237.6	182.8	370	97.44	213.62	105.86	136.4	159.58	217.38	94.68
5	0.52	117.92	138.1	178.92	307.74	200.2	111.82	162	233.06	107.26	343.4	94.36
6	0.32	182	159.96	171.24	208.28	100.6	102.54	251.36	236.72	94.24	267.02	97.48
7	0.18	211.1	126.3	165.58	168.5	63.16	102.16	359.46	297.48	156.42	176.76	94.2
8	0.12	201.3	133.74	147.74	286.06	39.96	113.34	301.84	215.34	132.24	184.18	70.14
9	0.06	154.7	91.98	184.26	197.04	180.28	107.32	447.24	157.06	85.4	123.94	41.66
10	0.52	109.96	140.72	94.12	126.64	276.4	137.74	500.82	193.06	198.26	67.84	24.46
11	0.22	73.64	113.78	79.76	111.64	140.72	78.78	290.52	348.38	264.1	123.4	43.62
12	2.96	44.84	167.08	47.72	183.22	106.68	65.58	189.3	197.68	330.52	109.96	21.36
13	5.42	72.74	187	148.52	149.56	192.18	38.8	113.38	117.72	298.86	63	12.84
14	3.54	51.36	262.16	127.9	231.08	129.86	41.9	162.6	72	330.88	54.58	7.78
15	2.38	85.14	195.62	169.28	294.34	115.28	37.48	154	52.78	269.3	63.2	34.22
16	5.38	369.24	178.08	156.5	182.96	83.9	65.66	232.54	347.96	159.74	68.58	25.22
17	88.24	173.28	261.66	254.02	205.32	202.28	69.44	228.56	347.6	123.28	223.5	59.02
18	49.86	103.14	171.1	250.46	255.02	151.42	37.28	329.1	194.16	124.02	207.22	41.14
19	31.24	61.84	176.8	366.22	266.72	91.98	44.82	267.22	129.6	111.76	260.54	23.14
20	35.44	36.88	364.56	468.24	396	86.84	30.3	185.8	81.74	140.82	216.86	14
21	32.02	24.24	194.8	242.4	393.02	82.44	46.44	157.82	54.62	172.92	197.14	17.2
22	64.1	19.18	134.02	169.56	298.64	136.38	26.28	332.2	46.38	104.46	269.4	187.96
23	69.6	34.1	286.52	263.32	173.54	171.26	36.74	203.48	81.66	71.92	444.74	82.5
24	110.36	38.38	165.98	225.24	150.58	90.94	64.64	189.6	69.48	67.28	307.38	53.44
25	67.86	74.42	127.7	172.22	169.14	64.4	76.52	154.6	93.2	51.34	347.1	36.2
26	43.68	290.64	148.06	338.08	135.76	209.14	57.8	114.24	607.04	99.98	333.14	24.3

27	30	449.04	126.88	234.42	218.04	148.3	68.18	223.22	303.18	216.04	199.3	48.06
28	17.76	237.3	141.16	180.84	188.46	145.96	71.42	318.66	403.06	153.88	156.84	23.54
29	13.52		113.3	261.58	245.6	185.1	122.02	164.82	274.86	154.64	209.18	14.8
30	81.7		67.82	161.06	241.36	95.04	146.44	116.42	176.22	335.84	180.88	30.64
31	50.36		49.42		137.7		73.52	71.52		213.64		15.46

Tabla 19. Caudales del Caño Icacal que corresponden al 20% del Río Lebríja periodo 2013

Caudales Lebríja diarios 2014		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiem bre	Octubre	Noviem bre	Diciemb re
Día	Q(m ³ /s)												
1	11.76	59.42	125.28	22.44	264.28	83.3	79.08	134.9	52.38	132.7	181.5	43.74	
2	8.36	38.34	97.26	36.94	212.88	157.1	95.76	75.7	69.38	135.08	232.98	64.1	
3	49.28	51.74	136.56	111.96	178.96	113.34	112.38	66.18	87.86	429.62	393.92	124.96	
4	44.7	28.52	153.38	73.42	162.88	80.34	74.1	88.48	92.54	530.98	238.66	130.7	
5	104.98	60.08	160.6	94.92	282.46	208.04	43	146.12	68.7	405.36	201.38	106.54	
6	78.98	115.04	158.9	84.14	331.22	217.36	30.74	194.42	40.64	401.96	222.54	90.16	
7	48.82	70.86	309.28	87.42	375.08	142.8	33.44	146.4	31.54	479.12	265.66	73.7	
8	28.5	69.2	183.72	115.08	257.22	84.44	32.3	151.34	98.5	290.62	292.42	67.58	
9	16.76	103.18	125.4	59	370.28	64.14	52.56	178.16	165.14	205.82	236.36	75.32	
10	11.24	55.78	99.88	86.32	228.38	37.92	64.76	125.14	271.46	363.3	419.72	75.7	
11	6.52	83.18	104.48	70.96	141.58	54.98	63.4	84.3	175.26	253.72	365.64	60.8	
12	4.8	147.2	134.64	67.66	170.06	102.06	36.3	119.46	229.4	234.24	290.4	66.7	
13	8.98	107.88	86.62	78.24	290.32	147.32	92.14	61.38	174.44	165.16	213.64	75	
14	12.6	68.6	89.74	145.16	231.1	77.52	71.52	60.8	149.88	113.88	164.52	66.78	
15	43.96	44.24	111.96	254.84	170.3	47.92	58.4	102.86	219.9	193.28	144.6	45.4	

16	68.42	27.04	85.92	218.26	150.26	46.76	38.74	267.3	467.16	237.78	243.96	26.06
17	32.94	22.4	63.44	157.7	166.5	68.46	33.1	409.82	358.48	293.7	222.62	20.74
18	27.6	13.14	151.98	132.76	188.4	119.02	19.38	290.78	402.72	341.86	182.9	46.56
19	89.82	76.56	109.94	228.16	160.5	134.7	14.78	168.46	237.9	189.6	124.52	29.76
20	126.46	45.12	232.28	239.08	252.52	75.74	15.32	148.04	261.8	159.08	139.92	30.12
21	237.92	33.86	153.08	280.32	194.5	79.82	17.62	129	256.14	215.62	105.86	26.38
22	137.84	33.5	120.76	256.42	113.26	94.4	40.2	188.68	167.92	307.18	63.84	13.62
23	80.42	99.14	143.38	193.04	79.54	51.52	48.8	186.04	144.86	350.44	47.12	8.44
24	54.36	162.2	197.2	259	98.4	32.3	35.14	138.76	108.94	234.7	117.16	8.84
25	43.4	319.08	115.34	187.9	82.66	50.98	32.54	196.58	124.84	371.12	193.24	5.2
26	24.64	456.02	65.72	136.9	94.28	110.9	17.92	290.34	86.64	244.42	150.52	2.78
27	34.92	299.08	41.12	116.12	261.3	67.44	12.14	167.34	57.62	206.08	82.2	1.68
28	23.3	193.58	24.92	222.38	276.02	116.12	56.4	109.76	32.9	273.24	72.4	0.98
29	59.1		21.18	165.62	155.08	121.12	54.42	67.5	23.62	403.12	66.54	0.58
30	36.38		44.82	114.7	97.48	74.58	46.58	52.12	18.1	254.08	37.56	0.34
31	31.74		30.64		99.86		53.88	66.68		167.66		0.2

