

Balance Hídrico y su Relación con la Amenaza a Procesos de Erosión Hídrica en la Microcuenca  
Jurado

Nicolás Perdomo Carvajal

Trabajo de Grado para optar el Título de Ingeniero Civil

Directores

María Esther Rivera  
PhD. en Hidrología

Jesús Ramón Delgado Rodríguez  
MSc. en Geotecnia

Universidad de Pamplona  
Facultad de Ingenierías y Arquitectura  
Departamento de Ingeniería Civil, Ambiental y Química  
Programa de Ingeniería Civil  
Pamplona, Norte de Santander

2020

Nota de aceptación

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado



*Al Sagrado Corazón de Jesús, patrono de mi comunidad de Betania, por brindarme la valentía y fortaleza de haber dejado mi pueblo para experimentar en tierras lejanas una hermosa aventura en la Universidad de Pamplona.*

*A mi mamá, tal vez sin ella y sin sus sabios consejos no hubiese sido posible llegar hasta este momento en mi vida; así mismo, a mi papá, por su apoyo en todo momento, sin él tampoco hubiese sido posible llevar a cabo mis estudios.*

*A mi tío Dedier, quien ha sido un ser especial que me brindó la posibilidad de conocer tierras santandereanas y ha sido mi mayor admiración.*

*A toda mi familia en general, que siempre creyeron en mí y me acompañaron desde la distancia para poder llevar a cabo mis estudios.*

*Por último, a mi hermosa comunidad de Betania, amigos y amigas, siempre los llevaré en mis recuerdos a cada lugar que vaya.*

## Agradecimientos

v

Agradezco a DIOS, por brindarme la protección en cada lugar que conocí para poder terminar mis estudios en la Universidad de Pamplona; así mismo, por su guía y paciencia al escucharme en cada momento difícil que tuve en Pamplona mientras desarrollaba mis estudios.

Mamá y papá, no tengo cómo pagarles el amor, la paciencia, las enseñanzas, y el apoyo incondicional que siempre me han brindado. Gracias, mil gracias, los amo, esto es por ustedes y para ustedes. Tío Dedier, gracias por su apoyo, sin usted no hubiese sido posible haber tenido la inspiración para poder dejar mi casa y experimentar nuevos horizontes. Gracias Mile y Juli, ustedes también son parte de ésta experiencia. Familia, ustedes son mi refugio en cada momento de mi vida, los quiero. Gracias a cada uno de mis abuelos, abuelas, tíos, tías, primo y primas por su apoyo incondicional.

Gracias a mis maestros María Esther y Jesús Ramón por sus sabios consejos y enseñanzas, especialmente, gracias por mostrarme el verdadero valor de la humildad para llevar a cabo cada una de las experiencias que nos regala la vida.

Gracias comunidad de Betania, a todos mis amigos y amigas, los llevaré siempre en mis recuerdos.

Agradezco a cada uno de los centros educativos por donde tuve el honor de cursar mis estudios, Universidad de Pamplona, Universidad Surcolombiana, colegio Ana Elisa Cuenca Lara, escuela de Betania, Yes Institute; así mismo, agradezco a cada uno de los profesores que hicieron parte de mí vida. Muchas gracias.

	Pág.
<b>Introducción</b> .....	16
<b>1. Planteamiento del Problema</b> .....	19
<b>2. Justificación</b> .....	21
<b>3. Objetivos</b> .....	22
<b>Objetivo General</b> .....	22
<b>3.1 Objetivos Específicos</b> .....	22
<b>4. Marco Referencial</b> .....	23
<b>4.1 Antecedentes</b> .....	23
➤ <b>Antecedentes Internacionales</b> .....	23
➤ <b>Antecedentes Nacionales</b> .....	26
➤ <b>Antecedentes Regionales y locales</b> .....	30
<b>4.2 Marco Contextual</b> .....	30
<b>4.3 Marco teórico</b> .....	32
<b>4.3.1 Hidrometeorología</b> .....	32
<b>4.3.2 Morfometría</b> .....	41
<b>4.3.3 Geología</b> .....	49
<b>4.3.4 Geomecánica</b> .....	51
<b>4.3.5 Erosión hídrica</b> .....	51
<b>4.3.6 Teledetección y Sistema de Información Geográfico (SIG)</b> .....	53
<b>4.4 Marco Legal</b> .....	58
<b>5. Metodología</b> .....	62
<b>5.1 Caracterización física y morfométrica de la microcuenca Jurado.</b> .....	62
<b>5.2 Análisis de la escorrentía superficial en la microcuenca Jurado estimando la precipitación efectiva, bajo la metodología del número de curva.</b> .....	62
<b>5.3 Determinación de la oferta y demanda hídrica en la microcuenca Jurado.</b> .....	67
<b>5.4 Obtención de la relación precipitación-escorrentía en la microcuenca Jurado.</b> .....	74
<b>5.5 Análisis de la amenaza a procesos de erosión hídrica en la microcuenca Jurado.</b> .....	74
<b>6. Resultado y Discusión</b> .....	77
<b>6.1 Caracterización física y morfométrica de la microcuenca Jurado.</b> .....	77
<b>6.2 Análisis de la escorrentía superficial en la microcuenca Jurado estimando la precipitación efectiva, bajo la metodología del número de curva.</b> .....	84

<b>6.3</b>	<b>Determinación de la oferta y demanda hídrica en la microcuenca Jurado. ....</b>	<b>91vii</b>
<b>6.4</b>	<b>Obtención de la relación precipitación-escorrentía en la microcuenca Jurado.....</b>	<b>97</b>
<b>6.5</b>	<b>Análisis de la amenaza a procesos de erosión hídrica en la microcuenca Jurado. .</b>	<b>97</b>
	<b>Conclusiones.....</b>	<b>112</b>
	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>114</b>
	<b>Referencias .....</b>	<b>115</b>

## Lista de tablas

viii

Tabla 1. Calificación de la calidad del agua según el ICA.....	41
Tabla 2. Morfometría microcuenca Jurado.....	78
Tabla 3. Red hídrica.....	81
Tabla 4. Orden de cauces.....	81
Tabla 5. Clasificación Tornthwaite.....	92
Tabla 6. Sismos registrados en Pamplona-Norte de Santander periodo 2019-1, 2019-2 y 2020-1.....	110

## Lista de Ecuaciones

Ecuación 1. Caudal máximo producido por una tormenta.....	33
Ecuación 2. Tiempo de concentración.....	33
Ecuación 3. Número de curva para antecedentes de humedad I.....	36
Ecuación 4. Número de curva para antecedentes de humedad II.....	36
Ecuación 5. Factor de retención máxima superficial.....	36
Ecuación 6. Precipitación producida por una tormenta.....	37
Ecuación 7. Número de curva teórico.....	37
Ecuación 8. Demanda de agua total.....	39
Ecuación 9. Demanda de agua para el sector agrícola.....	39
Ecuación 10. Demanda de agua para uso pecuario.....	40
Ecuación 11. Tasa de infiltración.....	40
Ecuación 12. Tasa de infiltración.....	40
Ecuación 13. Coeficiente de Gravelius.....	42
Ecuación 14. Altura del rectángulo en Km.....	42
Ecuación 15. Base del rectángulo en Km.....	43
Ecuación 16. Pendiente media del cauce.....	43
Ecuación 17. Pendiente media o promedio de la cuenca.....	43
Ecuación 18. Altura media de la cuenca.....	46
Ecuación 19. Densidad de drenaje.....	49
Ecuación 20. Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (USLE).....	53

## Lista de figuras

Figura 1. Ubicación microcuenca Jurado.....	31
Figura 2. Curva hipsométrica de la microcuenca Jurado.....	44
Figura 3. Cambio de forma de la curva hipsométrica con la edad del río.....	45
Figura 4. Ejemplo de histograma de frecuencias acumuladas.....	45
Figura 5. Flujo laminar y turbulento.....	47
Figura 6. Perfil longitudinal de la quebrada Jurado.....	47
Figura 7. Método de ordenación de los segmentos o cursos fluviales.....	48
Figura 8. Plancha 110 Pamplona.....	50
Figura 9. Evolución histórica de los sistemas de teledetección.....	54
Figura 10. Aplicaciones de la teledetección espacial.....	56
Figura 11. Cálculo de la precipitación efectiva para el año 2019 en la microcuenca Jurado.....	63
Figura 12. Apiques en la zona de estudio.....	64
Figura 13. Ensayo de granulometría.....	64
Figura 14. Localización de apiques en la microcuenca Jurado.....	65
Figura 15. Cálculo del número de curva en el software ArcGis.....	66
Figura 16. Aforo de caudales en la parte baja de la microcuenca Jurado.....	68
Figura 17. Censo de usuarios del recurso hídrico.....	69
Figura 18. Captación del recurso hídrico parte alta de la microcuenca.....	70
Figura 19. Captación del recurso hídrico para la cárcel de Pamplona.....	70
Figura 20. Cultivos de la zona de estudio.....	71
Figura 21. Medición de áreas de cultivos.....	71
Figura 22. Prueba de infiltración en campo.....	72
Figura 23. Animales presentes en la zona de estudio.....	73
Figura 24. Cobertura vegetal en la microcuenca Jurado.....	76
Figura 25. Obras civiles para minimizar la amenaza por erosión hídrica.....	76
Figura 26. Delimitación de la microcuenca Jurado.....	77
Figura 27. Modelo de Elevación Digital (DEM) microcuenca Jurado.....	79
Figura 28. Pendientes de la microcuenca Jurado.....	80
Figura 29. Orden de drenaje de la microcuenca Jurado.....	82
Figura 30. Perfil longitudinal del cauce principal de la quebrada Jurado.....	83
Figura 31. Curva hipsométrica microcuenca Jurado.....	84
Figura 32. Precipitación efectiva para el año 2019.....	84
Figura 33. Clasificación física del suelo proporcionada por el IGAC.....	85
Figura 34. Grupo hidrológico del suelo en la microcuenca Jurado.....	86
Figura 35. Curva granulométrica muestra de la parte baja de la microcuenca Jurado.....	87
Figura 36. Curva granulométrica muestra de la parte media de la microcuenca Jurado.....	88
Figura 37. Curva granulométrica muestra parte alta de la microcuenca Jurado.....	88
Figura 38. Cobertura vegetal de la microcuenca Jurado.....	89
Figura 39. Mapa de número de Curva para la microcuenca Jurado.....	90
Figura 40. Precipitación efectiva año 2020 de la microcuenca Jurado.....	92
Figura 41. Cultivos de Maíz en la microcuenca Jurado.....	93
Figura 42. Cultivo de tomate de árbol en la microcuenca Jurado.....	94
Figura 43. Evapotranspiración de referencia en la microcuenca Jurado.....	95

Figura 44. Balance hídrico en la microcuenca Jurado.....	96xi
Figura 45. Litología de la microcuenca Jurado.....	98
Figura 46. Geología de la microcuenca Jurado.....	99
Figura 47. Factor R de la microcuenca Jurado.....	100
Figura 48. Factor K de la microcuenca Jurado.....	101
Figura 49. Factor L de la microcuenca Jurado.....	103
Figura 50. Factor S de la microcuenca Jurado.....	104
Figura 51. Factor LS de la microcuenca Jurado.....	105
Figura 52. Factor C de la microcuenca Jurado.....	106
Figura 53. Erosión potencial de la microcuenca Jurado.....	107
Figura 54. Erosión total de la microcuenca Jurado.....	108
Figura 55. Amenaza por procesos de erosión hídrica.....	111

El hombre catalogado como principal responsable en la explotación de los recursos naturales a gran escala, le concierne la conservación y cuidado de los mismos para garantizar a generaciones futuras el bienestar y calidad de vida que les corresponde. Es por ello, que en la siguiente investigación se pretende estimar el impacto generado al medio ambiente por las acciones del ser humano.

Cómo recursos naturales es importante mencionar al suelo, catalogado como un elemento fundamental en el desarrollo de las actividades agrícolas y pecuarias. Por ende, surge la importancia de analizar su comportamiento ante variables climáticas, ecológicas y antrópicas para diagnosticar su estado y calidad a corto, mediano y largo plazo.

La presente investigación se desarrolló en la microcuenca quebrada Jurado, ubicada en la provincia de Pamplona, departamento de Norte de Santander, abordando temáticas de hidrología, geología y mecánica de suelos. El objetivo principal de la investigación fue establecer la relación entre el balance hídrico y la amenaza a procesos de erosión hídrica.

Dando continuidad al trabajo realizado en el año 2018 en la zona de estudio, donde se determinó el balance hídrico de acuerdo a los sectores que demandan agua en la quebrada. Así mismo, se estimaron los caudales oferta. Dentro de éste marco, para la siguiente investigación se realizó una actualización en los datos hidrometeorológicos como precipitación, radiación solar, temperatura, velocidad del viento, entre otros, los cuales a su vez fueron utilizados para la estimación de un balance hídrico actualizado. Aunado a esto, se relacionó la incidencia de las variables hidrometeorológicas, la cobertura de suelo y un factor de conservación del mismo, en los procesos erosivos que se presentaron en la microcuenca Jurado.

Atendiendo a éstas consideraciones, es importante mencionar que para la estimación xiii  
del balance hídrico se utilizaron las metodologías del número de curva (CN). Por otro lado, en la  
estimación de las tasas de erosión se implementó la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo  
(USLE). Para tal efecto, se parte del análisis de la información existente (mapas de cobertura,  
datos de variables hidrometeorológicas, imágenes satelitales y trabajos anteriores). Al mismo  
tiempo, se realizaron visitas de campo y toma de información de las personas, animales y  
cultivos presentes en el área de estudio.

Finalmente, como resultados de la investigación se tiene una oferta hídrica de 0,006  
 $\text{m}^3/\text{seg}$ , y una demanda hídrica de 0,0022  $\text{m}^3/\text{seg}$ . Además, la erosión total en la microcuenca  
Jurado presenta niveles leves a moderados debido a los bosques densos que aún se conservan en  
la zona de estudio.

**Palabras Claves:** Amenaza, balance hídrico, demanda hídrica, erosión, oferta hídrica.

The man catalogued like main person responsible for the exploitation of natural resources on a large scale, is concerned with the conservation and care of the same ones to guarantee to future generations the well-being and quality of life that corresponds to them. It is for this reason that the following research aims to estimate the impact generated on the environment by human actions.

As natural resources it is important to mention the soil, listed as a fundamental element in the development of agricultural and livestock activities. Therefore, the importance of analyzing their behavior in the face of climatic, ecological and anthropic variables arises to diagnose their status and quality in the short, medium and long term.

This research was carried out in the Jurado gully micro-basin, located in the province of Pamplona, department of Norte de Santander, addressing issues of hydrology, geology and soil mechanics. The main objective of the research was to establish the relationship between the water balance and the threat to water erosion processes.

Continuing the work carried out in 2018 in the study area, where the water balance was determined according to the sectors that demand water in the stream. Likewise, supply flows were estimated. Within this framework, for the following investigation an update was made in the hydrometeorological data such as precipitation, solar radiation, temperature, wind speed, among others, which in turn were used to estimate an updated water balance. In addition to this, the incidence of the hydrometeorological variables, the ground cover and a conservation factor thereof, were related to the erosive processes that occurred in the Jurado micro-watershed.

With these considerations in mind, it is important to mention that the curve number (NC) methodologies were used to estimate the water balance. On the other hand, in the estimation of erosion rates, the Universal Soil Loss Equation (USLE) was implemented. For this purpose, we start from the analysis of existing information (coverage maps, data on hydrometeorological variables, satellite images and previous works). At the same time, field visits were made and information was taken on the people, animals and crops present in the study area.

Finally, as results of the research, there is a water supply of  $0.006 \text{ m}^3 / \text{sec}$ , and a water demand of  $0.0022 \text{ m}^3 / \text{sec}$ . In addition, total erosion in the Jurado micro-basin shows mild to moderate levels due to the dense forests that are still conserved in the study area.

**Keywords:** Hazard, water balance, water demand, erosion, water supply.

## Introducción

Perdomo y otros (2018) afirman que “Las fuentes hídricas poseen un valor relevante en el desarrollo económico, social y cultural de la una población; es por ello la importancia que genera éste tema con el cuidado y conservación de los afloramientos de agua que en gran medida perduran en un lugar caracterizado por la abundancia de flora y fauna”. Así mismo, en el cuidado que concierne las fuentes hídricas que están dentro de un área de drenaje denominado cuenca hidrográfica, también es importante mencionar al suelo como recurso indispensable para el desarrollo de las actividades agrícolas y pecuarias. En ese sentido, Gaitán y otros (2017) consideran que “Uno de los desafíos más significativos que afronta la humanidad está representado por la degradación de los recursos naturales y principalmente la degradación de los suelos cultivados. Alrededor de 2000 millones de hectáreas están deterioradas en forma irreversible y de las 1500 millones en uso actualmente, una tercera parte poseen procesos erosivos de moderados a graves, que afectan anualmente entre 5 y 7 millones de hectáreas de tierra productiva”. Sumado a esto, en el artículo “Los Suelos Están en Peligro, Pero la Degradación Puede Revertirse” el director general de la FAO, José Graziano da Silva (2015) opina que las “Nuevas pérdidas de suelos productivos dañarían gravemente la producción de alimentos y la seguridad alimentaria, ampliando la volatilidad de precios alimentarios, y sumiendo potencialmente a millones de personas en el hambre y la pobreza. Así mismo, ofrece evidencias de que ésta pérdida de recursos y funciones del suelo se puede evitar”.

Analizando los datos obtenidos en estudios realizados en el mundo sobre agua y suelo, son alarmantes las cifras que indican la pérdida de éstos recursos por las actividades que

desarrolla el ser humano en su día a día. De las evidencias anteriores, surge la idea de abordar esta problemática trasladando los estudios pertinentes a nivel local en la microcuena Jurado de la provincia de Pamplona, estimando la oferta y demanda hídrica de la quebrada, como también, relacionando el balance hídrico con la amenaza a procesos de erosión hídrica en la microcuena Jurado, con base en los criterios propuestos por Wischmeier y Smith (1978) y Chevesich (2015).

Por otra parte, en la siguiente investigación se tiene en cuenta un precedente importante, el estudio realizado en el año 2018 titulado “Requerimiento Hídrico en la Microcuena Jurado, Pamplona-Colombia”, con el cual, se estimaron los caudales oferta de la quebrada Jurado, y los caudales que demandan cada uno de los sectores que allí hacen uso del recurso hídrico (Agrícola, pecuario, doméstico).

Aunado a la situación, la investigación actual pretende realizar una actualización en los datos hidrometeorológicos que se tuvieron en cuenta en la investigación del año 2018, para encontrar relación entre el balance hídrico y la amenaza a procesos de erosión hídrica en la microcuena Jurado.