Tabla 20. Caudales del Caño Icaecal que corresponden al 20% del Río Lebríja periodo 2014

Caudales Lebríja diarios 2015		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiem bre	Octubre	Noviem bre	Diciemb re
Día	Q(m ³ /s)												
1	0.12	38.3	46.68	130.64	132.88	124.6	13.06	35.24	143.48	69.48	311.98	96.22	
2	0.08	30.68	31.66	182.8	126.1	73.36	6.12	27.14	121.9	39.5	247.12	93.9	
3	0.04	31.72	42.48	162.2	121.8	72.7	4.46	58.22	131.44	36.64	306.6	98.3	
4	2.04	89.78	41.7	156.24	114.6	93.34	40.92	84.36	266.54	40.1	291	59.52	

5	3.12	161.82	86.32	121.92	108.48	158.04	75.08	138.1	145.12	141.28	230.5	59.6
6	7.02	162.4	74.18	95.72	122.62	205.98	63.22	113.66	178.54	124.22	247.24	63.78
7	3.04	297.38	39.02	63.64	85.9	187.62	74	124.76	168.1	167.6	174.48	34.92
8	1.82	293.92	26.6	70.16	59.3	150.04	56.8	136.74	215.76	140.9	272.2	23.24
9	1.1	316.6	15.84	83.78	68.28	167.42	71.44	100.64	154.5	112.72	163.72	17.64
10	10.02	282.9	14.82	130.02	47.66	107.9	119.16	57.06	103.08	237.04	175.66	22.8
11	4.8	151.66	12.18	167.18	74.34	63.84	134.84	45.86	59.82	178.2	108.94	26.72
12	7.96	101.7	15.08	241.58	99.12	41.08	105.38	54.28	56.38	235.64	67.52	61.36
13	43.98	73.74	23.6	433.18	85.18	73.88	228.02	33.14	116.38	143.52	91.9	46.3
14	69.04	43.02	17.56	342.46	113.86	43.08	166.2	67.78	128.12	129.78	175.22	48.12
15	125.22	44.72	73.52	276.14	215.14	26.92	265.52	61.58	175.5	87.32	229.66	57.54
16	93.6	48.76	184.7	201.48	240.1	31.7	208.28	34.82	236.26	278.86	251	58.6
17	94.6	65.18	409.84	292.36	198.52	59.48	200.58	83.32	417.62	171.34	188.34	40.78
18	64.06	67.3	519.94	209.74	162.2	38.56	136.22	49.5	308.56	167.82	129.04	27.04
19	51.64	45.98	358.34	260.06	107.56	26.96	110.64	40.84	197.36	345.8	94.8	15.7
20	83.88	114.96	307.62	205.4	235.2	48.92	93.06	33.34	135.04	226.94	76.82	9.28
21	174.18	53.38	216.12	147.76	157.24	33.52	116.88	94.68	131.42	244.34	113.84	5.5
22	138.42	36.72	139.74	131.66	164.52	19.96	75.34	134.14	174.68	203.68	89.86	3.94
23	128.76	24.76	112.06	210.76	331.46	11.92	69.86	151.86	130.5	198.22	101.12	7.1
24	99.52	46.12	89.18	166.84	188.2	35.74	46.16	162	144.08	264.74	207.6	5.68
25	78.16	27.42	58.34	97.54	162.5	30.84	113.72	195.02	94.74	177.92	134.3	3.4
26	199.9	41.8	106.84	132.12	336.64	23.04	126.28	126.06	65.28	157.86	157.04	2.06
27	106.8	75.92	208.88	89.5	350.2	19.76	72.62	73.22	64.1	178.46	134.6	4.56
28	86.2	37.4	197.62	138.5	308	10.96	52.98	70.76	76.06	160.38	109.44	4.56
29	57.84		122.1	194.52	230.48	7.4	41.02	80.88	87.76	285.78	212.8	2.42
30	49.06		134.26	107.6	206.12	6.28	84.14	166.16	53.88	203.08	114.34	4.62

	31	52.9	131.36	143.3	49.6	146.02	195.86	7.5
--	----	------	--------	-------	------	--------	--------	-----

Tabla 21. Caudales del Caño Icacal que corresponden al 20% del Río Lebríja periodo 2015

Caudales Lebríja diarios 2016		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiem bre	Octubre	Noviem bre	Diciemb re
Día	Q(m ³ /s)												
1	16.64	2.02	63.02	213.92	336.46	185.12	148.82	184.4	145.16	121.12	197.24	150.5	
2	26.88	2.28	37.02	130.72	316.4	146.66	156.06	166.88	209.42	93.76	268.42	217.48	
3	31.84	24.92	40.88	139.04	230.78	158.34	128.88	131.2	149.62	128.78	171.94	122.44	
4	90.82	23.82	38.24	84.7	308.16	375.74	89.18	83.94	177.68	227.16	165.22	127.16	
5	158.86	14.24	43.44	97.08	300.02	389.68	63.32	69.94	285.92	341.68	131.8	139.38	
6	84.48	21	75.14	88.26	346.46	283.6	38.24	57.72	166.96	325.94	214.14	174.76	
7	49.54	41.48	48.78	74.82	237.94	190.76	29.28	48.92	160.58	327.52	178.42	232.86	
8	31.48	27.26	27.58	166.14	181.84	193.6	35.28	34.78	141.94	408.16	198.32	118.86	
9	18.66	16	16.38	186.48	169.22	169.72	25.88	88.68	195.74	373.96	158	81.58	
10	12.4	35.3	13.24	422.5	96.7	174.92	23.14	82.88	153.6	216.16	213.08	48.12	
11	32.14	34.06	7.76	209.8	72	164.9	188.96	165.14	119.14	178.32	218.6	33.7	
12	22.34	42.7	5.96	162.74	87.92	193.3	140.78	90.56	105.12	287.16	352.32	31.1	
13	12	23.42	9	209.38	90.16	133.42	121.5	76.3	64.42	406.88	269.62	16.88	
14	7.2	22.48	64.26	162.46	49.04	89.9	156.68	56.28	49.12	282.92	331.1	12.6	
15	4.18	21.92	33.48	161.66	40.6	62.58	401.44	58.94	170.98	271.16	311.44	7.28	
16	2.58	37.58	44.78	107.44	37.2	84.94	285.28	76.4	313.5	253.12	326.08	8.96	
17	3.08	28.6	144.62	195.54	26.6	135	179.5	49.6	173.54	163.66	290.92	5.18	

18	22.56	23.28	103.18	164.28	22.62	142.54	141.38	49.54	211.48	206.9	173.48	9.86
19	11.22	21.68	142.68	238.38	18.36	109.44	131.66	229.5	146.5	137.72	140.34	32.8
20	6.7	38.22	83.8	183.76	15.6	128.54	92.76	131.18	96.92	181.54	97.98	20.56
21	7.8	32.16	51.68	387.98	49.04	112.7	156.14	128.62	194.5	248.52	229.36	79.56
22	8.78	37.98	33.72	215.38	108.78	219.94	130.98	169.22	172.78	342.82	369.28	51.08
23	20.46	40.18	19.24	232.44	153.64	235.7	72.86	168.46	105.24	316.68	322.08	33.92
24	17.02	24.86	27.68	248.5	118.48	127.12	66.88	143.86	69.8	229.58	288.9	26.24
25	14.3	87.72	57.68	364.44	110.92	80.1	44	288.78	62.44	441.22	233.54	24.26
26	13.82	58.42	40.04	310.92	109.82	52.02	30.78	164.72	85.76	325.42	188.36	15.44
27	7.12	58.64	60.72	349.3	143.38	39.54	73.22	215.76	181.22	304.92	140.1	60.72
28	4.76	30.56	173.82	422.34	187.62	37.66	102.86	127.88	132.18	306.5	104.48	77.34
29	9.32	27.42	259.42	236.74	159.06	63	66.7	105.9	110.48	629.24	68.56	108.2
30	4.94		160.9	385.96	200.52	275.16	73.1	161.84	81.98	318.06	70.74	102.9
31	2.96		200.26		323.42		158.56	170.6		353.62		57.72

Tabla 22. Caudales del Caño Icacal que corresponden al 20% del Río Lebríja periodo 2016

Comprendiendo que los caudales de las tablas 17 a la 22 son los caudales correspondientes a la bifurcación del Río Lebrija que corresponde al Caño Icacal, todos los cálculos correspondientes se realizaron solo para estos caudales. En la tabla 15 se evidencia el promedio mensual de caudales para el Icacal

Oferta hídrica media mesuales Caño Icacal		
Mes	Q(m ³ /s)	Q(m ³ /día)
Enero	36.522043	3155504.52
Febrero	78.1749364	6754314.51
Marzo	124.595914	10765087
Abril	214.853251	18563320.9
Mayo	193.631075	16729724.9
Junio	125.012968	10801120.4
Julio	109.337849	9446790.19
Agosto	148.27871	12811280.5
Septiembre	148.960566	12870192.9
Octubre	223.349462	19297393.5
Noviembre	207.614362	17937880.9
Diciembre	84.7693548	7324072.26

Tabla 23. Caudales medios mensuales para Caño Icacal

8.2.3. Análisis resultados Oferta Hídrica

De acuerdo a los resultados de los caudales diarios de la cuenca del Río Lebrija, mediante el Modelo del SCS , se evidenció que los meses donde se encuentran los picos de caudales más altos corresponde a los meses de Abril y Mayo con una escorrentía media de 214.85 m³/s y 193.63 m³/s respectivamente, para el primer semestre del año; en el segundo semestre del año, se denotó que, para los meses de octubre y noviembre los caudales medios fueron de 223.35 m³/s y 207.61m³/s , respectivamente. Esto obedece al comportamiento climático de la región que consiste en un régimen climático bimodal característica de la región andina y caribe de Colombia. (Arango, Dorado, Guzman, & Ruiz, 2012).

Se identificó que el caudal máximo corresponde a un valor de 712,48 m³/s el cual se presentó el día 8 de diciembre de 2011; este caudal máximo se presento debido a que durante este año las condiciones climáticas fueron extremas debido al fenómeno de la niña.

Se observó también que los meses con menores caudales corresponden a Diciembre y Enero; esto se debe a que en condiciones normales este periodo de tiempo corresponde al periodo de verano en esta región del país, sin embargo, se identificó que, a pesar de que la precipitación disminuya en estos periodos de tiempo, el flujo de agua en el río se conserva durante todo el año con las condiciones actuales de uso.

8.3. Objetivo 3: Determinar si el caudal disponible del caño Icacal (bifurcación del Río Lebrija) es óptimo para la demanda hídrica de las actividades de

fracturamiento hidráulico en el municipio de San Martín cesar, sin afectar el caudal ambiental de la cuenca.

Para cumplir este objetivo fue necesario reconocer la demanda hídrica que requiere la empresa ConocoPhillips para sus actividades de fracturamiento hidráulico. Para este fin se identificó en el EIA que la empresa presentó ante el ANLA el volumen necesario para cada pozo y la cantidad de tiempo para la extracción.

De acuerdo a esto, la empresa manifestó que para el desarrollo de fracturamiento hidráulico realizará seis pozos hasta la profundidad de la formación la Luna, es decir una profundidad entre 1524m y 3657,6m, en la que realizarán 200 etapas de detonaciones (una etapa es un evento individual o agrupado de una o varios puntos de iniciación de fractura, organizados para distribuir el Propante dentro de la roca fuente de hidrocarburos).

Se realizarán máximo 6 etapas por día para así tener una duración aproximada de 34 días para la estimulación, es decir 34 días por pozo. El volumen necesario para dicho proceso será de 103 m³ por etapa. (AnteaGroup & ConocoPhillips, 2017)

En la tabla número 24 se puede apreciar los volúmenes y caudales necesarios para el fracturamiento hidráulico.

Variable	Ecuaciones	Resultado
Volumen por pozo	$Volumen\ pozo = 103m^3 * 200\ etapa$	20 600 m ³
Caudal inyectado diario	$Q_{diario} = \left(\frac{6\ puntos}{día}\right) * \frac{103m^3}{1\ punto}$	618 m ³ /día
Días de fracturamiento hidráulico	$días = \frac{34\ días}{pozo} * 6\ pozos$	204 días/año
Volumen consumo total para fracturamiento hidráulico	$Volumen\ total = \frac{618\ m^3}{día} * 204\ días$	126 072 m ³
Caudal inyectado por segundo	$Q_{seg} = 618 \frac{m^3}{día} * \frac{1\ día}{86400\ s}$	0,00715 m ³ /s

Tabla 24. Demanda hídrica para fracturamiento hidráulico para APE- PLATA

Al haber reconocido la demanda hídrica para fracturamiento hidráulico, se procedió a realizar la curva de duración de caudales de la cuenca del caño Icacal para así mismo reconocer el caudal ambiental del río y reconocer el caudal disponible para las actividades de fracturamiento hidráulico, pues de acuerdo (EMPAM S.A., 2014) en la metodología para el estudio regional de agua, el caudal ambiental se estima como el percentil de excedencia del 75% o del 85% sobre la curva de duración de caudales.