Sí bien es cierto que la erosión hídrica es un proceso natural, que se ha visto alterado en su origen por las actividades del hombre, Santa Cruz de León (2011) citando a Bifani (1984) afirma que “La erosión hídrica es la más importante causa de erosión de tierras, es responsable de la erosión de 440 millones de hectáreas de tierra de las 747 millones que sufren erosión en Asia; de 227 millones de hectáreas de las 497 millones afectadas por éste fenómeno en África; de 123 millones de hectáreas de 243 millones en América del Sur; de 115 millones de 219 millones en Europa; 106 en América del Norte y América Central”.

En virtud de los resultados para el siguiente trabajo investigativo, es importante mencionar el uso primordial de los Sistemas de Información Geográfico (SIG). Por otro parte,

insumos como mapas de cobertura obtenidos en el IGAC, planchas geológicas obtenidas en SGC, información hidrometeorológica obtenida del IDEAM contribuyen en la obtención de los mismos. Así mismo, es importante detallar la resolución 865 de 2004, por la cual se estableció el índice de escasez en función del cálculo de la oferta y demanda hídrica. Por último, se aplicó la metodología USLE adoptada en la FAO y el autor chileno Pablo Chevesich (2015) en su libro “Control de la Erosión y Recuperación de Suelos Degradados”.

## 1. Planteamiento del Problema

En el año 2010-2011 se presentó desbordamiento en la quebrada Jurado producto del comportamiento de los eventos extremos como precipitaciones máximas, tanto así que habitantes de la zona intervinieron el cauce como una de las posibles soluciones. En la parte baja de la quebrada en cercanía con el punto de desembocadura se presentó acumulación de sedimentos ocasionando pérdida de la capacidad de flujo en la alcantarilla, obturándola y generando desbordamiento.

La microcuenca Jurado en los últimos tiempos, ha sido intervenida por actividades agrícolas, pecuarias y el uso residencial, las cuales contribuyen en la generación de procesos de erosión, y la reducción en el caudal de la microcuenca. Se parte de la hipótesis de que hay la probabilidad de un uso abusivo del recurso hídrico en dichas actividades, las cuales están generando un excedente que puede contribuir en los procesos de erosión, tanto de laderas como en el cauce.

Los procesos de erosión y degradación del suelo pueden condicionar la inestabilidad de las laderas y vertientes de la quebrada Jurado, esto puede ser agravado por la intervención que se realiza al ejecutar obras de infraestructura. En la microcuenca, por la construcción de la vía terciaria, que conduce a la zona rural de la microcuenca Jurado, como también hacia el barrio Jurado, se afectó el flujo del caudal de la microcuenca, al implementar obras de arte como alcantarillas y muros de contención en gaviones. Por otra parte, los taludes construidos para la vía han facilitado la ocurrencia de eventos de remoción en masa que aportan sedimentos al cauce, especialmente en temporada de lluvias.

De esta manera, asociado a la erosión, surgen problemas de estabilidad de los suelos, el transporte de sedimentos y la pérdida de fertilidad del suelo, que son indicativos de niveles de amenaza por erosión para el sector.

Con base en lo anterior, se plantean las siguientes preguntas de investigación: ¿Se puede determinar la amenaza a procesos de erosión hídrica en la microcuenca de la quebrada Jurado?, ¿Existe alguna relación entre el balance hídrico y los procesos de erosión presentes en la microcuenca de la quebrada Jurado?

## 2. Justificación

El uso inadecuado del recurso hídrico en algunos lugares es consecuencia de la posible captación excesiva del mismo para actividades agrícolas y domésticas, lo cual es un tema importante a evaluar en éste proyecto. Así mismo, se podrían establecer criterios para mejorar el uso del agua en dichas actividades y obtener un balance adecuado en cuanto a oferta y demanda hídrica.

La expansión de áreas para uso en el sector agrícola conlleva la deforestación y quema de bosques, es una actividad visible en la zona de la microcuenca, facilitando y aumentando los procesos de erosión. Por otro lado, los excedentes de agua en las laderas, el uso inadecuado del recurso hídrico, y construcción de obras de infraestructura también contribuyen a aumentar los procesos de erosión hídrica y aportes de sedimentos al cauce.

La importancia del balance hídrico radica en la determinación de los caudales que circulan en la quebrada, los cuales son mecanismos generadores de amenaza a procesos de erosión hídrica. Así mismo, el análisis de la relación precipitación-escorrentía es importante porque permite conocer la incidencia de la escorrentía en el arrastre y transporte de sedimentos.

Por lo tanto, es importante realizar el análisis de las características físicas del suelo, la litología, las precipitaciones, cobertura y usos del suelo, estableciendo de este modo su relación con los procesos de erosión.

### **3. Objetivos**

#### **Objetivo General**

- Determinar el balance hídrico y su relación con la amenaza a procesos de erosión hídrica en la microcuenca Jurado.

#### **3.1 Objetivos Específicos**

- Caracterizar física y morfométricamente la microcuenca Jurado.
- Analizar la escorrentía superficial en la microcuenca Jurado estimando la precipitación efectiva, bajo la metodología del número de curva.
- Determinar la oferta y demanda hídrica en la microcuenca Jurado.
- Obtener la relación precipitación-escorrentía en la microcuenca Jurado.
- Analizar la amenaza a procesos de erosión hídrica en la microcuenca Jurado.

## 4. Marco Referencial

### 4.1 Antecedentes

#### ➤ Antecedentes Internacionales

Las actividades del ser humano son un importante mecanismo de transformación en los ecosistemas. Por lo tanto, actividades como la agrícola, alteran las condiciones iniciales del terreno. Tuñón (2000) determinó la influencia de las actividades agrícolas sobre la calidad de agua del acuífero de La Plana de Castellón en España, e indirectamente sobre los mecanismos que controlan el almacenamiento de agua del mismo. Además, evaluó los efectos derivados de la explotación del acuífero, tales como el avance de la salinización por intrusión marina. Así mismo, realizó una importante comparación de los métodos empíricos de cálculo de la evapotranspiración con la determinación en una parcela experimental.

En la conservación y disposición de los recursos naturales, el agua, como fuente principal de vida es un recurso limitado en algunas partes del planeta. Llama la atención una metodología de análisis dinámico en el tiempo implementada por Escribano (2010) en su tesis doctoral, que permitió revalorar permanentemente la problemática de la escasez de agua dulce en función de la oferta hídrica y la demanda hídrica. En tal sentido, ésta se desarrolló implementándola como caso de estudio en los países que forman la región africana del golfo de Guinea, y teniendo en cuenta las variaciones de sus factores conductores y sobre todo el del bienestar humano.

Vinculado al concepto de erosión, Santa Cruz de León (2011) estimó la erosión hídrica, además de analizar los efectos de las modificaciones en el uso del suelo en la cuenca del río Cohacán localizada en la costa Chiapaneca. Para ello, empleó la Ecuación Universal de Pérdida

de Suelo (EUPS); para estimar el factor de erosividad (R) empleó la metodología propuesta por Cortés (1991). También, usó datos de precipitación media mensual y media anual de 5 estaciones que se encuentran dentro de los límites de la cuenca y de 10 estaciones que se encuentran fuera de ella pero próximas a sus límites. En las condiciones actuales de uso de suelo, las pérdidas van desde 16,270 ton/ha/año hasta valores de 20,000 ton/ha/año, presentándose valores mínimos de 13.317 ton/ha/año.

Recapitulando la importancia del recurso hídrico, Gómez (2013) examinó el modelo chileno de gestión de agua desde la perspectiva del modelo de Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH), considerando tres aspectos de este modelo que se relacionan con las dimensiones sociales y ambientales de la gestión del agua y que fueron evaluados empíricamente en un estudio piloto en la cuenca del Río Limarí. En el primer aspecto, denominado **“La equidad en el acceso al agua para riego”**, se identificó que la participación de los agricultores en el mercado de aguas es menos de lo que se esperaba. En el segundo aspecto, **“La participación en la gestión de los recursos hídricos en el modelo de mercados de agua”**, utilizó metodologías cualitativas y cuantitativas para recoger las percepciones de los actores locales involucrados en la gestión del agua para evaluar el nivel de integración de la sociedad en la toma de decisiones y reconocer los objetivos y el nivel de la participación en este proceso. Por último, el tercer aspecto **“La dimensión ambiental en la gestión del agua”**, a través de la aplicación de entrevistas entre actores de la cuenca, durante los años de 2006 y 2008.

Por otra parte, Ruíz (2015) estimó la erosión hídrica mediante un sistema de información geográfico utilizando la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelos (EUPS) en la zona cañera de la vertiente del Pacífico de Guatemala identificando las zonas vulnerables a erosión. En tal sentido, según la clasificación de FAO (1979); 41,996 hectáreas son vulnerables a sufrir erosión

muy fuerte, encontrándose la mayor superficie en la parte alta de la zona cañera (>300 msnm). Además, generó cartografía específica de la erosión hídrica a nivel de vertiente del Pacífico y mapas específicos para cuencas y municipios que cuentan con cobertura de caña de azúcar. Por otra parte, Zambrano (2015) desarrolló un modelo para estimar la producción y el transporte de sedimentos, el cual sirvió para predecir el comportamiento de éste en cuencas urbanas de cabecera. Por tal motivo propuso un nuevo modelo en base física distribuido aplicable a cuencas con condiciones pluviométricas similares a las de Litoral Mediterráneo (alta intensidad y corta duración). El modelo fue aplicado exitosamente en dos cuencas de validación totalmente diferentes.

En relación con las implicaciones a la calidad del agua, Bocel (2016) realizó un estudio en la subcuenca del río San Francisco en la cuenca del lago de Atitlán en el altiplano occidental de Guatemala utilizando el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Para la determinación de la calidad del agua, utilizó el Índice de Calidad de Agua “The National Sanitation Foundation” ICA-NSF que integró los parámetros siguientes: Oxígeno disuelto, pH, temperatura, sólidos disueltos totales, turbidez, DBO5, nitratos, fosfatos y coliformes fecales.

Dentro del marco del análisis de los coeficientes que plantea la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (EUPS), Zúñiga (2017) en el mapa del modelo retrospectivo, con la erosión de la cuenca aportante del embalse Aguada Blanca y su relación con la sedimentación del mismo bajo tres fases, determinó que los coeficientes: lluvia R, erodabilidad K y cobertura vegetal incidieron en las tasas promedias de erosión de la cuenca. Igualmente Gaitán y otros (2017), estimaron el riesgo de erosión hídrica a escala nacional en la República de Argentina, con la finalidad de contribuir al ordenamiento y manejo sustentable de los suelos. Así mismo, estimaron los factores intervinientes en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) para la erosión

hídrica. Por otro lado, integraron todos los factores que intervienen en la ecuación, mediante Sistemas de Información Geográfico (SIG).

Por último, Yue, Juying y otros (2020) monitorearon la vegetación, la lluvia, la escorrentía y la erosión del suelo en diez parcelas de escorrentía en condiciones de campo desde 2015 hasta el 2019 y examinaron el impacto de los eventos de tormentas erosivas en la escorrentía y la erosión del suelo entre diferentes tipos de vegetación y tierra desnuda en laderas abandonadas. Los resultados mostraron que la restauración de la vegetación podría disminuir 68% a 97,4% la escorrentía y 98% a 99,9% la erosión del suelo en comparación con la tierra descubierta. La pérdida promedio de suelo por tormentas erosivas entre los tipos de vegetación podría ser de 2,1 a 15,6 veces mayor que la de eventos ordinarios de lluvia erosiva. Los eventos de tormenta erosiva causaron una variación significativa de la escorrentía superficial y erosión del suelo debido a la variante antecedente de humedad del suelo y la intensidad de la lluvia.

#### ➤ **Antecedentes Nacionales**

Se hace necesario resaltar la degradación de suelo, como producto originado en el proceso de erosión, es por ello, que Velásquez, Menjivar y Escobar (2007) desarrollaron siete etapas metodológicas con criterios de integralidad, análisis holístico, secuencia lógica, participación y sencillez, destacando aspectos como la conceptualización y contextualización, muestreo de suelo, procesamiento de la información, especialización de la información, identificación de zonas susceptibles a riesgos de erosión y con mayor capacidad de almacenamiento de agua, recomendaciones de manejo y socialización de la investigación. La propuesta metodológica se validó y ajustó mediante un caso de estudio en la vereda Chicoral, municipio de la Cumbre (Valle del Cauca, Colombia). De este modo, lograron diagnosticar las

causas y consecuencias que intervienen en procesos de degradación de suelos; así mismo, localizaron los sitios con mayor potencialidad de almacenamiento de agua, factores importantes para la planificación y uso racional de los recursos naturales de una cuenca hidrográfica.

En ese mismo contexto, Posada y otros (2010) para predecir la erodabilidad de cinco suelos de la zona cafetera Colombiana, tres derivados de cenizas volcánicas Chinchiná, Montenegro y Fresno, y dos derivados de basaltos y areniscas olivínicas, Parmaso y Guamal, respectivamente realizaron correlaciones lineales simples y multivariadas, entre índices de erodabilidad de los suelos y 71 variables físicas y químicas, obtenidas en el campo. Por otra parte, determinaron diez ecuaciones para la predicción de la erodabilidad  $K_i$ , del Proyecto de Predicción de Erosión hídrica (WEPP) y  $K$  de la USLE. De igual manera, Mena, Benavides y Castillo (2010), desarrollaron una investigación en la granja experimental FEDEPAPA, Municipio de Pasto, departamento de Nariño, donde evaluaron la susceptibilidad a la erosión hídrica en un Vitric haplustands en terrenos entre 35% - 40% de pendiente, mediante el uso de un mini simulador de lluvia portátil en cuatro historiales de uso de suelo, donde se ubicaron en total 12 parcelas. De acuerdo a los resultados, para la variable de suelo erodado ( $t \cdot ha^{-1}$ ) el tratamiento que reportó las menores pérdidas fue bosque, el cual presentó los valores promedio más bajos desde 5 hasta 30 minutos con 0,019 mm y 0,063 mm respectivamente. Así mismo, los valores promedio más altos de esta variable lo presenta el historial cultivo de papa, con 0,39 ( $t \cdot ha^{-1}$ ) a los 30 minutos de simulación de lluvia.

En el estudio llevado a cabo por Cocuyame y Salazar (2015) sobre la erosión hídrica por medio de la implementación de un modelo matemático empírico para el cálculo de la pérdida de suelo USLE, utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG), determinaron que el análisis de susceptibilidad en la zona de estudio (Cuenca del río Cuabas), el mayor valor de erosión es

82,72% asociado a erosión ligera, debido a los suelos, las precipitaciones y el relieve. Además, Martínez, Reyes y Moreno (2015), en la cuenca del embalse La Copa en el departamento de Boyacá, determinaron el grado de erosividad evaluando y mapificando la agresividad climática mediante el índice IFM, la erosividad de la lluvia mediante el factor R y la concentración de las precipitaciones mediante el índice ICP. En los municipios de Toca, Siachoque, Tuta y Soracá la agresividad de la lluvia es moderada, mientras que en el resto de la cuenca la agresividad es baja.

Dentro de la temática de erosión hídrica, Castillo y Estrada (2016) determinaron y zonificaron a partir de la ecuación universal de la pérdida del suelo (R.U.S.L.E) la erosión hídrica presente en la ciudad de Bogotá D.C. Así mismo, elaboraron una base de datos geográficos para la organización de los diferentes soportes cartográficos. Por otro lado, elaboraron dos productos cartográficos (mapa de erosión hídrica y erosión hídrica potencial) a escala 1:150.000 de las zonas que presentan erosión hídrica para la ciudad de Bogotá D.C.

Por otra parte, en el departamento de Nariño Sarasty (2017) determinó el grado de amenaza de los fenómenos de erosión y movimiento en masa, utilizando las metodologías de la ecuación Universal de pérdida de suelos (USLE) y talud infinito respectivamente; obtuvo que cerca del 20% del área de estudio (Predios de Kinde y Kuskungo) es susceptible de pérdidas potenciales de suelo superiores a 15 Ton/(ha año), por erosión hídrica y el 55% de la zona de estudio se encuentra en categoría de amenaza media a alta por fenómenos de remoción en masa. Además, Quintero, Salazar y Melo (2017), estimaron la erosión hídrica potencial en zonas cafeteras del Quindío, utilizando la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (USLE/RUSLE), donde realizaron muestreo aleatorio simple, en once unidades de suelo con repeticiones. Para ello, trabajaron con el factor de erosividad R reportados por Lince (2015), con precipitación mensual de 19 estaciones meteorológicas para el periodo 1999-2011, encontrando que la erosión

potencial en los municipios de Buenavista, Calarcá, Córdoba, Pijao y Génova (Quindío, Colombia) presentaron más del 27% de pérdida de suelo Moderada, Alta y muy Alta que van desde las 26 a más de 100 t/ha<sup>-1</sup>/año<sup>-1</sup>, y los municipios de Armenia, Circasia, Filandia, Montenegro, Quimbaya y la Tebaida, presentaron erosión potencial con calificaciones consideradas como ligera a baja. Por otra parte, Orozco y Hernández (2017) utilizaron los métodos indirectos de Paulet (1973) y Wischmeier y Smith (1978) para determinar la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica en zona rural del municipio de San Carlos-Córdoba. Se consideraron 5 zonas con diferentes usos del suelo (pastoreo de ganado, con vegetación nativa, agrícola recién arada, agrícola sólo pasto, sistema silvopastoril), en los cuales los factores de erodabilidad estuvieron en los rangos de débilmente (0,1572 t ha h tm<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>) a fuertemente (0,3843 t ha h tm<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>) erodables según la clasificación de USDA (1962).

De acuerdo con Ríos (2018), en la evaluación de la relación entre las tasas de erosión hídrica potencial y las curvaturas del terreno en dos grandes cuencas que drenan el Altiplano de Santa Rosa de Osos (ASRO) y dos de sus importantes frentes erosivos (al oriente el río Grande y al occidental el río San Andrés), encontró una importante dependencia del factor de erosividad de la lluvia R a la resolución temporal del registro de precipitación usado para su estimación y una marcada dependencia y efectos de escala en el factor topográfico LS (longitud e inclinación de la ladera) del modelo empírico RUSLE y sus posteriores estimaciones medias de pérdida de suelo anual. Además, identificó cambios en varios órdenes de magnitud al estimar la erosión potencial en zonas de cultivos en la cuenca del río Grande, sugiriendo esto que se deberá dar especial atención las prácticas de manejo y gestión de actividades agrícolas en dicha cuenca.

### ➤ **Antecedentes Regionales y locales**

Aunado a la situación de la degradación del suelo por erosión, Solano (2017) evaluó el tratamiento de la dinámica espacial de los cambios del uso del suelo y los procesos erosivos en la microcuenca Hato Viejo, Municipio de Chitagá. Además, estimó la susceptibilidad y amenaza por erosión en las vertientes de la quebrada, demostrando a nivel general que la pérdida de suelo neta de mayor magnitud predomina en pendientes escarpadas y abruptas, que influenciados por una amplia variabilidad de las precipitaciones aceleran la dinámica de los mismos.