En la figura 12 se encuentra la curva de duración de caudales:

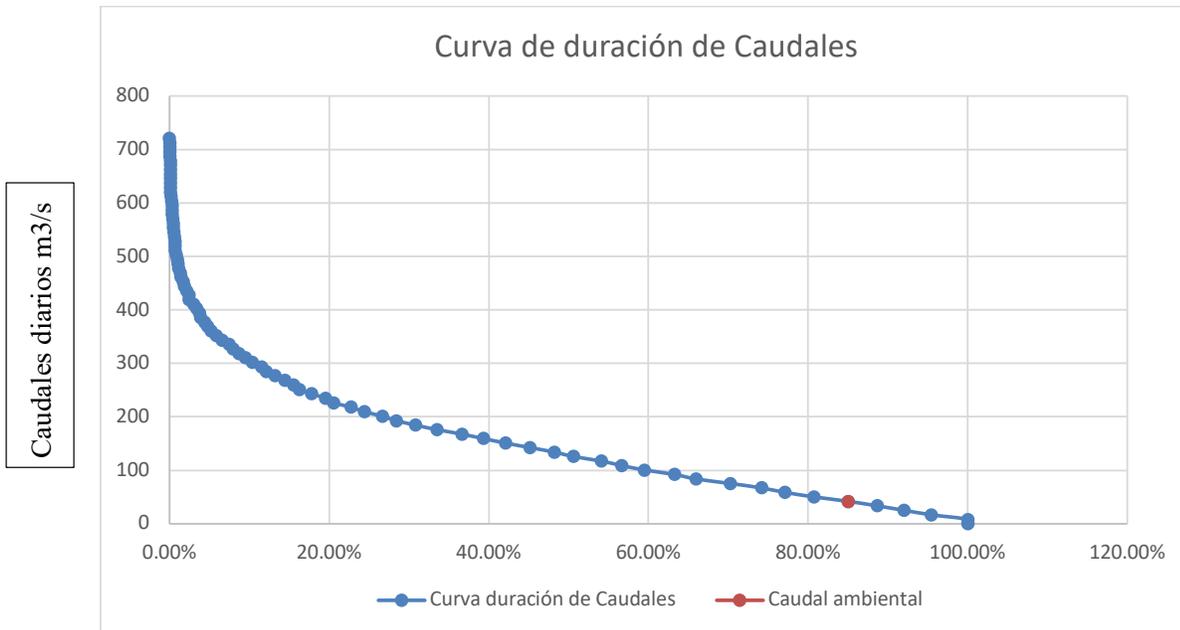


Figura 12. Curva de duración de caudales periodo 2011 a 2016. Realizado por Autora.

En la curva de duración de caudales, se estableció en el eje Y los valores correspondientes a los caudales diarios expresados en m³/s correspondientes al periodo de tiempo del 1 de enero de 2011 al 31 de diciembre de 2016.

En la tabla 25 se encuentran los valores de los 120 intervalos que fueron utilizados conforme a la oferta hídrica del caño Icacal que se obtuvo en el objetivo 2.

Tabla frecuencias			
Caudales (m3/s)	Frecuencias	%	% Acumulado
720.8616471	0	0.00%	0.00%
712.48	1	0.05%	0.05%
704.0983529	0	0.00%	0.05%
695.7167059	0	0.00%	0.05%
687.3350588	0	0.00%	0.05%
678.9534118	1	0.05%	0.09%
670.5717647	0	0.00%	0.09%
662.1901176	0	0.00%	0.09%
653.8084706	0	0.00%	0.09%
645.4268235	0	0.00%	0.09%
637.0451765	1	0.05%	0.14%
628.6635294	0	0.00%	0.14%
620.2818824	0	0.00%	0.14%
611.9002353	1	0.05%	0.18%
603.5185882	1	0.05%	0.23%

595.1369412	2	0.09%	0.32%
586.7552941	0	0.00%	0.32%
578.3736471	1	0.05%	0.37%
569.992	1	0.05%	0.41%
561.6103529	1	0.05%	0.46%
553.2287059	1	0.05%	0.50%
544.8470588	1	0.05%	0.55%
536.4654118	1	0.05%	0.59%
528.0837647	2	0.09%	0.68%
519.7021176	0	0.00%	0.68%
511.3204706	1	0.05%	0.73%
502.9388235	3	0.14%	0.87%
494.5571765	2	0.09%	0.96%
486.1755294	2	0.09%	1.05%
477.7938824	2	0.09%	1.14%
469.4122353	5	0.23%	1.37%
461.0305882	2	0.09%	1.46%
452.6489412	6	0.27%	1.73%
444.2672941	3	0.14%	1.87%
435.8856471	6	0.27%	2.15%
427.504	6	0.27%	2.42%
419.1223529	1	0.05%	2.46%
410.7407059	12	0.55%	3.01%
402.3590588	8	0.37%	3.38%
393.9774118	9	0.41%	3.79%
385.5957647	3	0.14%	3.93%
377.2141176	11	0.50%	4.43%
368.8324706	7	0.32%	4.75%
360.4508235	11	0.50%	5.25%
352.0691765	14	0.64%	5.89%
343.6875294	15	0.68%	6.57%
335.3058824	19	0.87%	7.44%
326.9242353	12	0.55%	7.99%
318.5425882	15	0.68%	8.67%
310.1609412	19	0.87%	9.54%
301.7792941	19	0.87%	10.41%
293.3976471	25	1.14%	11.55%
285.016	13	0.59%	12.14%
276.6343529	23	1.05%	13.19%
268.2527059	27	1.23%	14.42%
259.8710588	25	1.14%	15.56%

251.4894118	15	0.68%	16.25%
243.1077647	34	1.55%	17.80%
234.7261176	39	1.78%	19.58%
226.3444706	22	1.00%	20.58%
217.9628235	47	2.15%	22.73%
209.5811765	37	1.69%	24.42%
201.1995294	49	2.24%	26.65%
192.8178824	39	1.78%	28.43%
184.4362353	53	2.42%	30.85%
176.0545882	58	2.65%	33.50%
167.6729412	69	3.15%	36.65%
159.2912941	59	2.69%	39.34%
150.9096471	61	2.78%	42.13%
142.528	66	3.01%	45.14%
134.1463529	67	3.06%	48.20%
125.7647059	53	2.42%	50.62%
117.3830588	76	3.47%	54.08%
109.0014118	56	2.56%	56.64%
100.6197647	63	2.88%	59.52%
92.23811765	83	3.79%	63.30%
83.85647059	58	2.65%	65.95%
75.47482353	94	4.29%	70.24%
67.09317647	86	3.93%	74.17%
58.71152941	65	2.97%	77.13%
50.32988235	79	3.61%	80.74%
41.94823529	95	4.34%	85.08%
33.56658824	79	3.61%	88.68%
25.18494118	74	3.38%	92.06%
16.80329412	75	3.42%	95.48%
8.421647059	99	4.52%	100.00%
0.04	0	0.00%	100.00%

Tabla 25 Valores e intervalos de curva de duración de caudales.

8.3.1. Análisis de curva de duración de caudales y determinación de caudal ambiental

En un principio, se identificó que la curva de duración de caudales tiene una pendiente pronunciada, esto se debe a que se realizó de acuerdo a los caudales diarios, debido a que los caudales pueden variar bastante de un día a otro a diferencia de una curva de duración de caudales tiende a suavizarse cuando se realiza con datos mensuales. (caudales C. 7., s.f.)

Se identificó en el 85% de la curva, que el caudal ambiental corresponde a un valor de 41,94 m³/s, ello comparado con los caudales medios mensuales indica que para Enero no es posible realizar captación de aguas. Dado que el caudal durante este mes es menor al caudal ambiental

y por lo tanto si se llegase a extraer agua en este periodo de tiempo las dinámicas ambientales del drenaje se verían afectadas.

8.3.2. Relación oferta hídrica/ demanda hídrica para fracturamiento hidráulico

Habiendo reconocido el caudal ambiental se determinó mediante la ecuación 13 el caudal total disponible diario para las actividades de fracturamiento hidráulico.

$$Q_{disponible} = Q_{85\%} - Q_{100\%}$$

Ecuación 13. Ecuación para determinar el caudal disponible para demanda hídrica

Donde Q_{85} corresponde al caudal ambiental y Q_{100} corresponde al 100% de caudal en la curva de duración de caudales.

Como se evidenció, el valor de Q_{100} es $0,04 \text{ m}^3/\text{s}$ que corresponde a los caudales de los primeros días de enero, por lo tanto el caudal máximo disponible es de $41,90 \text{ m}^3/\text{s}$. Teniendo en cuenta que el caudal requerido para las actividades de fracturamiento hidráulico es de $618 \text{ m}^3/\text{día}$ se procedió a calcular el caudal ambiental en las mismas unidades de tiempo para así comparar dichos caudales. (Chow, Maidment, & Mays, 2000)

La ecuación utilizada para ello fue la siguiente:

$$Q_{\text{m}^3/\text{día}} = \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * \frac{86400\text{-s}}{\text{día}}$$

Ecuación 14. Ecuación para determinar caudal en días como unidad de tiempo

Como resultado se obtuvo que el caudal disponible por día es de $3.624.327,53 \text{ m}^3/\text{día}$ es decir un caudal 5864,60 veces mayor a el caudal requerido para el fracturamiento hidráulico, sin embargo, se debe tener en cuenta que dicho caudal no es permanente durante todo el año, por ello se realizó una comparación de caudales entre el caudal oferta y el caudal demandado para la duración de tiempo de un año.

Para ello se calcularon los caudales medios mensuales para el periodo de 2011-2016 que se encuentran en la tabla 26.

Oferta hídrica media mensual			Demanda hídrica para Fracturamiento Hidráulico Media mensual
	Q(m3/s)	Q(m3/día)	Q(m3/día)
Enero	36.52	3155504.5	19158.00
Febrero	78.17	6754314.5	17304.00
Marzo	124.60	10765087.0	19158.00
Abril	214.85	18563320.9	18540.00
Mayo	193.63	16729724.9	19158.00
Junio	125.01	10801120.4	18540.00
Julio	109.34	9446790.2	19158.00

Agosto	148.28	12811280.5	19158.00
Septiembre	148.96	12870192.9	18540.00
Octubre	223.35	19297393.5	19158.00
Noviembre	207.61	17937880.9	18540.00
Diciembre	84.77	7324072.3	19158.00

Tabla 26 caudales medios mensuales

Seguido de esto, se procedió a graficar los caudales medios mensuales y se sobrepuso una curva donde se muestra el caudal diario requerido para actividades de fracturamiento hidráulico para evaluar la capacidad del río, la figura 12 se encuentra esa comparación de oferta hídrica y demanda hídrica para fracturamiento.

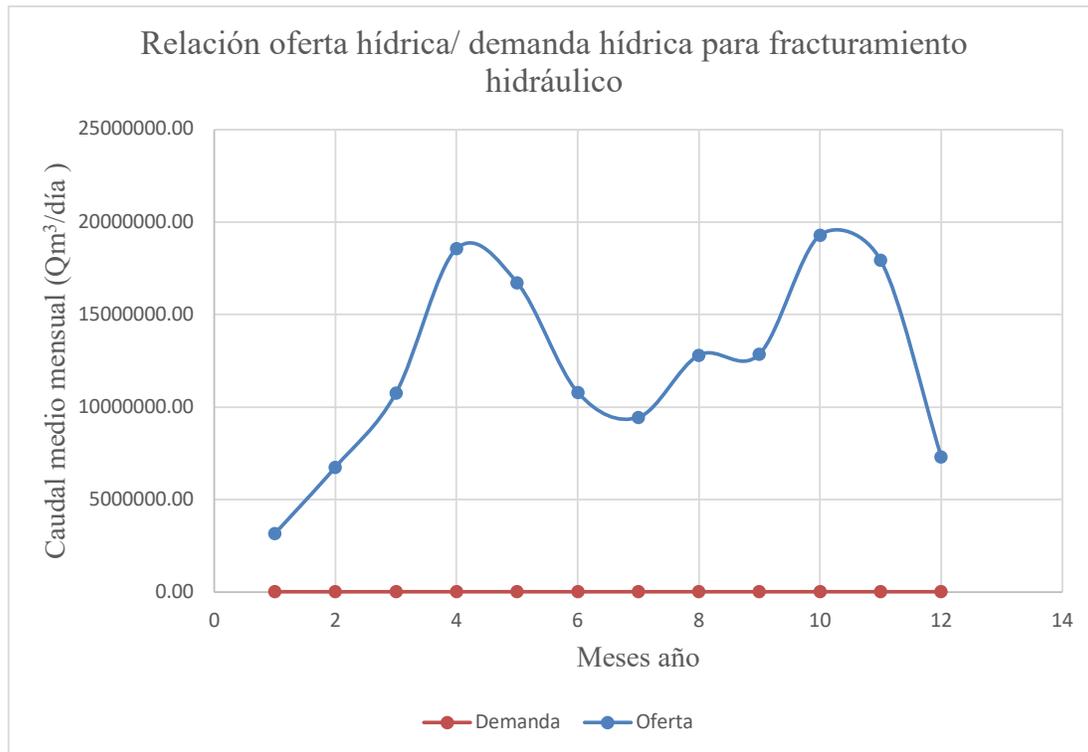


Figura 13. Relación oferta hídrica/ demanda hídrica para fracturamiento hidráulico

8.3.2.1. *Análisis Relación oferta hídrica/ demanda hídrica para fracturamiento hidráulico*

Como se evidencia en la figura 13 la oferta hídrica del caño Icacal siempre supera la demanda hídrica del proyecto APE-plata de fracturamiento hidráulico, esto no quiere decir que durante todos los meses del año se pueda captar el caudal necesario para las actividades ya que se debe asegurar el caudal ambiental.