Villamizar L (2012) obtuvo las curvas IDF para la microcuenca quebrada Jurado determinando que para menor duración mayor intensidad en los diferentes periodo de retorno, aplicando la fórmula de Bernard y la información precipitación máxima en 24 horas de la estación Iser Pamplona.

Perdomo y otros (2018), realizaron un estudio en la Quebrada Jurado de la provincia de Pamplona – Colombia, donde determinaron la oferta y demanda hídrica, obteniendo que los suelos son de tipo arcilloso y areno-arcilloso; la cantidad de habitantes son 32, los cultivos de la zona son higos, maíz, arveja, tomate de árbol, uchuva y calabaza; la ETP es 59.53 mm/mes, la oferta hídrica es de 68739,84 L/día y la demanda hídrica total de la zona es de 19095,30 L/día.

## **4.2 Marco Contextual**

Según Perdomo y otros (2018), el área de estudio se encuentra ubicada en el municipio de Pamplona-Norte de Santander. La microcuenca Jurado cuenta con un área aproximada de 1.78 Km<sup>2</sup> y se encuentra en la latitud 7°22'20.4" N y longitud 72°39'44.48" O, a una altura de 2537 msnm, las vías de acceso son por el barrio Jurado y vía al Batallón García Rovira, ver figura 1.



*Figura 1. Ubicación microcuenca Jurado*

Fuente: Modificado de Google Earth pro, 2019.

La zona de la microcuenca Jurado se caracteriza por tener una altitud entre los 2300 a 3000 msnm. En la parte media y baja se tiene acceso a la zona, mediante una vía terciaria en placa huella.

Los niveles de precipitación en la zona de estudio varían anualmente, para el año 2018 se presentó una precipitación anual de 209,48 mm. Así mismo, para el año 2019 presentó niveles de precipitación anual de 225,1 mm, según datos suministrados por el IDEAM. Por otra parte, para el año 2020 hasta el mes de octubre, se tienen registros de precipitaciones de 149,4 mm.

### **4.3 Marco teórico**

#### **4.3.1 Hidrometeorología**

El análisis de datos hidrometeorológicos de series de tiempo es una herramienta apta para analizar la evolución del clima pasado y presente Allende & Mendoza (2007), como también la variación de caudales en la microcuenca en un determinado tiempo.

Según García (2001), la Meteorología estudia los fenómenos que se producen en la atmósfera; y Allende & Mendoza, (2007) consideran que es la ciencia, que se fundamenta en entender cómo se producen esos fenómenos.

Para Penagos-Cruz (2014), las variables meteorológicas a analizar son: a) Humedad relativa, la cual es el porcentaje de la humedad de saturación, calculada mediante la relación entre la densidad de vapor actual ( $\text{g/m}^3$ ) y la densidad de vapor de saturación a la temperatura actual ( $\text{g/m}^3$ ), expresada en porcentaje; b) Brillo solar, también conocido como heliofania, representa el tiempo total durante el cual incide la luz solar directa sobre una superficie durante todo el día. La unidad de medida mensual es el resultado de la suma de todos los días del mes; c) Evaporación, es la separación de componentes por efecto térmico, cambiando de un estado líquido a un estado gaseoso; y d) Precipitación, es la caída de partículas sólidas o líquidas de agua sobre una superficie. La cantidad de precipitación, llamada pluviosidad o monto pluviométrico, tiene como unidad milímetros de agua o litros por metro cuadrado. Los instrumentos más empleados para la medición de la lluvia son los pluviómetros y los fluviógrafos.

Chevesich (2015) y en la Resolución 0330 (2017) plantean el método racional como uno de los más utilizados en el diseño de estructuras hidráulicas, con el cual es posible estimar el caudal máximo producido por una tormenta en una cuenca de área específica predeterminada (ecuación

1).

$$Q_p=0,0028CiA \quad \text{Ec.1}$$

Donde,  $Q_p$  - caudal máximo producido por una tormenta (m<sup>3</sup>/seg),  $C$  - coeficiente de escorrentía,  $i$  - intensidad de la tormenta (mm/hr) (para una duración igual o mayor al tiempo de concentración de la cuenca) y  $A$  - área de la cuenca (ha).

Los coeficientes de escorrentía representan el cociente entre el caudal producido y el agua caída en una tormenta dada. Éstos se determinan de acuerdo al uso de la tierra, tipo de suelo, topografía y periodo de retorno de la tormenta en cuestión. Sin embargo, Chevesich (2015) en su libro “Control de la Erosión y Recuperación de Suelos Degradados”, facilita unos coeficientes de escorrentía, según uso de la tierra, grupo de suelo y pendiente, para tormentas con un periodo de retorno hasta de 25 años en áreas rurales. Así mismo, facilita también coeficientes de escorrentía para áreas urbanas.

Así mismo, Chevesich (2015), hace referencia a que en el método racional se considera la precipitación efectiva, es decir la porción de la precipitación que se transforma en escorrentía, o la precipitación que cae desde que comienza la escorrentía. También, el autor precisa el tiempo de concentración ( $T_c$ ) como el tiempo requerido por una gota de agua para viajar desde el punto más remoto de una cuenca hasta su salida o boca, una vez que el suelo se satura (escorrentía), ver ecuación 2:

$$T_c=0,0195L^{0,77}S_g^{-0,385} \quad \text{Ec.2}$$

Donde  $L$  - distancia máxima de drenaje de la cuenca (m) y  $S_g$  - gradiente de elevación (m/m).

Cuando la duración de una tormenta supera el tiempo de concentración de una cuenca, toda el área de drenaje está contribuyendo simultáneamente a la escorrentía y el caudal máximo toma

un valor constante. Además, el método racional asume que la lluvia ocurre a una intensidad uniforme y con una duración mayor o igual a  $T_c$ .

### ➤ **Oferta Hídrica**

Para el Sistema de Información Ambiental Colombiano SIAC (2015), la oferta del agua está asociada al régimen hidrológico, el cual, de acuerdo al Glosario Hidrológico Internacional (OMM, 1992) se define como “Variaciones del estado y de las características de una masa de agua que se repiten de forma regular en el tiempo y en el espacio y que muestran patrones estacionales o de otros tipos”.

Según IDEAM (2014), la oferta hídrica superficial se refiere al volumen de agua continental, almacenada en los cuerpos de agua superficiales en un periodo determinado de tiempo, se cuantifica a través de la esorrentía y rendimientos hídricos ( $l/s - Km^2$ ) en las unidades espaciales de análisis definidas en la zonificación hidrográfica de Colombia, clasificada en tres niveles; áreas, zonas y subzonas hidrográficas. Las áreas hidrográficas son el Caribe, Pacífico, Magdalena-Cauca, Orinoco y Amazonas, 41 zonas hidrográficas y 316 subzonas hidrográficas.

De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua (ENA, 2014), del volumen total anual de precipitación en Colombia, el 62% se convierte en esorrentía superficial, equivalente a un caudal medio de  $63.789 m^3/s$ , correspondiente a un volumen de  $2.025 Km^3$  al año. Se asume a la esorrentía superficial como la lámina de agua que circula sobre la superficie en una cuenca de drenaje para un intervalo de tiempo dado. Según (IDEAM, 2015), citado en (ENA, 2018), el promedio de precipitación en Colombia es de  $2918 mm/año$ , mientras que la evapotranspiración real es de aproximadamente  $1143 mm/año$ , y el de esorrentía es de  $1,75 mm/año$ . El valor de esorrentía equivale a un volumen de  $2025 Km^3/año$ , valor que en términos de rendimiento

promedio, es de 56,2 l/s/km<sup>2</sup>, mientras que el promedio mundial es de apenas 10l/s/km<sup>2</sup>, y el promedio latinoamericano es de 21 l/s/km<sup>2</sup>.

Adicional a lo anterior, de acuerdo con (ENA, 2018), las áreas con mayor escorrentía se encuentran en el pacífico y caribe. Algunas de las subzonas dentro del caribe presentan los valores de escorrentía más bajos del país; sin embargo, la inclusión de la zona del río Atrato aumenta en gran medida los valores de escorrentía del área hidrográfica. La subzona con mayor escorrentía corresponde al río Andaguada, justamente de la zona hidrográfica Atrato (área Caribe), con 8307 mm/año. Le sigue la subzona del río San Juan Medio, del área pacífico, con alrededor de 8244 mm/año. Además, en el área del Amazonas, en su piedemonte, también se presentan grandes valores de escorrentía, destacando la subzona hidrográfica Alto río Putumayo, con valores de 3975 mm/año. En el piedemonte del área Orinoco también existen zonas de grandes valores de escorrentía, destacando la subzona del río Cobugón- río Cobaría, con 3157 mm/año.

Por otra parte, en la resolución 865 (2014), se establece el índice de escasez en función de la oferta y demanda hídrica. Además, se presentan los métodos para calcular la oferta hídrica en una cuenca hidrográfica, según la información disponible y características físicas de la cuenca: a) Balance hídrico: Para cuencas hidrográficas con un registro de las variables climatológicas e hidrológicas mayor de 10 años, situación que permite estimar la oferta hídrica media anual; b) Caudal medio puntual en las corrientes de interés: Cuando los registros de caudal generan series cortas y no confiables (series anuales menores de dos años); c) Relación lluvia – escorrentía: Aplicable en cuencas menores, es decir, cuyas áreas de drenaje sean inferiores a 250 km<sup>2</sup>, cuencas no instrumentadas y en consecuencia no cuentan con registros de caudal para la estimación de la oferta superficial mensual, utilizando el número de curva (CN), creado por el servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (Soil Conservation Service - SCS), el cual considera

tres factores: Clase de suelo, la cobertura y las condiciones de humedad antecedente.

En la presente investigación se determinó la oferta hídrica con el método del número de curva adaptado en Colombia y citado en la resolución 0865 de 2004, como la relación lluvia-escorrentía. Así mismo, considera tener en cuenta la cobertura vegetal, uso del uso, condición hidrológica del suelo y antecedentes de humedad. Sin embargo, Chevesich (2015), considera que cada cuenca cuenta con características únicas, desde el punto de vista geológico, edáfico, vegetacional, topográfico, etc., por lo que es razonable suponer que toda área de drenaje cuenta con un determinado CN. Por otra parte, es posible determinar en forma exacta el CN de una cuenca, siempre y cuando se cuente con datos de precipitación y caudal de, al menos, 30 tormentas que hayan producido escorrentía (Mishra y Singh 2003).

Chevesich (2015), estima unos valores de CN (II), de acuerdo al tipo de suelo en el área de estudio. Teniendo éste valor, se procede a la estimación teórica del valor de CN para un período d seco (sequia) o húmedo (lluvia) ver ecuación 3 y 4.

$$CN(I) = \frac{4,2CN(II)}{10-0,058CN(II)} \quad \text{Ec.3}$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10+0,13CN(II)} \quad \text{Ec.4}$$

Donde, CN (II) – número de curva para antecedentes de humedad II, CN (I) – número de curva para periodo seco y CN (III) – número de curva para periodo húmedo o lluvia.

Teniendo éste primer valor teórico, se procede al cálculo de retención máxima superficial (S), ver ecuación 5.

$$s = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Ec.5}$$

Donde, S - es la capacidad de retención máxima superficial y CN - es el número de curva.

Teniendo calculado el valor de S, se obtiene seguidamente el valor de Q, el cual es la

relación de precipitación con escurrimiento, en otras palabras, Q es la precipitación producida por una tormenta (mm); ver ecuación 6.

$$Q = \frac{(P-0,2S)^2}{(P+0,8S)} \quad \text{Ec.6}$$

Donde, Q - caudal de escurrimiento producida por la tormenta (mm), P - precipitación (mm) y S - capacidad de retención máxima superficial.

Para finalizar, se calcula el valor de CN teórico aplicando la variable Q y P, ver ecuación 7.

$$CN = \frac{25400}{(5(P+2Q-\sqrt{4Q^2+5PQ})+254)} \quad \text{Ec.7}$$

Donde CN – número de curva estimado por fórmula, P – precipitación (mm), Q – caudal de escurrimiento (mm).

Para la cuantificación de la oferta hídrica neta disponible en la resolución 865 de 2004 establece los factores de reducción: a) por calidad del agua de las fuentes de abastecimiento como de los cuerpos de agua; la oferta hídrica de estos sistemas se debe afectar hasta un 25%, correspondiendo a la condición de calidad del agua y b) por caudal mínimo ecológico. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) ha adoptado hasta un 25% del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente en estudio.

### ➤ **Demanda Hídrica**

Para el Sistema de Información Ambiental Colombiano SIAC (2015), la demanda de agua estimada corresponde a la cantidad o volumen de agua usado por los sectores económicos y la población. Así mismo, se considera el volumen de agua extraído o que se almacena de los sistemas hídricos y que limita otros usos; también, contempla el volumen utilizado como materia prima, como insumo y el retornado a los sistemas hídricos.

Información suministrada por el SIAC (2015), indica que en el año 2012 la demanda hídrica nacional alcanzó 35.987,1 millones de m<sup>3</sup>. El sector que más demanda agua es el agrícola con 16.760,3 millones de m<sup>3</sup> (46.6% del total), seguido por el sector energía con 7.738,6 millones de m<sup>3</sup> (21,5% del total), el sector pecuario con 3.049,4 millones de m<sup>3</sup> (8,5%) y el sector doméstico con 2.963,4 millones de m<sup>3</sup> (8,2%). También, el mayor uso de agua se concentra en el área hidrográfica de los ríos Magdalena y Cauca con 20.247,2 millones de m<sup>3</sup> (67% del total) seguida de Caribe (16%), Orinoco (12%), Pacífico (4%) y Amazonas (1%).

Según la resolución 865 de 2004, para el cálculo de la demanda hídrica se presentan 3 escenarios: 1) cuando existe información medida. En éste, la demanda de agua en general, representa el volumen de agua, expresado en millones de metros cúbicos, utilizado por las actividades socioeconómicas en un espacio y tiempo determinado y corresponde a la sumatoria de las demandas sectoriales; 2) cuando existe información medida, pero esta es insuficiente. Frente a esta situación se debe aprovechar la información medida, que debe ser agrupada y catalogada en unidades expresadas en millones de metros cúbicos (Mm<sup>3</sup>) en una base de datos; 3) cuando no existe información. En este escenario se debe estimar potencialmente el volumen de agua demandada en millones de metros cúbicos a nivel sectorial. Estas estimaciones se basan principalmente en la asociación de dos variables: el volumen de producción sectorial y un factor de consumo de agua por tipo de bien, con el limitante de que estas estimaciones no contemplan las pérdidas de los sistemas de conducción, almacenamiento, tratamiento y distribución del agua en el suministro de agua potable y a nivel de la industria, tampoco tienen en consideración el nivel tecnológico, los métodos de producción limpia y el uso que del agua que hace la industria extractiva.

En el caso de la microcuenca quebrada Jurado, se determinará la oferta hídrica con la

metodología del escenario 2, anteriormente mencionado.

Partiendo del escenario donde existe información medida, pero ésta es insuficiente, la resolución 865 de 2004 plantea: “Frente a esta situación se debe aprovechar la información medida, que debe ser agrupada y catalogada en unidades expresadas en millones de metros cúbicos (Mm<sup>3</sup>) en una base de datos. Por otra parte la información inexistente debe complementarse utilizando la metodología expuesta cuando no existe información. Además, se plantea una ecuación para la estimación de demanda de agua total, ver ecuación 8.

$$DT = DUD + DUI + DUS + DUA + DUP \quad \text{Ec.8}$$

Donde, DT - Demanda Total de agua, DUD - Demanda de Agua para Uso Doméstico, DUI - Demanda de Agua para uso Industrial, DUS - Demanda de Agua para el Sector Servicios, DUA- Demanda de uso Agrícola y DUP- Demanda de uso Pecuario.

En la microcuenca Jurado no se tiene demanda para uso Industrial ni el sector de servicios, de modo que dichas variables no serán consideradas para el cálculo de la demanda hídrica.

Para la estimación de DUA, la resolución 865 de 2004 afirma: “Con el uso de sistema de información SIG, se asocian los datos fisiográficos del área de estudio sobre cultivos, precipitación y evapotranspiración. A estos valores se adiciona el coeficiente de uso de agua por tipo de cultivo obtenido teóricamente del informe de la FAO 33. Una vez construida una tabla de valores de variables asociadas, se estima la demanda de agua a partir de la ecuación”.

$$DUA = [P - (ETP * kc)] * ha \quad \text{Ec.9}$$

Donde, DUA - Demanda de agua para el sector agrícola, P – Precipitación, ETP - Evapotranspiración potencial, Kc - Coeficiente de uso de agua del cultivo (FAO 33), Ha - Número de hectáreas cultivadas.

Para la estimación de DUP, la resolución 865 de 2004 plantea “Como tipo de animales de

importancia comercial se clasifican: bovinos carne, leche y doble propósito, aves de corral y porcinos”, ver ecuación 10.

$$DUP = \sum_{i=1}^n V_{pai} \cdot ixFca \quad \text{Ec.10}$$

Donde, DUP - Demanda de agua para uso pecuario,  $V_{pai}$  - Volumen de producción por tipo de animal industrial,  $Fca$  - Factor de consumo según tipo de producción animal.

De acuerdo a Weber y Apestegui (2016), Kostiakov (1932), Ravi & Williams (1998), presentaron las ecuaciones de carácter empírico para estimar la tasa de infiltración y la infiltración acumulada (Ecuaciones 11 y 12).

$$F(t) = Kt^a \quad \text{Ec.11}$$

$$F(t) = Kat^{a-1} \quad \text{Ec.12}$$

Donde,  $F(t)$  - tasa de infiltración,  $K$  y  $a$  – parámetros del modelo,  $t$  – tiempo.

### ➤ Índice de calidad de agua (ICA)

Según el IDEAM (2011), citado en Delgado (2019), el ICA se define como “el valor numérico que califica en una de cinco categorías la calidad del agua de una corriente superficial, con base en las mediciones obtenidas para un conjunto de cinco o seis variables, registradas en una estación de monitoreo  $j$  en el tiempo  $t$ ”. Así mismo, se obtiene a partir de 5 o 6 variables fisicoquímicas (OD, SST, DQO, C.E. y pH total), las cuales son sometidas a una sumatoria aritmética equiponderada y el resultado es comparado con los establecidos en tablas de interpretación (Delgado, 2019). En la tabla 1 se muestran los valores estipulados de 0 a 1. Estos valores indican la calidad de agua de acuerdo a los rangos establecidos, pero no indica la fuente contaminante del recurso hídrico.