Por este motivo se realizó una grafica donde se relaciona los caudales de oferta y demanda respecto al caudal ambiental, dicha grafica se encuentra en la figura 14.

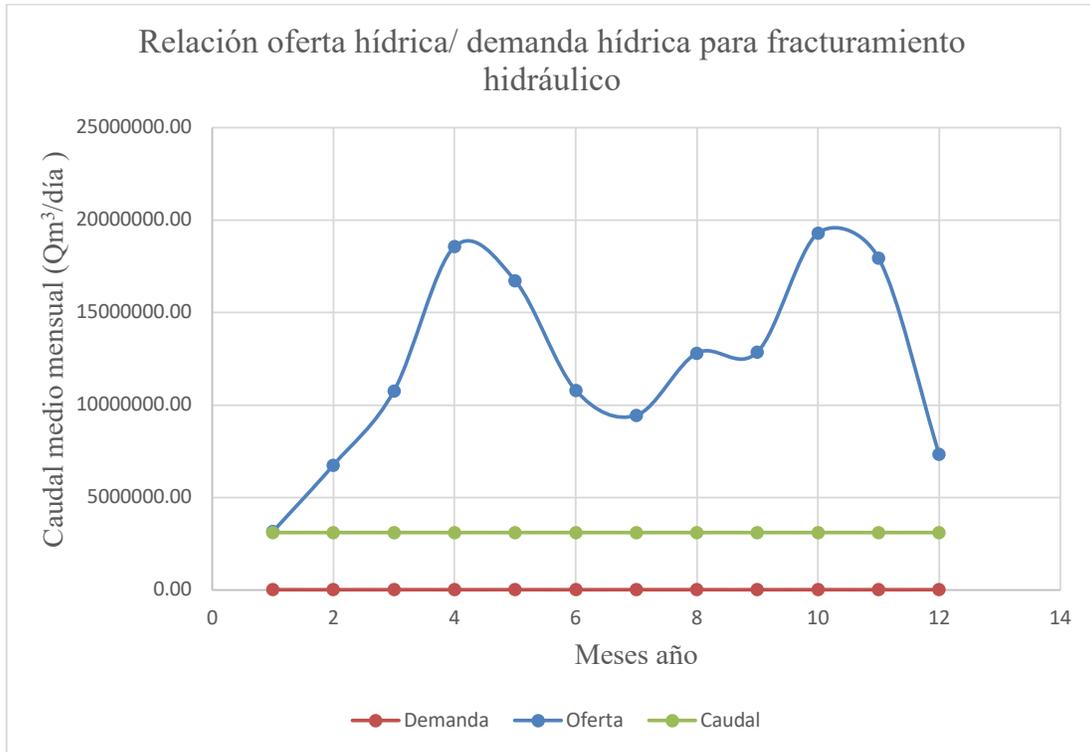


Figura 14. Relación oferta hídrica/ demanda hídrica para fracturamiento hidráulico respecto al caudal ambiental.

En la figura 14 se puede apreciar que durante el mes de enero en caudal del río se encuentra al nivel del caudal ambiental, por lo tanto, no es posible realizar captación de agua durante este periodo de tiempo.

Seguido a esto, para el mes de febrero, de realizarse captación de agua durante este mes el caudal podría llegar a disminuirse por debajo del caudal ambiental, por esta razón se determinó la variación del caudal con actividad, es decir con captación de agua para fracturamiento hidráulico, proceso realizado mediante la ecuación 16 .

$$Q_{con\ captación} = Q_{oferta} - Q_{demanda}$$

Ecuación 16. Ecuación para determinar caudal en días como unidad de tiempo

En la tabla 27 se puede apreciar los valores obtenidos del caudal con actividad.

Meses	Oferta hídrica media mensual	Demanda hídrica media mensual para Fracturamiento hidráulico	Caudal con actividad
	Q(m3/día)	Q(m3/día)	Q(m3/día)
Enero	3155504.516	19158	3136346.516
Febrero	6754314.508	17304	6737010.508

Marzo	10765086.97	19158	10745928.97
Abril	18563320.88	18540	18544780.88
Mayo	16729724.9	19158	16710566.9
Junio	10801120.41	18540	10782580.41
Julio	9446790.194	19158	9427632.194
Agosto	12811280.52	19158	12792122.52
Septiembre	12870192.93	18540	12851652.93
Octubre	19297393.55	19158	19278235.55
Noviembre	17937880.88	18540	17919340.88
Diciembre	7324072.258	19158	7304914.258

Tabla 27. Caudal Caño Icacal con actividad

En la figura 15 se aprecia como se vería afectado el caudal del Caño Icacal con actividad comparado con el caudal ambiental.

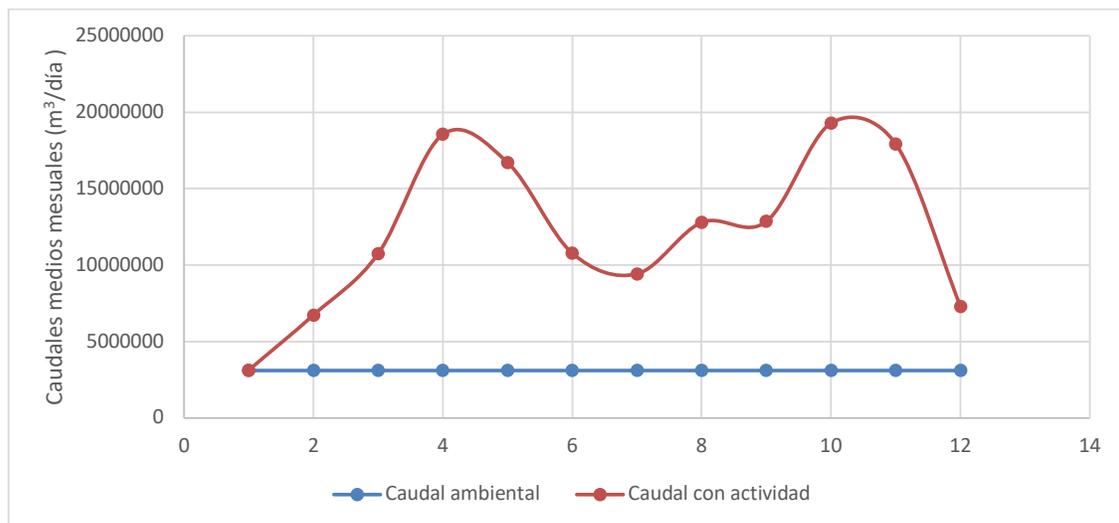


Figura 15. Comparación caudal con actividad respecto al caudal ambiental

En la figura 15, permitió apreciar que, con actividad solo durante el mes de enero, se podría ver afectado el caudal ambiental, teniendo en cuenta que las actividades de fracturamiento hidráulico se realizarían solo durante 204 días al año es decir durante 7 meses, se determinó que el periodo de tiempo más apropiado para la captación de agua sería en los meses de abril a octubre.

Es recomendable que la captación no sea constante, pues la curva de duración de caudales que se encuentra en la figura 12 demuestra que la variación de los mismos es alta.

Como medida preventiva ante esto es conveniente que, para la ejecución de las actividades de fracturamiento hidráulico, se almacene en tanques el caudal demandado para las mismas durante los meses de abril y octubre meses donde se encuentra los caudales más altos.

9. CONCLUSIONES

1. En cuanto a la definición de la cuenca del Río Lebrija y el reconocimiento de las características morfométricas, permitió establecer la variabilidad en los tiempos de concentración para cada una de las subcuencas, dado el contraste de pendientes; a diferencia de la subcuenca 4 la cual posee un mayor tiempo de concentración debido a que se localiza en la parte baja de la cuenca, en el Valle Medio del Magdalena. Así mismo se determinó que el tiempo de concentración para las subcuencas 1, 2, 3 y 5 es menor, debido a las pendientes altas que conllevan a una velocidad de flujo mayor.
2. Comprender las características morfométricas y geomorfológicas de la cuenca permitió identificar que el punto de captación de aguas establecido por ConocoPhillips sobre el caño Icacal, se ubica en una llanura aluvial, con pendientes entre 1% y 3% lo cual la hace propensa a inundaciones en los meses de mayor caudal.
3. La tendencia de los caudales, indicó que, durante todo el año, el caudal de la cuenca manifiesta variaciones, ello se demostró mediante la presencia de picos de caudales altos para los meses de abril y octubre, en contraste con los meses de diciembre y enero donde los caudales son bajos; sin embargo, y a pesar de dichas variaciones, siempre existe un flujo de agua sobre el drenaje.
4. La oferta hídrica del caño Icacal disponible, es 5.864,60 veces mayor al caudal demandado para las actividades de fracturamiento hidráulico, lo que asegura que el caño Icacal puede abastecer la demanda sin generar efectos irreversibles sobre las dinámicas del mismo.
5. Se determinó que el caudal del caño Icacal es óptimo para el desarrollo de actividades de fracturamiento hidráulico sin afectar el caudal ambiental, entre los meses de abril a octubre.

10. RECOMENDACIONES

1. En cuanto a la teledetección de las imágenes satelitales que fueron analizadas es importante resaltar que este tipo de información puede contar con un margen de error ya que los resultados obtenidos no fueron corroborados en campo, sin embargo, se corroboraron con la información disponible sobre la cuenca.
2. La confiabilidad del uso de modelos de elevación digital para determinar drenajes de una cuenca en zonas muy planas es baja, debido a que si no se cuenta con un modelo de alta precisión los datos pueden resultar erróneos a la hora de determinar los drenajes correspondientes a una cuenca, por esta razón para este proceso se recomienda realizar

interpretación de mapas del IGAC y/o teledetección de imágenes satelitales landsat de mayor resolución para obtener resultados más próximos a la realidad.

3. Los meses más recomendados para realizar captación del recurso hídrico son de Abril a Octubre, aunque como se evidencia en la figura 12 el caudal del caño Icacal es muy cambiante y por eso lo más apropiado como medida de prevención es realizar captaciones y almacenamiento durante los meses de Abril y Octubre donde se encuentran los picos más altos de caudal.
4. Para asegurar el desarrollo seguro y sostenible de la técnica de fracturamiento hidráulico en Colombia es necesario evaluar diferentes aspectos ambientales desde otro enfoque investigativo, sin embargo, en cuanto abastecimiento del recurso hídrico la técnica es sostenible.

11. BIBLIOGRAFÍA

Agencia Nacional De Hidrocarburos. (2015). Contrato adicional de Exploración y producción, E&P Yacimientos no Convencionales de Hidrocarburos. Contrato.

Alcaldía Municipio De San Martín Cesar. (2018, Abril 4). Nuestro Municipio. Retrieved from Alcaldía Municipal de San Martín en Cesar : <http://www.sanmartin-cesar.gov.co/municipio/nuestro-municipio>

ANLA; Sostenible, Ministerio de ambiente y Desarrollo. (2015). Términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental- EIA en proyectos de construcción de carreteras y/o túneles. Bogotá DC.

AnteaGroup & ConocoPhillips. (2017). Estudio de Impacto Ambiental para La Perforación Exploratoria de hidrocarburos - Área de perforación (APE) Plata. Bogotá.

Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (2014). Terminos de Referencia Para la Elaboración de Estudio de Impacto Ambiental Proyectos de Explotación de Hidrocarburos. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Ballesteros Camaro, C. A., & Parra Mendez, J. A. (2012). Estudio estratigráfico secuencial para la formación La Luna en el costado oriental de la cuenca del valle medio del Magdalena: una visión exploratoria de hidrocarburos no convencionales. Bucaramanga.

Bateman, A. (2007). Hidrología Básica y Aplicada. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.

Boudet , Clarke , Bugden, D., Maibach, E., Roser-Renouf, C., & Leiserowitz, A. (2013). “Fracking” controversy and communication: Using national survey data to understand public perceptions of hydraulic fracturing. Estados Unidos de America.

Cabrera, J. (n.d.). Calibración de Modelos Hidrológicos. Universidad Nacional de Ingeniería. Calderón Velázquez, L. M. (2015). Actualización conceptual de la matriz de identificación de aspectos y evaluación de impactos ambientales para las líneas de servicio MI-SWACO y WELL services en Schulumber-Base Cota. Bogotá D.C.

Cárdenas, A. E., & Yunes Cañate, K. M. (2015). Fracking: Extracción de gas y petróleo no convencional, y su impacto ambiental. Cartagena

Charry Ocampo, S., & Anibal J., P. (2017). Efectos de la estimulación hidráulica (fracking) en el recurso hídrico: Implicaciones en el contexto colombiano. Ciencia e ingeniería Neogranadina, 28(1), 135-164.