Tabla 1. Calificación de la calidad del agua según el ICA

Categorías de valores que puede tomar el indicador	Calificación de la calidad del agua	Señal de alerta
0,00 - 0,25	Muy mala	Rojo
0,26 - 0,50	Mala	Naranja
0,51 - 0,70	Regular	Amarillo
0,71 - 0,90	Aceptable	Verde
0,91 - 1,00	Buena	Azul

Fuente: IDEAM, 2011, citado en Delgado (2019)

#### 4.3.2 Morfometría

Las características físicas y morfométricas inciden en el comportamiento de la respuesta de la cuenca, es decir, el área, la pendiente, la forma de la cuenca, la red drenaje, el relieve, inciden la posibilidad de presentarse crecientes, erosión, entre otros.

##### ➤ **Parámetros físicos**

A continuación se presentan los parámetros físicos, de drenaje y de relieve de acuerdo con Vásquez, Herrera y Gutiérrez (2014) citado en Delgado (2019) e Ibáñez, Moreno y Gisbert (2011).

- ✓ **Área** es la porción de terreno capaz de realizar un drenaje sobre su superficie bajo la fuerza de la gravedad, el cual está condicionado por una línea divisoria de aguas que limita la superficie de drenaje. Es importante destacar, que bajo éste criterio se puede clasificar el área de drenaje de acuerdo al área de extensión en cuencas hidrográficas y microcuencas hidrográficas.

- ✓ **Perímetro** es la dimensión o longitud que tiene la divisoria de aguas en un área de drenaje.
- ✓ **Longitud axial** es la distancia desde el punto más alto del área de drenaje hasta su punto de desembocadura.
- ✓ **Ancho promedio**, está definido como el área de la cuenca hidrográfica entre la longitud de la misma.

➤ **Parámetros de forma**

La forma de una cuenca hidrográfica, define la dinámica del flujo hídrico. Algunos de los parámetros son los siguientes:

✓ **Coefficiente de Gravelius (Cg)**

Es denominado también con el nombre de coeficiente de Gravelius, este coeficiente establece una relación entre el perímetro de la cuenca con el perímetro de una cuenca teórica circular de igual área; por ende, estima la relación existente entre el ancho promedio del área de captación y la longitud de la cuenca (Ecuación 13).

$$Cg = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad \text{Ec.13}$$

Dónde, Cg – coeficiente de Gravelius, P – perímetro de la cuenca, en Km, A – superficie de la cuenca en Km<sup>2</sup>.

✓ **Rectángulo equivalente**

Según Ibáñez, Moreno y Gisbert (2011), éste supone la transformación geométrica de la cuenca real en una superficie rectangular de lados L y I del mismo perímetro de tal forma que las curvas de nivel se convierten en rectas paralelas a los lados menores del rectángulo (I), ver ecuaciones 14 y 15.

$$L = \frac{Cg \sqrt{A}}{1,12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{Cg} \right)^2} \right] \quad \text{Ec.14}$$

$$I = \frac{Cg\sqrt{A}}{1,12} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Cg}\right)^2} \right] \quad \text{Ec.15}$$

Dónde, L – altura del rectángulo en Km, I – base del rectángulo en Km, Cg – coeficiente de Gravelius, A – superficie de la cuenca en Km<sup>2</sup>.

### ➤ **Parámetros de relieve**

Éstos toman mayor relevancia en comparación con los parámetros de forma, para el comportamiento hidrológico que pueda caracterizar a un área de drenaje (Cuenca hidrográfica). Algunos de los parámetros de relieve son los siguientes:

#### ✓ **Pendiente media del cauce**

Se puede catalogar como la relación existente entre la variación altitudinal del cauce en un cuenca hidrográfica, con su respectiva longitud, ver ecuación 16.

$$j = \frac{DA}{L} \quad \text{Ec.16}$$

Dónde, h, DA – desnivel altitudinal (km), L, L – longitud del cauce en km.

#### ✓ **Pendiente media o promedio de la cuenca (J)**

Éste se obtiene con el cálculo de la media ponderada de las pendientes de todas las superficies elementales de la cuenca en las que la línea de máxima pendiente se mantiene constante. Por ende, puede ser denominado como un factor de velocidad media de la escorrentía (Ibáñez, Moreno y Gisbert, 2011), ver ecuación 17.

$$J = 100 \frac{\sum Li * E}{A} \quad \text{Ec.17}$$

Dónde, J – pendiente media de la cuenca, Li – longitud de cada una de las curvas de nivel (Km), E – equidistancia de las curvas de nivel (Km), A – superficie de la cuenca (Km<sup>2</sup>)

### ✓ Curva hipsométrica

Según Racca (2007), citando a (Strahler, 1952), la curva hipsométrica (figura 2) permite conocer la distribución de masa en una cuenca hidrográfica desde arriba hacia abajo. Se obtiene colocando en las ordenadas los valores correspondientes a las diferentes alturas de la cuenca referidos a la máxima de la misma y, en las abscisas, los valores de área que se encuentran por encima de las alturas correspondientes, referidas al área total de la cuenca. De esta forma se utilizan valores relativos (porcentuales), lo que hace posible comparar curvas de diferentes cuencas, prescindiendo de las dimensiones absolutas, ver figura 3.

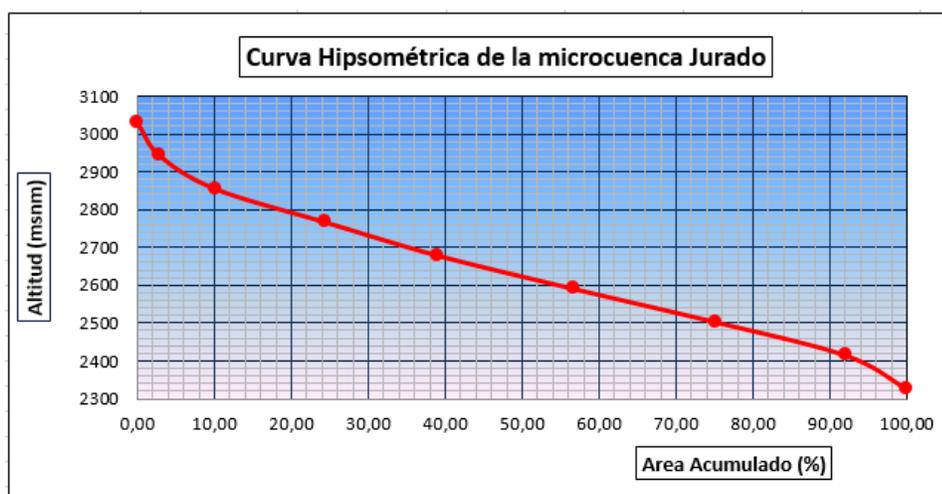


Figura 2. Curva hipsométrica de la microcuenca Jurado

Fuente: Perdomo (2020)

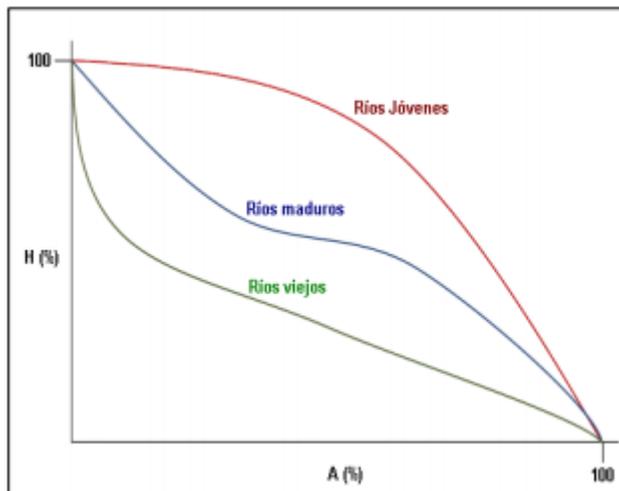


Figura 3. Cambio de forma de la curva hipsométrica con la edad del río

Fuente: Ibáñez, Moreno y Gisbert (2011)

#### ✓ Histograma de frecuencias altimétricas

Según Ibáñez, Moreno y Gisbert (2011), es la representación de la superficie, en  $\text{Km}^2$  o en porcentaje, comprendida entre dos cotas, siendo la marca de clase el promedio de las alturas, ver figura 4.

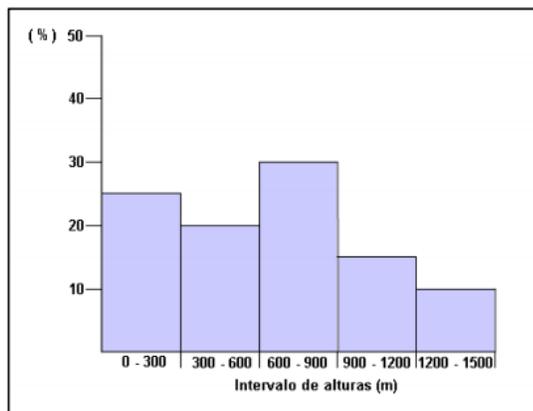


Figura 4. Ejemplo de histograma de frecuencias acumuladas

Fuente: Ibáñez, Moreno y Gisbert (2011)

✓ **Altura media (H)**

Con base a las curvas de nivel en una cuenca hidrográfica, las cuales definen la variación altitudinal del terreno, la altura media es una ponderación de ésta variable.

Es importante precisar que la variación de temperatura en una cuenca hidrográfica, está dada por el nivel altitudinal que presenta. Por ende, a mayor elevación, menor es la temperatura del área,

$$H = \frac{V}{A} \quad \text{Ec.18}$$

Dónde H – altura media, V – volumen comprendido entre la curva y los ejes (m<sup>3</sup>), A – superficie de la cuenca en m<sup>2</sup>.

➤ **Parámetros de drenaje**

✓ **Hidráulica de la red fluvial**

De acuerdo con Ibáñez, Moreno y Gisbert (2011), la morfometría del cauce en una cuenca hidrográfica está condicionada por el tipo de material que allí se encuentra, y la fuerza tractiva que genera el agua cuando fluye. Cuando la fuerza el agua penetra la estructura del suelo a las orillas del cauce, se puede producir un fenómeno denominado socavación, el cual es el desprendimiento de roca y partículas de suelo ocasionando alteraciones en la morfometría del cauce. De ésta manera, cabe resaltar la velocidad del fluyo, la cual está condicionada por la pendiente del cauce y se puede clasificar en laminar o turbulenta (figura 5).

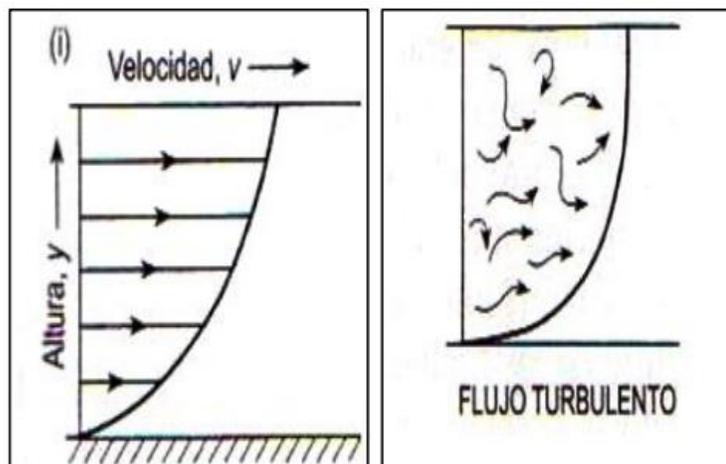


Figura 5. Flujo laminar y turbulento

Fuente: Gutiérrez (2008). “Geomorfología”, citado en Ibáñez, Moreno y Gisbert (2011).

### ✓ Perfil longitudinal

Gráficamente, el perfil longitudinal representa la variación altitudinal del cauce principal en una cuenca hidrográfica desde su nacimiento hasta su desembocadura (figura 6).

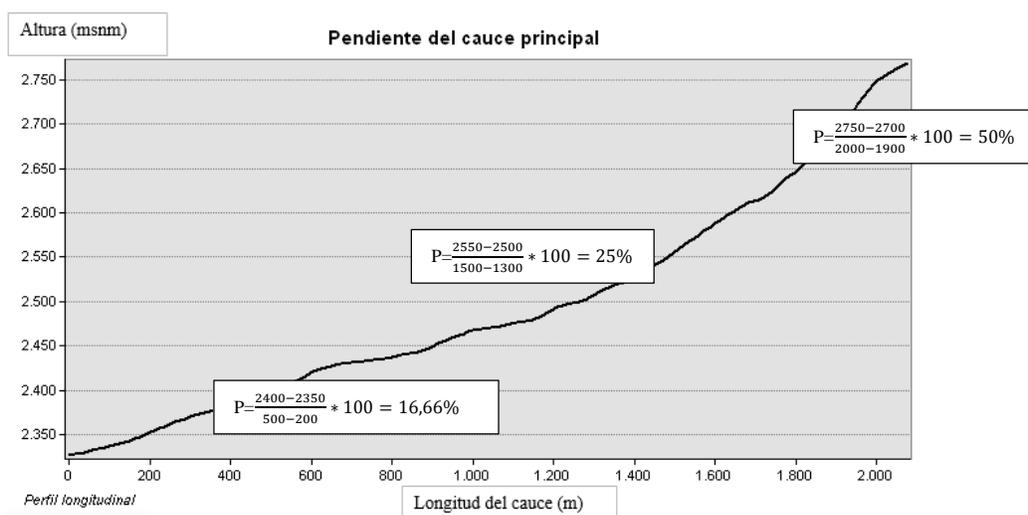
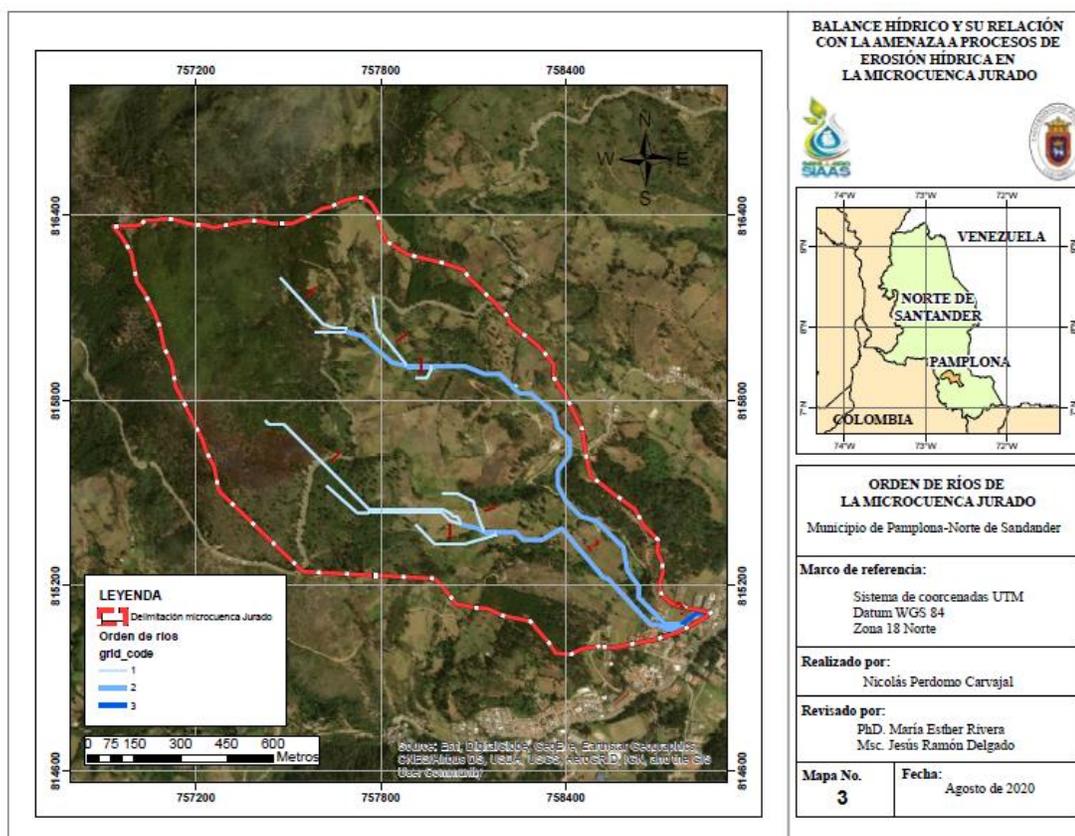


Figura 6. Perfil longitudinal de la quebrada Jurado

Fuente: Perdomo (2020).

### ✓ Jerarquización de la red fluvial

Un método habitualmente usado para la clasificación del orden de ríos es el método Strahler (1952), según el número de cauces aportantes al cauce principal, éste va aumentando su orden de la siguiente manera (figura 7). Por otro lado, cabe mencionar que existen otros métodos para el orden de ríos, pero para la presente investigación mediante el software ArcGIS se trabajará con el método propuesto.



*Figura 7. Método de ordenación de los segmentos o cursos fluviales*

Fuente: Elaborado por Perdomo (2020) a partir de la información del satélite Alos Palsar, en el software ArcGis Versión 10.4 de la Universidad de Pamplona.

### ✓ **Densidad de drenaje**

Se estima a partir de dividir la longitud total de afluentes y cauce principal de la cuenca hidrográfica, entre el área que contiene a cada uno (Ecuación 19).

$$Dd = \frac{L}{A} \quad \text{Ec.19}$$

Dónde, L – sumatoria de todos los cauces del área de drenaje, A – área total de la cuenca en Km<sup>2</sup>.