Consejo Nacional de Política Económica y Social. República de Colombia, Departamento Nacional de Planeación. (2014, Agosto 20). Documento Conpes 3762. Retrieved Noviembre 3, 2018, from Infraestructura Colombiana de datos espaciales: http://www.icde.org.co/sites/default/files/12.CONPES%203762%20de%202014_0.pdf

Dirección de Gestión del Riesgo - Ministerio de Interior y Justicia. (2011, Mayo 12). Reporte de emergencias. Retrieved from Reporte de emergencias por fenómeno de la niña DGR- IDEAM - Policía de Carreteras -CAR:

https://www2.fcm.org.co/fileadmin/Contenidos/pdf/reporte_emergencias_mayo12.pdf

Dominguez, E., R., R., Vanegas Sarmiento, R., & P., M. (2008). Relaciones de- manda-oferta de agua y el índice de escasez de agua como herramientas de evaluación del recurso hídrico colombiano. Revista Academica Colombiana. ciencia, Volumen XXXII(123), 196-211.

EMPAM S.A. (2014). Metodología Para la Evaluación Regional del Agua (ERA) documento de síntesis. Basado en el documento de lineamientos metodológicos del IDEAM , Acueducto de Bogotá, Bogotá .

ESRI. (2017). Modelos digitales de elevación . Retrieved Febrero 10, 2019, from Learn Arcgis: <https://learn.arcgis.com/es/related-concepts/digital-elevation-models.htm>

Catelli, F. (2016, Agosto 11). Qué productos exporta Colombia: los índices Económicos del año 2016. Retrieved from Noticias comercio exterior, CVN: <https://www.cvn.com.co/que-productos-exporta-colombia/>

Gallart, F., & Llorens, P. (s.f.). Relaciones entre los cambios de cubierta vegetal y recursos hídricos en las cuencas hidrográficas: evidencias e incertidumbres. Barcelona: Instituto de Diagnostico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)/ CSIC.

Gaspari , F., Rodríguez Vagaría, A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, M., & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. AUGMDOMUS, 4.

Hidrología 1: Ciclo Hidrológico. (n.d.).

IDEAM. (2004). Metodología para calculo de índice de escasez . Bogotá.

IDEAM. (2014). Hidrología. Retrieved enero 20, 2019, from Participación Ciudadana : <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/hidrologia>

IDEAM. (2018). Reporte de avance del Estudio Nacional del Agua ENA 2018 . Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales , Bogotá D.C.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. (2004, Septiembre). Metodología Para el Cálculo del Índice de Escasez de Agua Superficial. Retrieved Noviembre 12, 2018, from Documentación IDEAM:

<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021143/metodologia-calculo.pdf>
International Organization for Standardization (s.f). ISO 14001:2004(es). Recuperado de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14001:ed-2:v1:es:term:3.10>

Jimenez Cortes, C. (2017). Caracterización Morfométrica y Diagnóstico del recurso hídrico del Rio Lindo en el Municipio de Viotá, Cundinamarca. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C.

Lechtenböhmer, S. A., Capito, S., Matra, Z., W., W., & Zittel, W. (2011). Repercusiones de la extracción de gas y petróleo de esquisto en el medio ambiente y la salud humana. Parlamento Europeo, Departamento Temático Política Económica y Científica. Medio ambiente, salud pública y seguridad alimentaria. Bruselas: ENVI.

López, A. & Cruz, E. (2016). Planificación del recurso hídrico en la quebrada Aguas Blancas, zona rural de Montería, Córdoba. *Prospect*, 14, 71-80.

Mathes, G. (2014). U.S Regulations applicable to unconventional oil & gas development. *Trihydro*.

Ministerio de minas y energía. (2015). *Glosario Técnico Minero*. Bogotá D.C.

Naranjo Plata, D. P. (2016). Técnicas, normativas y recomendaciones para la gestión ambiental de la aplicación de la fractura hidráulica(fracking) en Colombia. Bogotá: Facultad de estudios ambiental y desarrollo rural.

Pacheco, P., Cardona Molina, A., & Cortes, F. (2014, Enero 03). Caracterización composicional y de capacidad de almacenamiento en muestras de superficie de las formaciones Conejo y La Luna (Valle medio del Magdalena y Cordillera Oriental): Implicaciones para la evaluación del shale gas cretácico en Colombia . *Boletín de ciencias de la tierra*, 45-53.

Presidencia Nacional de la República de Colombia. (1974, diciembre 18). Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Bogotá D.C., Cundinamarca, Colombia.

Rahm, D. (2011). Regulating hydraulic fracturing in shale gas plays: The case of Texas. *ELSEVIER*, 2974–2981.

Ruiz, E. R., & Martínez, M. S. (2015). Infiltración y Humedad del suelo. In E. R. Ruiz, & M. S. Martínez, *Hidrología Aplicada*. País Vasco, España.

Salinas Avellaneda, A. (2015). Criterios sanitario ambientales a tener en cuenta en los proyectos de “fracking” en España. XIII congreso español de salud ambiental (pp. 54-60). *Revista Salud ambiental*.

Sampieri. (2014). *Metodología de la investigación*. McGrawhill.

Sanchez , K., Jimenez, F., Velasquez, S., Piedra, M., & Romero, E. (2004). Metodología de análisis multicriterio para la identificación de áreas prioritarias de manejo del recurso hídrico en la cuenca del río Sarapiquí, Costa Rica. *Recursos naturales y ambiente*, 89-95.

Schneider, F. (2014). *Yacimientos No Convencionales* . Bogotá: BeicipFranlab.

Segovia, M. y. (n.d.). Estimación Valor de Número de Curva (CN)a Través de Imágenes Satelitales Landsat 5-tm. Departamento hidráulica- Facultad Ingeniería- UNNE.

Soto, A., & M., C. (2014). Estimación de Caudal Ecológico Por métodos Q10 y Q75 y los Factores de Reducción del 25% en el Río Ocoa, A partir de la Generación de Caudales Darios Utilizando el Modelo Agregado de Tanques. Bogotá.

Soulis, K., & J.D., V. (2012). SCS-CN parameter determination using rainfall-runoff data in heterogeneous watersheds – the two-CN system approach. Hydrology and Earth System Sciences, 1001- 1015.

USGS EROS archive. (n.d.). USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Void Filled. Retrieved from USGS EROS Archive: https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-void?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects

Vásquez. (2016). Manejo y gestión de Cuencas Hidrográficas. Lima.

Yepes, P. V. (2011, Julio 11). Poligonos de thiessen en ArcGis. Retrieved from Aguas y SIG: <https://www.aguaysig.com/2011/07/poligonos-de-thiessen-en-arcgis.html>