### **4.3.3 Geología**

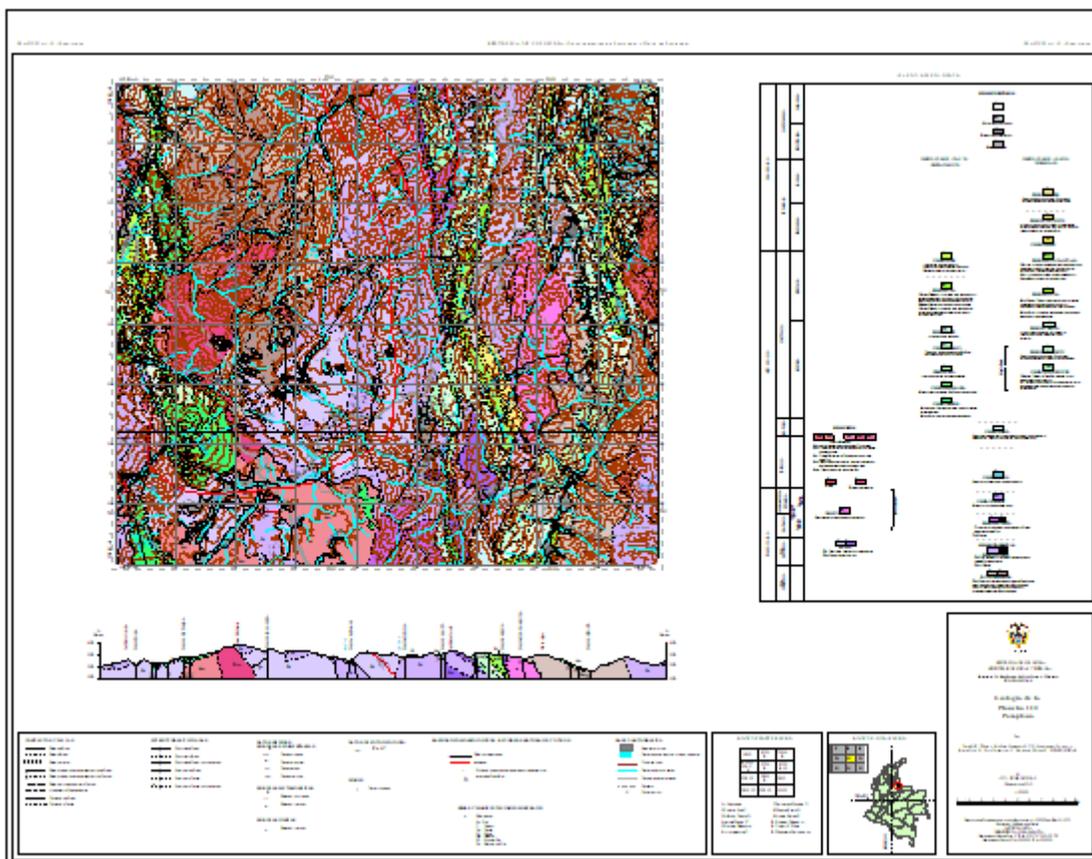
Según Vargas Cuervo (2012), los estudios de geología y geomorfología aplicados al diseño de obras civiles y la mitigación de amenazas por erosión e inundaciones, se orientan principalmente hacia el conocimiento del comportamiento dinámico del cauce, en el espacio y el tiempo. Así mismo, afirma que la geología particularmente con énfasis del cuaternario, se orienta hacia la caracterización litológica, estructural, textural de los materiales del lecho del cauce y sus orillas con el objeto de valorar su resistencia relativa a los procesos erosivos. Sin embargo, es conveniente tener en cuenta que lo mencionado por el autor aplica para cauces de grandes caudales como el río Magdalena, río Cauca, entre otros.

Guerrero, Serpa y Vázquez (2015) aseguran que “El estudio de las características geomorfológicas de una cuenca hidrográfica, soluciona problemas debidos a la falta de información de características y rasgos propios de la superficie terrestre, los cuales influyen en su comportamiento hidrológico, hidráulico e hidrodinámico. De esta manera, se puede lograr una perspectiva panorámica y una observación minuciosa a las respuestas hidrológicas, procesos de escorrentía y erosión, que causarán un impacto ambiental en la zona de estudio”. Pero, otros autores podrían considerar que las características físicas y morfométricas brindan un conocimiento

previo de la posible respuesta hídrica de la misma que permite tomar decisiones y soluciones a las diferentes problemáticas que se presentan.

En Colombia, el Servicio Geológico Colombiano (SGC), ha realizado estudios geológicos a diferentes escalas, a partir de los cuales ha llegado a presentar mapas geológicos a escalas 1:500000 y 1:100000. Para la región de la Provincia de Pamplona, se tiene la plancha geológica del cuadrángulo H13 y la plancha 110 Pamplona, en la cual, se describen los principales rasgos litológicos y estructurales predominantes.

A continuación, se presenta la plancha 110 Pamplona (figura 8), suministrada por el Servicio Geológico Colombiano.



*Figura 8. Plancha 110 Pamplona*

Fuente: Servicio Geológico Colombiano

La zona de estudio está ubicada en la parte superior derecha de la plancha 110 Pamplona. Las unidades geológicas adyacentes a la microcuenca Jurado pertenecen al periodo del Paleozoico con rocas granito urania de color blanco, de grano medio a grueso, moscovítico; como también hacen parte de éste periodo geológico el Ortoneis. Además, del periodo geológico mesozoico, están presentes las formaciones geológicas Capacho, Aguardiente, Tibú y Mercedes.

#### **4.3.4 Geomecánica**

De acuerdo con Gutiérrez y PARRALES (2017), la mayoría de los taludes son aparentemente estables y estáticos, pero realmente son sistemas dinámicos en evolución. Un talud estable puede desestabilizarse con el tiempo y la ocurrencia de un deslizamiento es un fenómeno propio de ese proceso. Por ende, los principales factores que afectan el comportamiento de una ladera son: a) La topografía de las laderas y la pendiente. b) Factores internos como las propiedades geomecánicas del suelo, el estado de esfuerzos actuantes; y como factores externos se tiene el efecto del clima, el agua superficial, cobertura vegetal, uso del suelo y la acción del hombre. c) La litología de los materiales aflorantes y su grado de alteración, condicionará sus características físico-mecánicas y su estabilidad potencial. De esta manera, el comportamiento variará de unos materiales a otros actuando sobre ellos con igual intensidad los mismos factores. d) Las discontinuidades presentes (planos de estratificación, fallas, diaclasas, esquistosidad), atendiendo a su inclinación, orientación, número, densidad, naturaleza y morfología.

#### **4.3.5 Erosión hídrica**

Ríos (2018) considera que las cuencas hidrográficas se erosionan permanentemente debido a la acción de los procesos exógenos que actúan sobre estas, a través de sus agentes como lo son

el agua, el viento, la gravedad, el hielo y los seres vivos (Vanoni, 1975). Particularmente, la erosión hídrica se produce bajo dos condiciones: (1) Cuando el impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo excede la capacidad de este para resistir el desprendimiento (Lane et al., 1988, Merritt et al 2003). Se han reportado datos experimentales y simulaciones numéricas que indican que tal impacto puede llegar a ejercer un esfuerzo cortante superficial de hasta 10 Pa (Hartley y Julien, 1992 y Julien, 2010). (2) Cuando la escorrentía superficial ejerce un esfuerzo cortante mayor que el esfuerzo crítico admisible por las fuerzas cohesivas del suelo (Lane et al., 1988 y Merritt et al., 2003). Las condiciones anteriores, representan bien el fenómeno que origina los tres tipos de erosión hídrica (laminar, surcos, cárcavas) en zonas de montaña (Merritt et al., 2003 y Borah et al 2008)".

Otra definición está dada por Santacruz De León (2011): "La erosión hídrica es la más importante causa de erosión de tierras, es responsable de la erosión de 440 millones de hectáreas de tierras de las 747 millones que sufren erosión en Asia; de 227 millones de hectáreas de las 497 millones que son afectadas por este fenómeno en África; de 123 millones de hectáreas de 243 millones en América del Sur; de 115 millones de 219 millones en Europa, 106 en América del Norte y América Central, Bifani (1984)".

Según un informe de erosión de suelos en América Latina, realizado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), pueden usarse varios métodos empíricos para calcular la erosión total laminar y en surcos en un segmento de pendiente. Aquí se describen tres de ellos: a) la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (Universal Soil Loss Equation) (USLE, Wischmeier y Smith, 1978); b) el Método OnstadFoster (AOF), (Onstad y Foster, 1975); c) la Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelos (Revised Universal Soil Loss Equation - RUSLE), (Renard et.al., C.A. Jones R.H. Griggs, J.R. Williams y R. Srinivasan,

1991).

Para la realización de la presente investigación, se implementará la metodología a y c.

En la estimación de la erosión hídrica por la metodología USLE, la FAO establece la siguiente ecuación, ver ecuación 20.

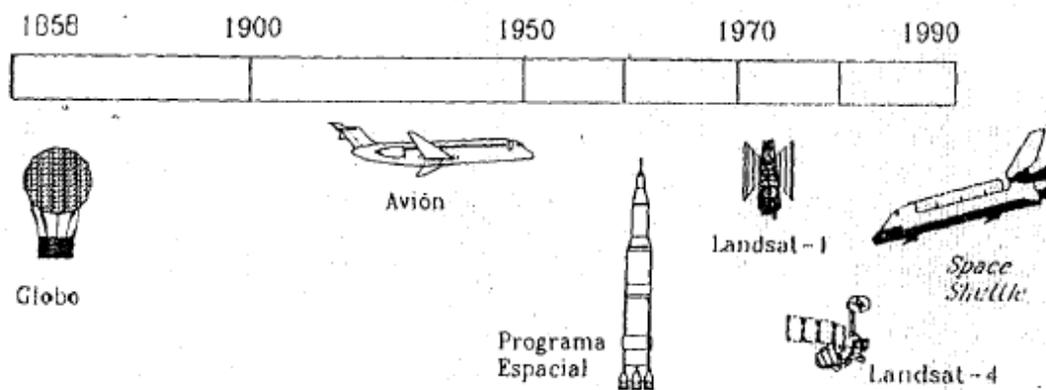
$$A=R \times K \times L \times S \times C \times P \qquad \text{Ec.20}$$

Dónde A - es la pérdida de suelos calculada por unidad de superficie; R - el factor lluvia y escurrimiento; K - el factor susceptibilidad de erosión del suelo; L - el factor de largo de la pendiente; S - el factor de magnitud de la pendiente; C - el factor cubierta y manejo; P - el factor de prácticas de apoyo de conservación.

#### **4.3.6 Teledetección y Sistema de Información Geográfico (SIG)**

Para Chuvieco (1995), en la segunda edición de su libro titulado “Fundamentos de teledetección espacial” ofrece un amplio conocimiento sobre el origen y aplicación de la teledetección en diversos campos del saber científico.

Contextualizando en el tema de teledetección, Chuvieco (1995), dice: “La teledetección es una técnica aplicada, y como tal muy dependiente del estado de desarrollo tecnológico existente en cada momento. Por cuanto que en ella se conjugan aspectos muy variado-ópticos y detectores del sensor, vehículo que lo sustenta, sistemas de trasmisión, equipos de tratamiento, etc. Las formas de teledetección han variado ostensiblemente en las últimas décadas (figura 9). El crecimiento ha sido realmente vertiginoso, facilitando una progresión muy notable, tanto en la cantidad, como en la variedad y calidad de la información disponible para campos científicos muy variados”.



*Figura 9. Evolución histórica de los sistemas de teledetección*

Fuente: Chuvieco (1995)

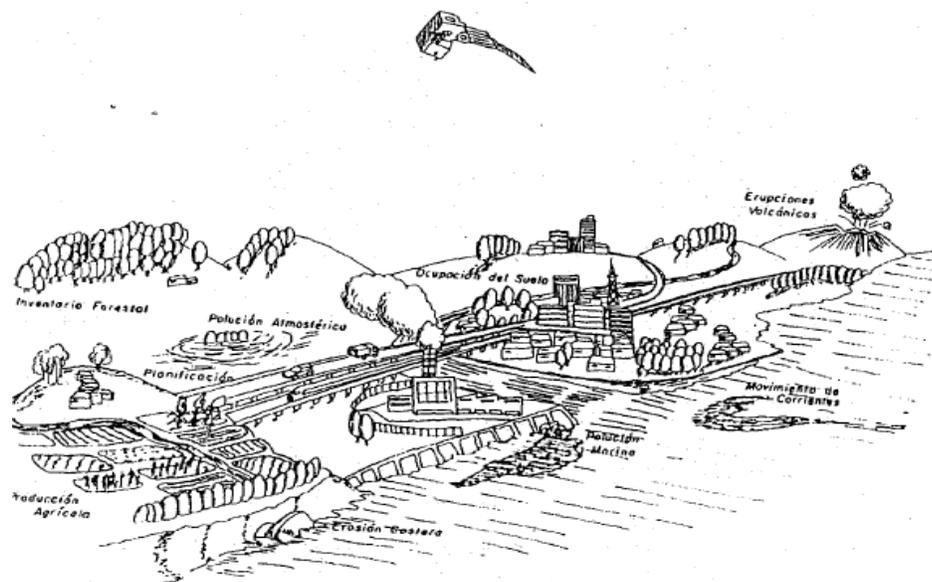
### **Principales aplicaciones de la Teledetección**

Según OTA (1984), citado en Chuvieco (1995), en la teledetección se destacan las siguientes áreas de aplicación de la teledetección espacial (figura 10):

- Estudio de la erosión de playas y arenales.
- Inventario regional del medio ambiente para preparar estudios de los impactos ambientales.
- Cartografía geológica para la exploración mineral y petrolífera.
- Cartografía de nuevos depósitos volcánicos.
- Control de la acumulación nival, de la fusión y de los cambios previsibles en la disponibilidad de la energía hidroeléctrica.
- Control del movimiento de icebergs en zonas polares.
- Estimación de modelos de esorrentía y erosión.
- Inventario del agua superficial.
- Análisis en tiempo real de masas nubosas de escala media y pequeña.
- Medidas de aguas superficiales y humedales para evaluar la situación del hábitat para

aves acuáticas.

- Verificación de contenidos de salinidad en las principales corrientes de agua.
- Cartografía térmica de la superficie del mar.
- Verificación y control de la calidad física del agua, turbidez y contenido de algas.
- Control de los movimientos del gulf-stream y otras corrientes marinas.
- Cartografía de la cobertura vegetal del suelo.
- Rápida evaluación de condiciones de estrés en la vegetación, por efectos de la sequía o deforestación.
- Cartografía de áreas quemadas y seguimiento de los ritmos de la población natural.
- Contribución a la cartografía e inventario de la cobertura y uso del suelo.
- Realización de inventarios forestales.
- Selección de rutas óptimas para nuevas vías de comunicación.
- Control de pastizales efímeros para estudiar efectos de la sequía y excesivo pastoreo.
- Cartografía e inventario por especies.
- Predicción del rendimiento de cultivos.



*Figura 10. Aplicaciones de la teledetección espacial*

Fuente: (Adaptado de NASDA, 1987), citado en Chuvieco (1995).

Dentro de éste marco, los Sistemas de Información Geográfico también toman relevancia para el procesamiento de información satelital. Olaya (2014), en su libro titulado “Sistemas de Información Geográfico”, menciona las operaciones que se pueden realizar en un SIG, entre estas se tienen:

- ✓ Lectura, edición, almacenamiento y, en términos generales, gestión de datos espaciales.
- ✓ Análisis de dichos datos. Esto puede incluir desde consultas sencillas a la elaboración de complejos modelos, y puede llevarse a cabo tanto sobre la componente espacial de los datos (la localización de cada valor o elemento) como sobre la componente temática (el valor o el elemento en sí).
- ✓ Generación de resultados tales como mapas, informes gráficos, etc.

En ese mismo contexto Olaya (2014), dice: “Una forma de entender el sistema SIG es como formado por una serie de subsistemas, cada uno de ellos encargado de una serie de funciones

particulares”. Para el autor anteriormente citado, es importante citar tres subsistemas fundamentales, los cuales se detallan a continuación.

- ✓ **Subsistema de datos.** Se encarga de las operaciones de entrada y salida de datos, y la gestión de estos dentro del SIG. Permite a los otros subsistemas tener acceso a los datos y realizar sus funciones en base a ello.
- ✓ **Subsistema de visualización y creación cartográfica.** Crea representaciones a partir de los datos (mapas, leyendas, etc.), permitiendo así la interacción con ellos. Entre otras, se incorpora también las funcionalidades de edición.
- ✓ **Subsistema de análisis.** Contiene métodos y procesos para el análisis de los datos geográficos.

Por otra parte, Olaya (2014), considera un SIG como herramienta útil y válida con carácter general, sí, incorpora estos tres subsistemas en cierta medida. Adicional a esto, otra forma distinta de ver el sistema SIG es atendiendo a los elementos básicos que lo componen. Cinco son los elementos fundamentales que se contemplan tradicionalmente en este aspecto.

- ✓ **Datos.** Los datos son la materia prima necesaria para el trabajo en un SIG, y los que contienen la información geográfica vital para la propia existencia de los SIG.
- ✓ **Métodos.** Un conjunto de formulaciones y metodologías a aplicar sobre los datos.
- ✓ **Software.** Es necesaria una aplicación informática que pueda trabajar con los datos e implemente los métodos anteriores.
- ✓ **Hardware.** El equipo necesario para ejecutar el software.
- ✓ **Personas.** Las personas son las encargadas de diseñar y utilizar el software, siendo el motor del sistema SIG.

#### **4.4 Marco Legal**

A continuación se expone la normativa vigente por la cual se rigen algunas de las temáticas implementadas en la presente investigación.

✓ **Ley 2811 de 1974**

Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.

✓ **Ley 99 de 1993**

Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.

✓ **Ley 142 del 11 de julio de 1994**

Esta Ley se aplica a los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado, aseo, energía eléctrica, distribución de gas combustible, telefonía fija pública básica conmutada y la telefonía local móvil en el sector rural; a las actividades que realicen las personas prestadoras de servicios públicos de que trata el artículo 15 de la presente Ley, y a las actividades complementarias definidas en el Capítulo II del presente título y a los otros servicios previstos en normas especiales de esta Ley.

✓ **Ley 388 de 1997**

Tiene como objetivo El establecimiento de los mecanismos que permitan al municipio, en ejercicio de su autonomía, promover el ordenamiento de su territorio, el uso equitativo y racional del suelo, la preservación y defensa del patrimonio ecológico y cultural localizado en su ámbito territorial y la prevención de desastres en asentamientos de alto riesgo, así como la ejecución de acciones urbanísticas eficientes; así mismo, garantizar que la utilización del suelo por parte de sus

propietarios se ajuste a la función social de la propiedad y permita hacer efectivos los derechos constitucionales a la vivienda y a los servicios públicos domiciliarios, y velar por la creación y la defensa del espacio público, así como por la protección del medio ambiente y la prevención de desastres.

✓ **Decreto 302 del 25 de febrero del 2000**

El presente decreto contiene el conjunto de normas que regulan las relaciones que se generan entre la entidad prestadora de los servicios públicos de acueducto y alcantarillado y los suscriptores y usuarios, actuales y potenciales, del mismo.

✓ **Resolución 0865 del 22 de julio de 2004**

Por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones.

✓ **Decreto 1575 del 9 de mayo de 2007**

El objeto del presente decreto es establecer el sistema para la protección y control de la calidad del agua, con el fin de monitorear, prevenir y controlar los riesgos para la salud humana causados por su consumo, exceptuando el agua envasada.

Aplica a todas las personas prestadoras que suministren o distribuyan agua para consumo humano, ya sea cruda o tratada, en todo el territorio nacional, independientemente del uso que de ella se haga para otras actividades económicas, a las direcciones territoriales de salud, autoridades ambientales y sanitarias y a los usuarios.

✓ **Resolución 2115 del 22 de junio de 2007**

Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para el consumo humano.

✓ **Decreto 1076 del 26 de mayo de 2015**

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible es el rector de la gestión del ambiente y de los recursos naturales renovables, encargado de orientar y regular el ordenamiento ambiental del territorio y de definir las políticas y regulaciones a las que se sujetarán la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales renovables y del ambiente de la Nación, a fin de asegurar el desarrollo sostenible, sin perjuicio de las funciones asignadas a otros sectores.

✓ **Resolución 0330 del 8 de junio del 2017**

La Resolución 0330 de 2017 expedida por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio “Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009”.

✓ **Decreto 4702 de 2010**

Por el cual se modifica el Decreto-ley 919 de 1989, y se crea la Gerencia del Fondo Nacional de Calamidades, para cumplir funciones específicas durante el desarrollo de las actividades requeridas para las fases de atención humanitaria y rehabilitación, que se realizarán con el fin de conjurar la crisis generada por el Fenómeno de la Niña 2010-2011 y evitar la extensión de sus efectos.

✓ **Decreto 4579 de 2010**

Por el cual se declara la situación de desastre nacional en el territorio colombiano. De esta manera, La Dirección de Gestión del Riesgo del Ministerio del Interior y de Justicia procederá a elaborar con base en el Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, un Plan de Acción Específico para el manejo de la situación declarada que será de obligatorio cumplimiento por todas las entidades públicas o privadas que deban contribuir en su ejecución, de conformidad

con lo señalado por el artículo 20 del Decreto 919 de 1989.

✓ **Decreto 4580 de 2010**

Por el cual se declara el estado de emergencia económica, social y ecológica por razón de grave calamidad pública en el mes de diciembre de 2010.

✓ **Decreto 4147 de 2011**

Por el cual se crea la Unidad Nacional Para la Gestión de Riesgos de Desastres, se establece su objeto y estructura.

✓ **Ley 1505 de 2012**

Por medio de la cual se crea el Subsistema Nacional de Voluntarios de Primera Respuesta y se otorgan estímulos a los voluntarios de la Defensa Civil, de los Cuerpos de Bomberos de Colombia y de la Cruz Roja Colombiana y se dictan otras disposiciones en materia de voluntariado en primera respuesta.

## 5. Metodología

### 5.1 Caracterización física y morfométrica de la microcuenca Jurado.

Se descargaron imágenes satelitales Alos Palsar con resolución 12,5 x 12,5 (m) del satélite Alaska Satélite Facility, de la zona de estudio. Luego, se importaron al software ArcGis versión 10.4 de la Universidad de Pamplona para el procesamiento del modelo de elevación digital (DEM), y mediante las herramientas de ArcToolBox como 3D Analisis Tools, Spatial Analysis Tools y Conversion Tools, se delimitó la microcuenca quebrada Jurado y se obtuvo la dirección de flujo, identificación de zonas de acumulación de sedimentos, red de drenaje, y clasificación método de Strahler, y mapa de pendientes de la zona de estudio.

En el programa Excel (2010) se procesó la información obtenida en ArcGis, para obtener los parámetros físicos (el tiempo de concentración ( $t_c$ ), la longitud del cauce principal ( $L_{cp}$ ), área, perímetro, longitud axial, curva hipsométrica), parámetros de forma (rectángulo equivalente, factor forma ( $F_f$ ), coeficiente de compacidad – ( $K_c$ ), parámetros de relieve (frecuencia altitudinal, pendiente media de la microcuenca, altura media, pendiente media del cauce), parámetros de drenaje (densidad de drenaje, orden de los afluentes, frecuencia de los ríos, extensión media el escurrimiento superficial).

### 5.2 Análisis de la escorrentía superficial en la microcuenca Jurado estimando la precipitación efectiva, bajo la metodología del número de curva.

En el software Cropwat Versión 8.0, se obtuvo el valor de la precipitación efectiva con base a los datos hidrometeorológicos de precipitación media mensual del año 2019 de la estación ISER Pamplona, descargados del IDEAM (figura 11).

El proceso llevado a cabo para la obtención de la precipitación efectiva, consiste en insertar

los datos de precipitación media mensual obtenidos a partir de la estación ISER Pamplona en el software Cropwat Versión 8.0, y de ésta manera el software va calculando los valores de precipitación efectiva para el periodo de análisis, que en este caso es el año 2019.

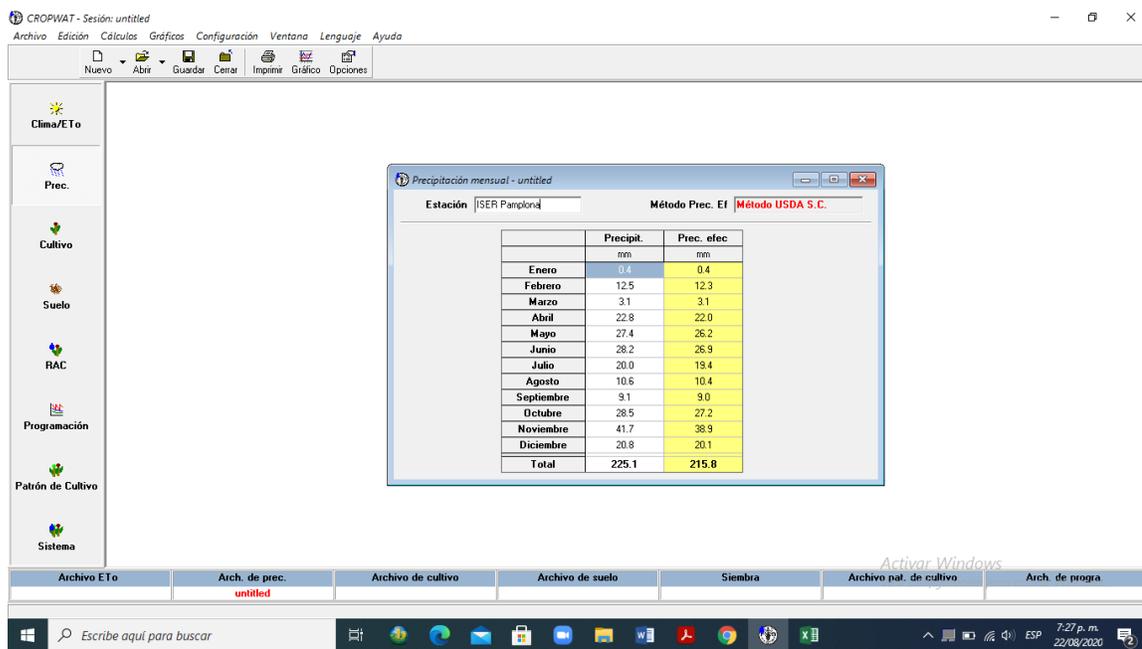


Figura 11. Cálculo de la precipitación efectiva para el año 2019 en la microcuenca Jurado

Fuente: Perdomo (2020), a partir del software Cropwat 8.0 (FAO)

Por otra parte, para la obtención del número de curva, el proceso se desarrolló en el software ArcGIS versión 10.4 de la Universidad de Pamplona, a partir de la metodología establecida en la Resolución 0865 del 2004; de esta manera, se utilizó el mapa de uso de suelos del departamento de Norte de Santander, descargado previamente por la página oficial del IGAC. Con base a esta información, se estableció dos grupos hidrológicos de acuerdo a la clasificación física que proporciona la fuente de información antes mencionada para la zona de estudio. Posteriormente, se relacionó la clasificación física del suelo obtenida por medio del mapa de usos de suelos del IGAC, con los resultados obtenidos en el laboratorio de granulometría (figura 13), de acuerdo a 3 muestras tomadas en la zona de estudio, extraídas de 3 apiques realizados en la parte baja, media

y alta de la microcuenca Jurado (figura 14) a una profundidad de 0,7 metros (figura 12).



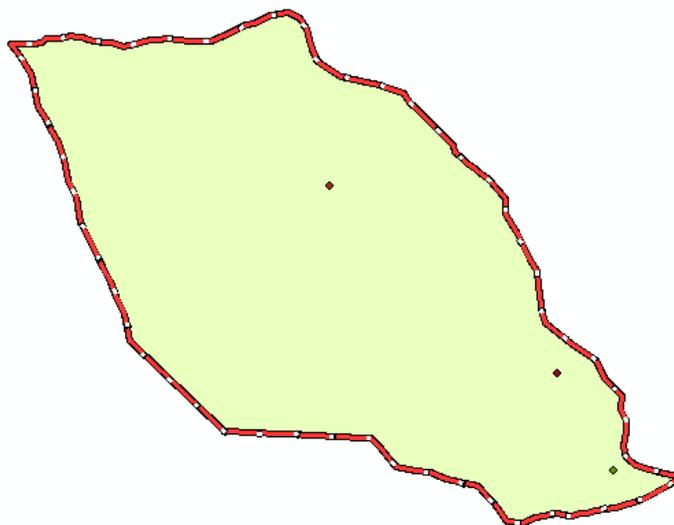
*Figura 12. Apiques en la zona de estudio*

Fuente: Perdomo (2018)



*Figura 13. Ensayo de granulometría*

Fuente: Perdomo (2018)



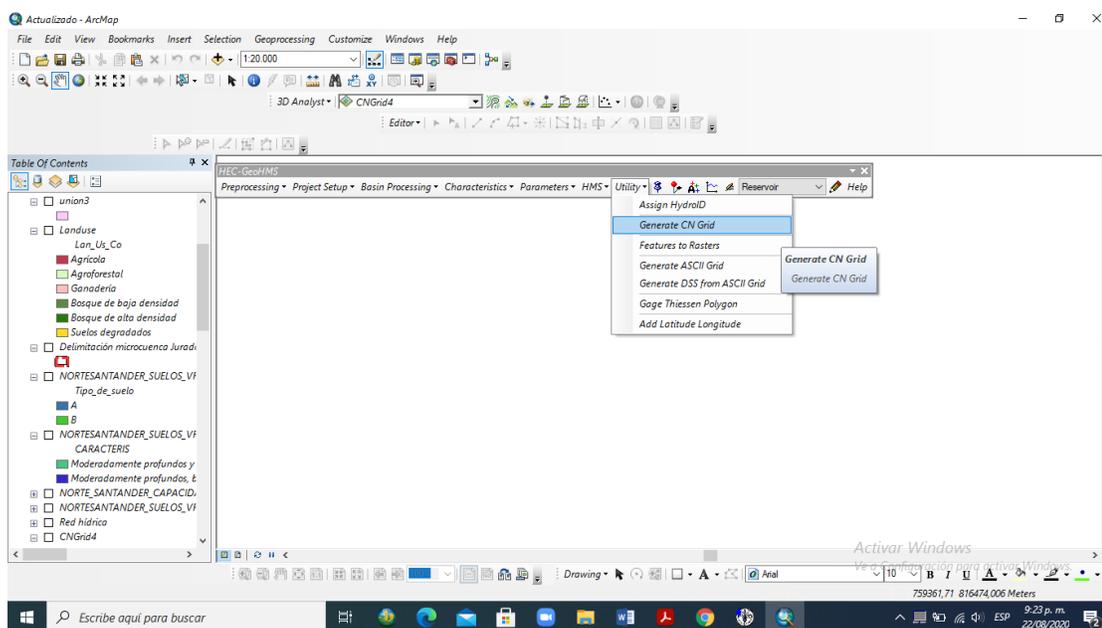
*Figura 14. Localización de apiques en la microcuenca Jurado*

Fuente: Perdomo (2020), a partir de la información del satélite Alos Palsar, en el software Arcgis versión 10.4 de la Universidad de Pamplona.

En este mismo contexto, para una mejor visualización de la cobertura del suelo, y usos del mismo, se utilizó la herramienta Basemap que proporciona el software ArcGIS. Así mismo, se descargaron imágenes Sentinel 2-a de la Agencia Espacial Europea (ESA). En este caso, se implementó una metodología de clasificación supervisada para obtener con mayor precisión el uso del suelo para la microcuenca Jurado, dadas las condiciones de resolución de la imagen satelital que no permitió la generación de los polígonos automáticamente por el tamaño de los píxeles; es decir, se generaron polígonos manualmente de acuerdo a los usos del suelo que se evidencian en campo. Este proceso se realizó con un mapa de la zona de estudio proyectado en ArcGis con ayuda de una imagen satelital en formato shapefile. De la misma manera, se obtuvo la cobertura vegetal del suelo para la microcuenca Jurado, haciendo uso de la metodología Corine Land Cover implementada en Colombia por el IDEAM.

De éste modo, el procesamiento de la información y posterior cálculo del número de curva

(CN), se desarrolló en el software ArcGIS versión 10.4 de la Universidad de Pamplona con la herramienta Hec-GeoHMS (figura 15).



*Figura 15. Cálculo del número de curva en el software ArcGis*

Fuente: Modificado de ArcGis 10.4, 2020.

Es preciso indicar que el software ArcGis versión 10.4 de la Universidad de Pamplona, calcula el número de curva de acuerdo a la información del uso de suelo y cobertura del mismo para la zona de estudio; además, del grupo hidrológico con el cual se caracteriza el suelo con base a su clasificación física.

Posteriormente, calculado el número de curva en el software ArcGis versión 10.4 de la Universidad de Pamplona de acuerdo a el uso de suelo, cobertura y grupo hidrológico del mismo, se procedió a calcular el número de curva final para la microcuenca Jurado con base a las condiciones de humedad antecedente del suelo, utilizando las ecuaciones 3 y 4, citadas en el apartado 4.3.2 del presente informe; las cuales están definidas por las precipitaciones que se presentaron en la zona de estudio en días anteriores. Seguidamente, se procedió al cálculo del

factor de retención superficial utilizando la ecuación 5, citada en el apartado 4.3.1.

Por último, con la información de las precipitaciones suministradas por el IDEAM, se calculó la escorrentía superficial utilizando la ecuación 6, previamente citada en el presente informe, teniendo en cuenta el factor de retención superficial calculado previamente con base al número de curva.

### **5.3 Determinación de la oferta y demanda hídrica en la microcuenca Jurado.**

#### **Oferta hídrica**

De acuerdo a la resolución 865 de 2004, se estimó la oferta hídrica mediante el número de curva (CN siglas en inglés) ponderado para la microcuenca en relación a los factores de cobertura vegetal, grupo hidrológico del suelo y condición antecedente de humedad característicos del área.

El factor de reducción por calidad de agua, se aplicó con base a los resultados de los estudios de calidad de agua realizados por estudiantes de la materia de hidrología en semestres anteriores; para lo cual, estimaron los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en la quebrada Jurado.

Por otra parte, la estimación del caudal ecológico, se realizó a partir de la Curva de Duración de Caudal (CDC), en 10 aforos de caudal que se han alcanzaron a realizar en la microcuenca Jurado en su parte baja, media y alta (figura 16), previo a la emergencia sanitaria nacional, ocasionada por el Covid-19. El anterior proceso se realizó utilizando los métodos hidrológicos e hidráulicos, citados por Lozano Sandoval y otro (2011), en un estudio realizado por la Corporación Regional del Quindío y la Universidad del Quindío.



*Figura 16. Aforo de caudales en la parte baja de la microcuenca Jurado*

Fuente: Perdomo (2020)

Para estimar el valor de  $Q$ , propuesto por la ecuación 6 en el apartado 4.2.1., se utilizó el valor de la precipitación anual de la microcuenca, denominado como variable ( $P$ ), y se calculó con los datos de precipitación máxima en 24 horas mensual multianual de la estación ISER PAMPLONA. Así mismo, para el cálculo de la variable ( $S$ ), se tomó el valor estimado del número de curva, previamente calculado en el software ArcGis versión 10.4 de la Universidad de Pamplona, y de ésta manera se complementaron las variables necesarias para la obtención de la escorrentía ( $Q$ ), en (mm/año) para la microcuenca Jurado.

Según lo expuesto por la resolución 865 de 2004, se aplicaron los factores de reducción de calidad de agua y caudal ecológico equivalentes al 50% del caudal total oferta estimado en la

microcuenca Jurado.

### **Demanda hídrica**

La demanda hídrica en el caso de la microcuenca Jurado, está determinada por una demanda en el sector doméstico, agrícola y pecuario.

Para el caso de la demanda en el sector doméstico, se aplicó una encuesta (figura 17) a la población que hace uso del recurso hídrico de la quebrada Jurado. Además, se tuvo en cuenta la captación que se hace en la parte alta de la microcuenca para abastecer el acueducto del barrio Jurado (figura 18), como también la captación que se hace para la cárcel del municipio de Pamplona (figura 19). A partir de los resultados del censo de personas beneficiadas del recurso hídrico, se determinaron los caudales de consumo, acorde a lo establecido por la resolución 0330 de 2017.



*Figura 17. Censo de usuarios del recurso hídrico*

Fuente: Perdomo (2020)



*Figura 18. Captación del recurso hídrico parte alta de la microcuenca*

Fuente: Perdomo (2020)



*Figura 19. Captación del recurso hídrico para la cárcel de Pamplona*

Fuente: Perdomo (2020)

En el sector agrícola, se realizaron visitas de campo para determinar el tipo de cultivos (figura 20). Así mismo, se estimaron las áreas para cultivos con sus respectivas etapas de desarrollo y propiedades radicales (figura 21). Por otro lado, se realizaron pruebas de infiltración en campo (figura 22) para determinar la infiltración, la capacidad de campo y punto de marchitez del suelo,

aplicando las metodologías de autores como Horton (1939) y Kostiakov (1932).



*Figura 20. Cultivos de la zona de estudio*

Fuente: Perdomo (2020)



*Figura 21. Medición de áreas de cultivos*

Fuente: Perdomo (2018)



*Figura 22. Prueba de infiltración en campo*

Fuente: Perdomo (2018)

De acuerdo con la definición que proporciona la FAO sobre el uso consuntivo del agua de riego, éste indica la cantidad de agua necesaria para satisfacer el déficit entre la evapotranspiración potencial y la precipitación efectiva durante el proceso de desarrollo de los cultivos. De ésta manera, el uso consuntivo del agua está sujeto a variabilidad de acuerdo a las condiciones climáticas, tipos de cultivos, tipos de suelo, etc.

Tal es el caso del requerimiento de agua por cultivo (RAC), que se estimó para cada cultivo presente en la zona de estudio por medio del software Cropwatt versión 8.0 de la FAO. Para ello, fue necesario tener como insumo las precipitaciones en el área, los coeficientes de cada cultivo de acuerdo a su etapa de desarrollo y las características físicas del suelo.

Así mismo, se calculó la demanda para el sector pecuario, utilizando los resultados del censo como tipo, cantidad y etapa de desarrollo de cada uno de los animales que se encuentran en

la zona de la microcuenca Jurado (figura 23). Luego de ello, se aplicaron los coeficientes de consumo que expone la FAO.



*Figura 23. Animales presentes en la zona de estudio*

Fuente: Perdomo (2020)

Con la sumatoria de cada uno de los sectores que hacen uso del recurso hídrico en la microcuenca Jurado se determina la demanda total de agua.

Finalmente, para el cálculo del balance hídrico en la microcuenca Jurado se utilizó el software Balance hídrico ISBH v. 0.9 de la compañía Innersoft en versión gratuita estudiantil. De ésta manera, mediante el software anteriormente mencionado se obtiene la Reserva (R), Variación de la reserva (AR), Evapotranspiración real (ETR), Excedente o esorrentía (E), y finalmente el Déficit hídrico anual (D). Además, el software proporciona datos como el Índice de humedad (Ih), Índice de aridez (Ia), Índice de humedad de Thornthwaite (Im), clasificación climática de Thornthwaite y subdivisión climática.

Desde luego, el proceso llevado a cabo en el software Balance hídrico ISBH v. 0.9 comprende utilizar dos variables imprescindibles para obtener el balance hídrico; tales son: La

precipitación, la evapotranspiración y la Capacidad de campo.

En el caso de la precipitación, los datos fueron suministrados por el IDEAM mediante su estación ISER Pamplona. Por otra parte, en el cálculo de la evapotranspiración se utilizó el software Cropwat 8.0 versión gratuita estudiantil de la FAO, el cual utiliza la metodología Penman-Monteith para la estimación de la evapotranspiración; de esta manera, también fue necesario descargar información meteorológica del IDEAM como temperatura, humedad, velocidad de viento y radiación solar.

#### **5.4 Obtención de la relación precipitación-escorrentía en la microcuenca Jurado.**

Para la obtención de la relación precipitación-escorrentía, se tuvo en cuenta las precipitaciones presentadas en el área, las cuales son registradas en la estación ISER PAMPLONA. Así mismo, la escorrentía superficial en la zona de estudio que se estimó aplicando la metodología del número de curva, teniendo en cuenta el grupo hidrológico del suelo, condiciones de humedad antecedente y cobertura vegetal.

#### **5.5 Análisis de la amenaza a procesos de erosión hídrica en la microcuenca Jurado.**

Se realizó una caracterización geológica de la zona de estudio, con base a la plancha geológica 110 Pamplona a escala 1:100000, previamente descargada en la página oficial del Servicio Geológico Colombiano (SGC), 1973.

Por otra parte, se obtuvo de la estación ISER Pamplona del IDEAM datos de precipitaciones media mensuales para el año 2019. Posteriormente, se realizó el mapa de índice de erosividad de las lluvias (R) en el software ArcGis versión 10.4 de la Universidad de Pamplona.

Así mismo, para realizar el mapa de índice de erodabilidad (K), se utilizó el software ArcGis versión 10.4 de Universidad de Pamplona. Para ello, fue necesario una previa clasificación física del suelo, obtenida a partir de los laboratorios de granulometría y límites de Atterberg que

se realizaron en el año 2018; en apoyo con la descripción física del suelo que proporciona el IGAC en su mapa de uso de suelos para el departamento de Norte de Santander a escala 1:25000.

De la misma forma se realizó el mapa de longitud (L) y pendiente (S) en el software ArcGis versión 10.4 de la Universidad de Pamplona. Para ello, fue necesario realizar previamente el mapa de pendientes de la zona de estudio, teniendo como insumo el Modelo de Elevación Digital (DEM), proporcionado por el satélite Alos Palsar de Alaska Satélite Facility con resolución 12.5 por 12.5 metros.

Finalmente, los índices de cobertura vegetal y conservación del suelo también se obtuvieron con ayuda del software ArcGis versión 10.4 de la Universidad de Pamplona. Inicialmente, se alcanzaron a realizar visitas a la zona de estudio en el presente año (2020), evidenciando parte de la cobertura vegetal que posee la microcuenca Jurado (figura 24); asimismo, las actividades que realiza el hombre para mitigar los niveles de erosión que se puedan presentar en el lugar (figura 25).



*Figura 24. Cobertura vegetal en la microcuenca Jurado*

Fuente: Perdomo (2020)



*Figura 25. Obras civiles para minimizar la amenaza por erosión hídrica*

Fuente: Perdomo (2020)

## 6. Resultado y Discusión

### 6.1 Caracterización física y morfométrica de la microcuenca Jurado.

La microcuenca de la quebrada Jurado (figura 26), es catalogada como una cuenca pequeña de área 1,49 Km<sup>2</sup> y un perímetro de 5,4 Km.

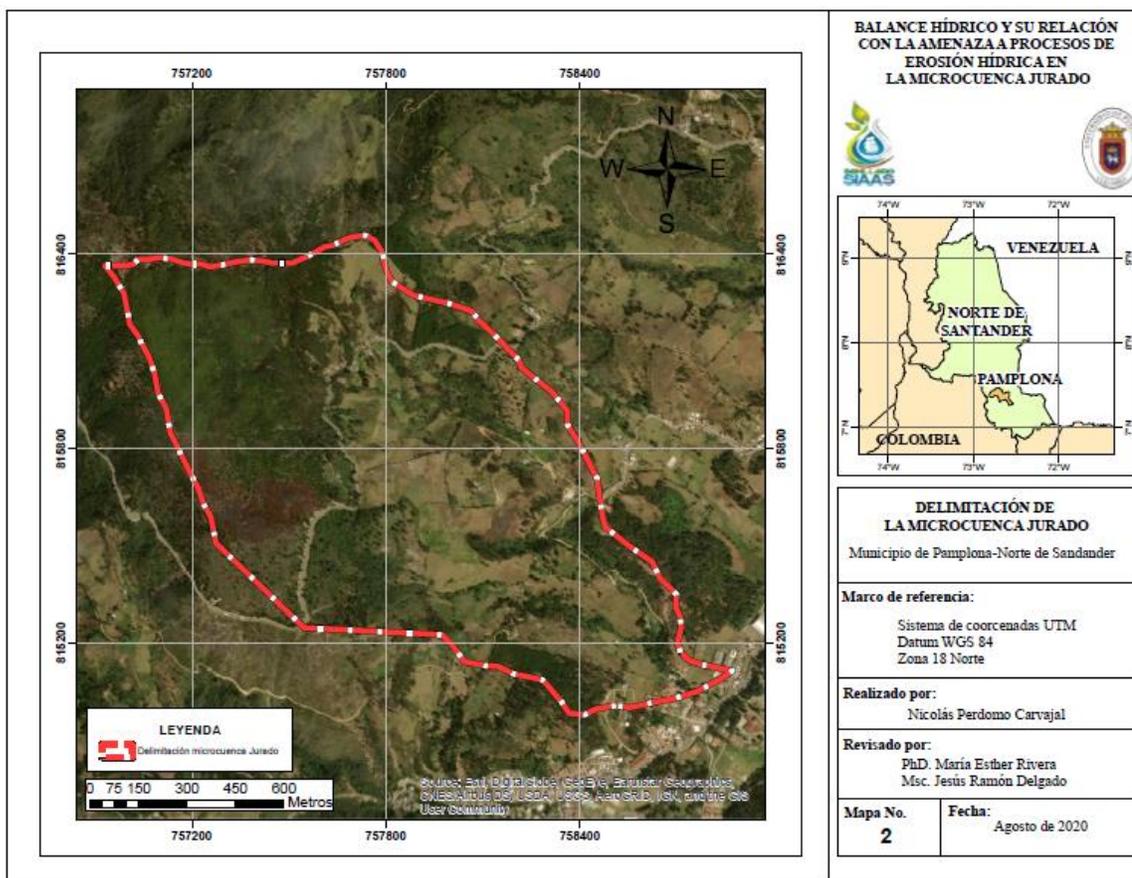


Figura 26. Delimitación de la microcuenca Jurado

Fuente: Elaborado por Perdomo (2020) a partir de la información del satélite Alos Palsar, en el software ArcGis Versión 10.4 de la Universidad de Pamplona.

En la tabla 2, se muestran los valores de los parámetros físicos y morfométricos obtenidos para la zona de estudio.

*Tabla 2. Morfometría microcuenca Jurado*

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR	MÉTODO USADO
Factor forma	Kf	Adimensional	0,39	Aritmético
Índice de compacidad	Kc	Adimensional	1,24	Aritmético
Densidad de drenaje	D	$Km^{-1}$	3,48	Aritmético
Pendiente media de la microcuenca	S	Porcentaje	38,02	Aritmético
Pendiente media del cauce	Pm	Adimensional	8,51	Aritmético
Frecuencias de ríos	F	$Km^2$	5,36	Aritmético
Extensión media del escurrimiento superficial	Es	Km	0,072	Aritmético
Tiempo de concentración	tc	Minutos	9,89	Aritmético
Altura media de la microcuenca	Am	msnm	2635,39	Aritmético
Rectángulo equivalente	re	Km	L= 1,96; I=0,76	Aritmético
Tiempo de concentración	tc	Minutos	9,89	Aritmético

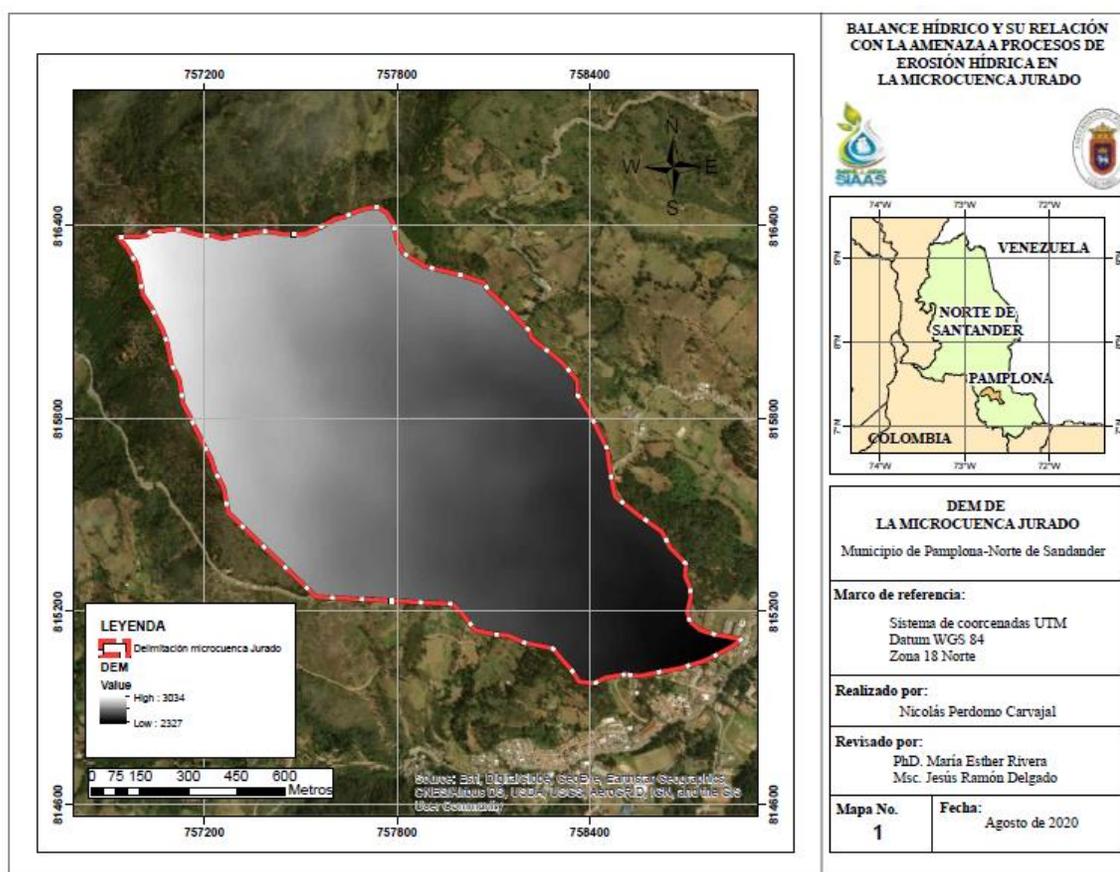
Fuente: Perdomo (2020)

De acuerdo con la tabla 2 la microcuenca no es ni alargada ni ensanchada; por ende, no es propensa a eventuales avenidas o crecidas y según el índice de compacidad de Gravelius es una microcuenca redonda a oval redonda; de esta manera, la microcuenca posee un drenaje eficiente ante posibles tormentas que se puedan presentar en la zona.

De la misma forma, con base al Modelo de Elevación Digital (DEM) de la zona de estudio (figura 27), se obtuvo una cota máxima de 3034 msnm y una cota mínima de 2327 msnm; además, se obtuvieron las pendientes para la microcuenca Jurado (figura 28).

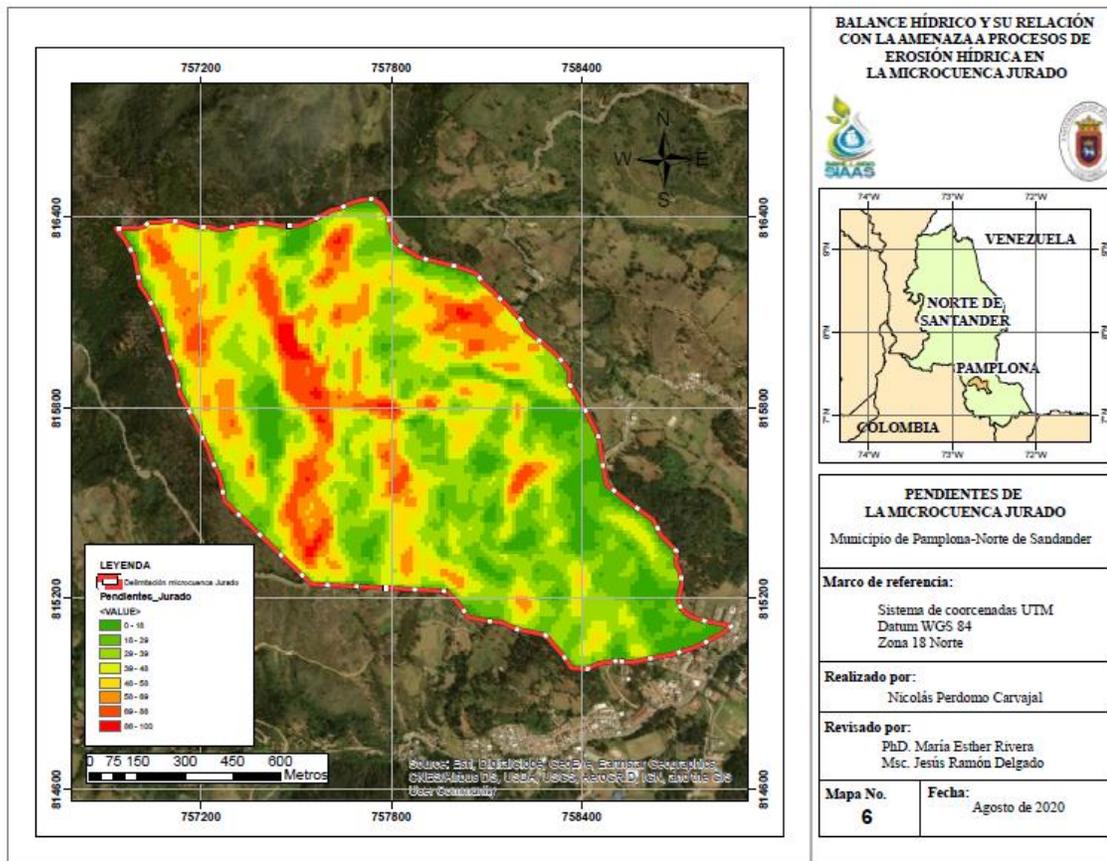
Por otra parte, de acuerdo con Becerra (2007), la pendiente media de una cuenca

hidrográfica define la velocidad del flujo; asimismo, la velocidad de flujo define los tiempos de concentración. Tal es el caso de la microcuenca Jurado, con una pendiente media del cauce equivalente a 38,02%; valor que propicia un escurrimiento superficial con una velocidad moderada.



*Figura 27. Modelo de Elevación Digital (DEM) microcuenca Jurado*

Fuente: Elaborado por Perdomo (2020) a partir de la información del satélite Alos Palsar, en el software ArcGis Versión 10.4 de la Universidad de Pamplona.



*Figura 28. Pendientes de la microcuenca Jurado*

Fuente: Elaborado por Perdomo (2020) a partir de la información del satélite Alos Palsar, en el software ArcGis Versión 10.4 de la Universidad de Pamplona.

Cabe señalar, que de acuerdo al mapa de pendientes para la microcuenca Jurado, se tiene una topografía con pendientes abruptas que oscilan entre el 86 y 100%. Es decir, que la zona de estudio puede ser vulnerable ante eventos erosivos.

Incluyendo el orden de ríos (figura 29), clasificado según Strahler (1952), citado en el apartado 4.3.2 del presente informe, y longitud de cauce principal, se muestran en la tabla 3.

*Tabla 3. Red hídrica*

<b>RED HÍDRICA</b>		
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>VALOR</b>
Longitud del cauce principal	Km	1,86
Orden de la red hídrica	Adimensional	3
Longitud total de la red hídrica	Km	5,5

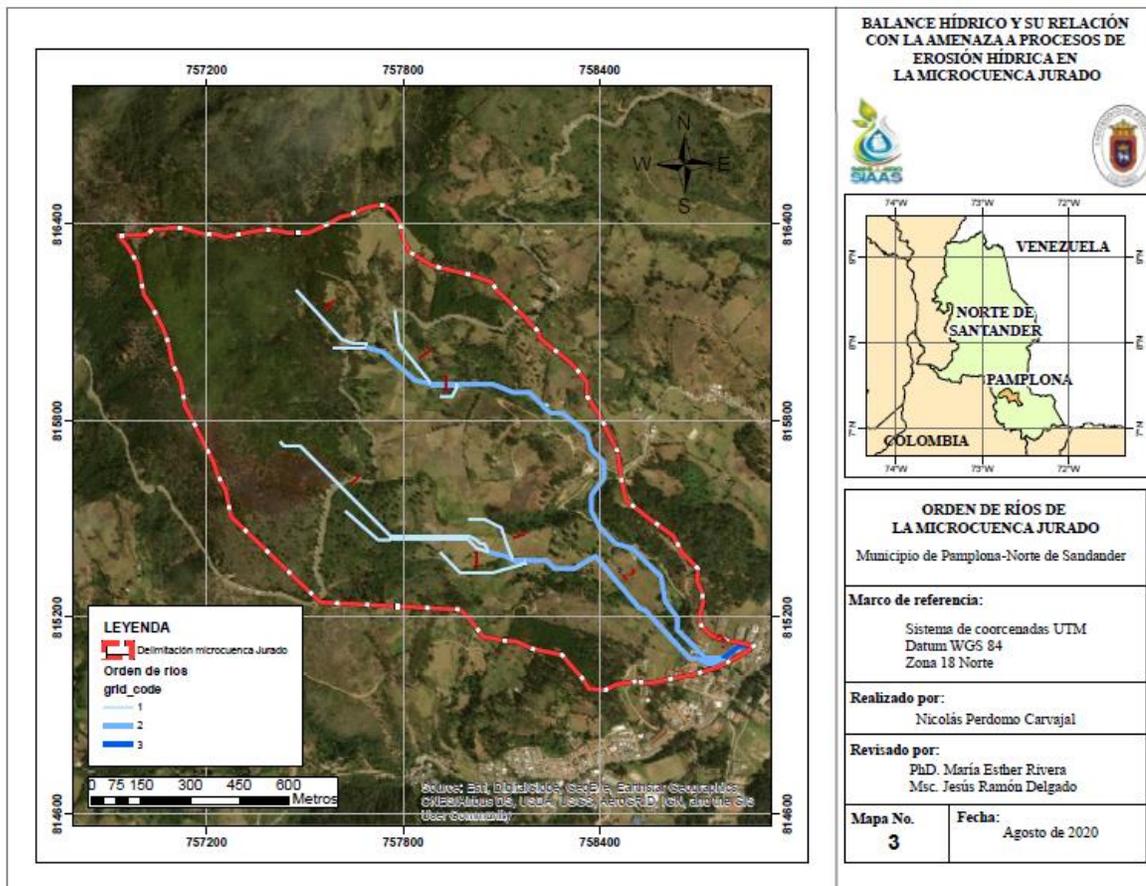
Fuente: Perdomo (2020)

De esta misma manera, en la tabla 4, se encuentran los valores de las longitudes para cada uno de los cauces de acuerdo a su orden.

*Tabla 4. Orden de cauces*

<b>ORDEN</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>VALOR</b>
1	Km	2,63
2	Km	2,77
3	Km	0,1
<b>TOTAL</b>	Km	5,5

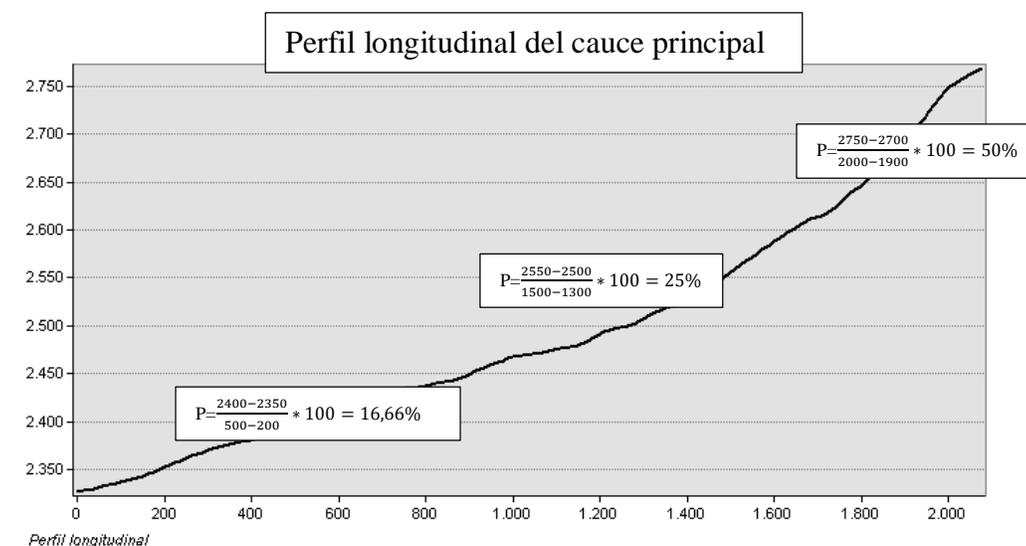
Fuente: Perdomo (2020)



*Figura 29. Orden de drenaje de la microcuenca Jurado*

Fuente: Elaborado por Perdomo (2020) a partir de la información del satélite Alos Palsar, en el software ArcGis Versión 10.4 de la Universidad de Pamplona.

En la figura 30 se observa el perfil longitudinal del cauce, el cual es catalogado como corto con variación en sus pendientes, las cuales se muestran en la siguiente figura.



*Figura 30. Perfil longitudinal del cauce principal de la quebrada Jurado*

Fuente: Perdomo (2020)

Es importante considerar las condiciones que tiene el flujo en el transcurso del cauce de la quebrada Jurado. Tal es el caso de la parte alta de la microcuenca, donde el perfil longitudinal del cauce principal tiene una pendiente de 50%; de ésta manera, según Chevesich (2015), los procesos erosivos tienen mayor impacto debido a la velocidad de flujo proporcionada por la pendiente. Además, considerando las pendientes de la parte media y baja de la zona de estudio, la velocidad del flujo podría disminuir dadas las condiciones topográficas; por ende, los procesos erosivos tendrían menor impacto.

Por último, en la figura 31 se observa la curva hipsométrica, que según Strahler (1952), indica que la microcuenca Jurado es una microcuenca en etapa madura. Además, la microcuenca Jurado presenta niveles de tolerancia ante eventuales torrencialidades que se puedan presentar sobre ésta.

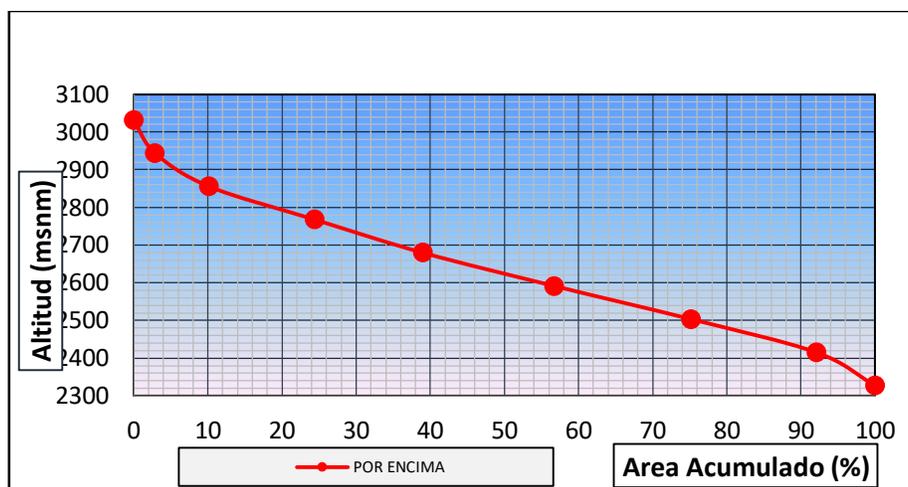


Figura 31. Curva hipsométrica microcuenca Jurado

Fuente: Perdomo (2020)

## 6.2 Análisis de la escorrentía superficial en la microcuenca Jurado estimando la precipitación efectiva, bajo la metodología del número de curva.

La precipitación efectiva (figura 32) se calculó de acuerdo a los datos suministrados por el IDEAM, de la estación ISER Pamplona, para el año 2019.

Precipitación mensual - untitled		
Estación	ISER Pamplona	
Método Prec. Ef	Método USDA S.C.	
	Precipit.	Prec. efec
	mm	mm
<b>Enero</b>	0.4	0.4
<b>Febrero</b>	12.5	12.3
<b>Marzo</b>	3.1	3.1
<b>Abril</b>	22.8	22.0
<b>Mayo</b>	27.4	26.2
<b>Junio</b>	28.2	26.9
<b>Julio</b>	20.0	19.4
<b>Agosto</b>	10.6	10.4
<b>Septiembre</b>	9.1	9.0
<b>Octubre</b>	28.5	27.2
<b>Noviembre</b>	41.7	38.9
<b>Diciembre</b>	20.8	20.1
<b>Total</b>	<b>225.1</b>	<b>215.8</b>

Figura 32. Precipitación efectiva para el año 2019

Fuente: Perdomo (2020), a partir de la información del IDEAM, en el software Cropwat 8.0

Por otra parte, los grupos hidrológicos del suelo (figura 34) de la microcuenca Jurado, están sujetos a la clasificación física del suelo proporcionada por el IGAC (figura 33); además, la clasificación física que se obtuvo a través de la granulometría realizada en los laboratorios de la Universidad de Pamplona con muestras de la parte baja (figura 33), media (figura 34) y alta (figura 35) de la microcuenca Jurado.

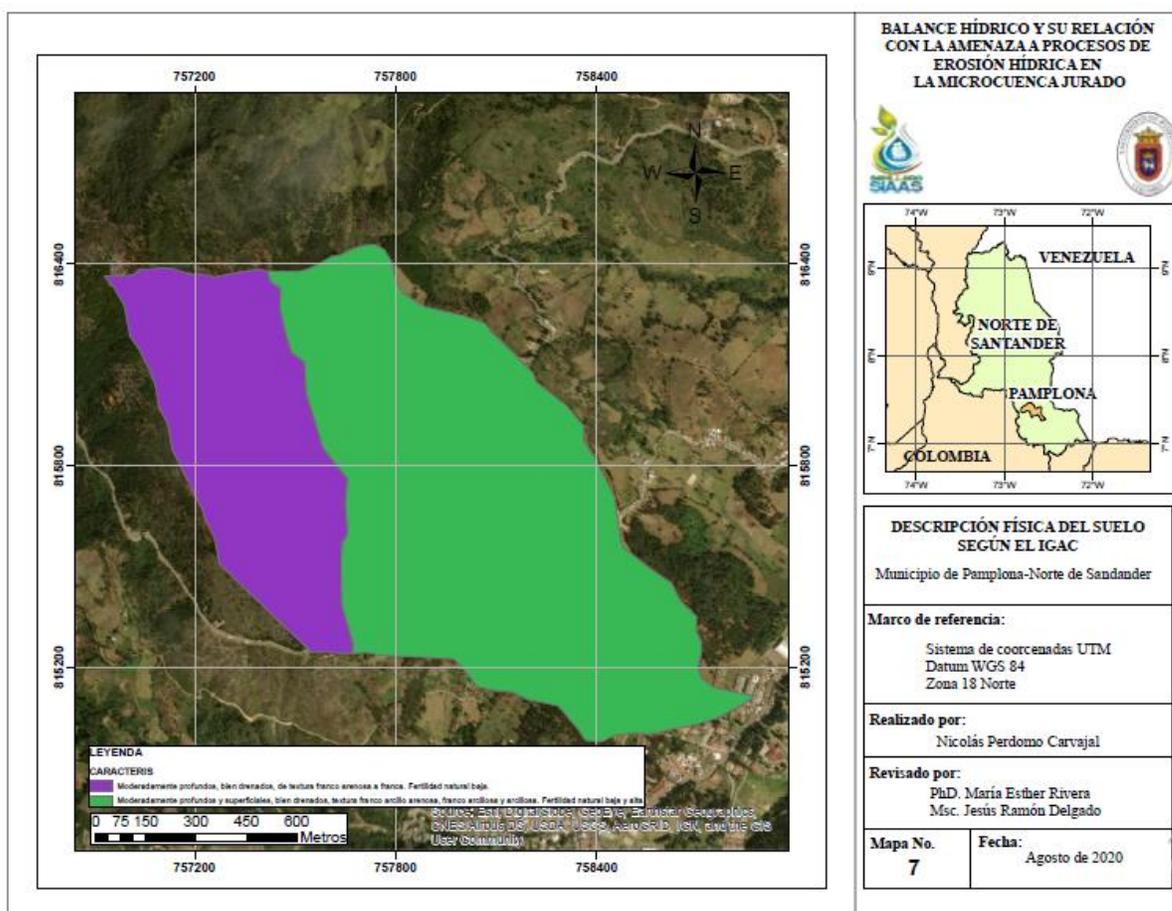


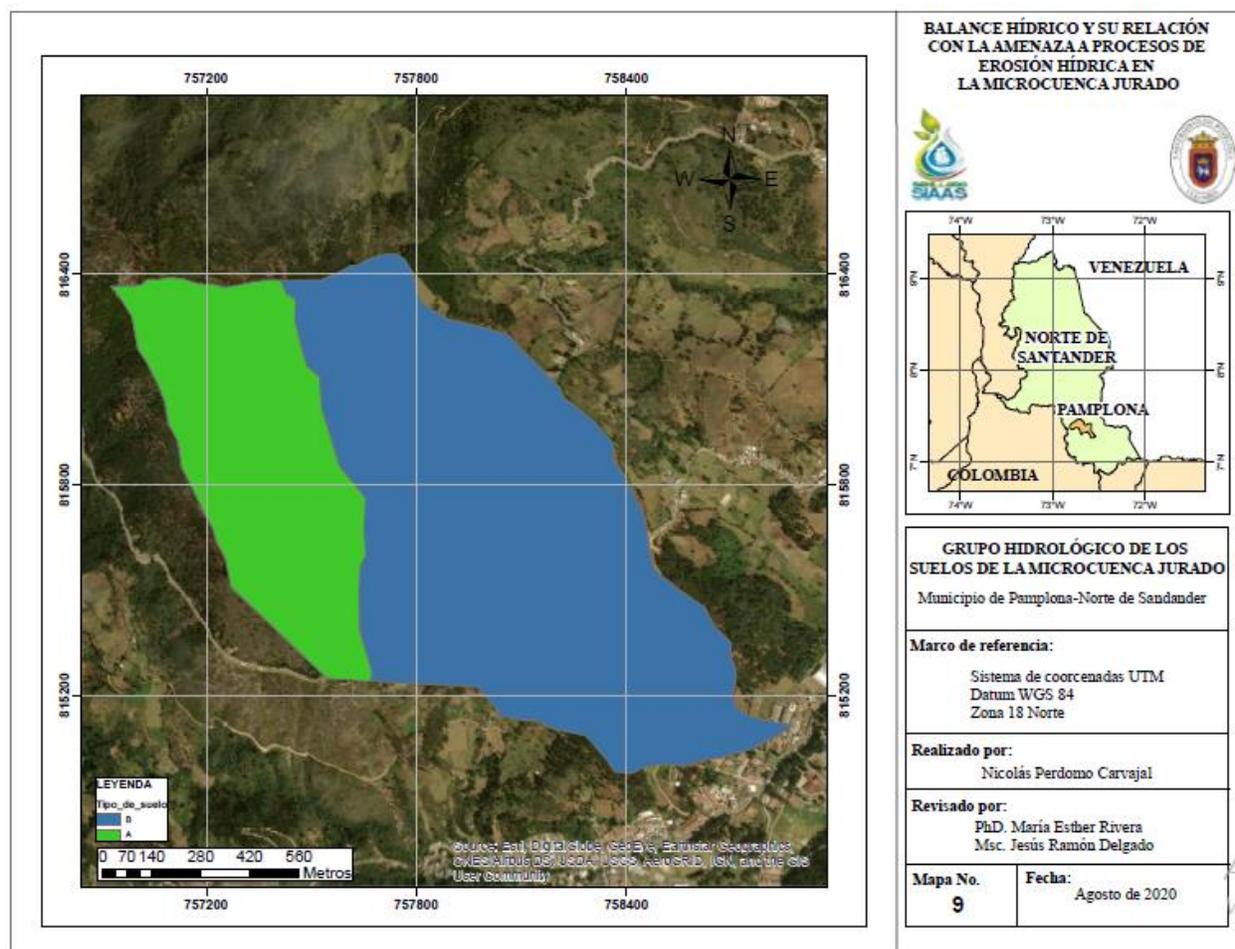
Figura 33. Clasificación física del suelo proporcionada por el IGAC

Fuente: Elaborado por Perdomo (2020), a partir de la información del IGAC

En su mapa de usos de suelo de Norte de Santander.

El IGAC caracteriza físicamente a la zona de estudio en dos unidades de suelo. La

primera, en la parte alta de la microcuenca, evidencia suelos moderadamente profundos, bien drenados, de textura franco arenoso o franca, con índices de fertilidad natural baja. Asimismo en la segunda, evidencia suelos moderadamente profundos y superficiales, bien drenados, textura franco arcillo arenosa, franco arcillosa y arcillosa, con índices variables en su fertilidad natural, registrando datos bajos y altos.



*Figura 34. Grupo hidrológico del suelo en la microcuenca Jurado*

Fuente: Elaborado por Perdomo (2020), a partir de la información del IGAC, en el software ArcGis 10.4 de la Universidad de Pamplona.

De acuerdo con Chevesich (2015), el grupo hidrológico del suelo está dado por las

características físicas del mismo; es decir, la permeabilidad y distribución de partículas en el suelo definen la condición hidrológica que pueda tener éste.

En este sentido, teniendo como base la información suministrada por el IGAC, y además de ello, ensayos de granulometría de muestras tomadas en la parte baja, media y alta de la microcuenca, el suelo del área de estudio se puede catalogar como suelos A y B, dada su distribución granulométrica para cada muestra tomada en la zona de estudio (figura 35), (figura 36), (figura 37), y la descripción física que proporciona el IGAC.

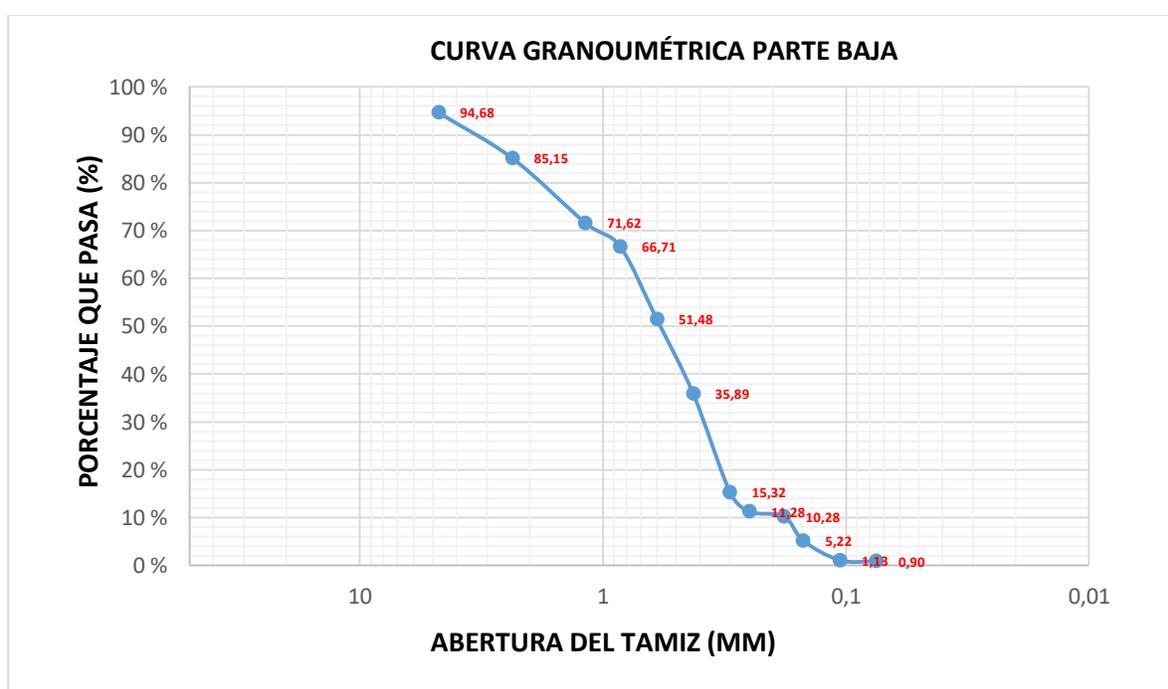


Figura 35. Curva granulométrica muestra de la parte baja de la microcuenca Jurado

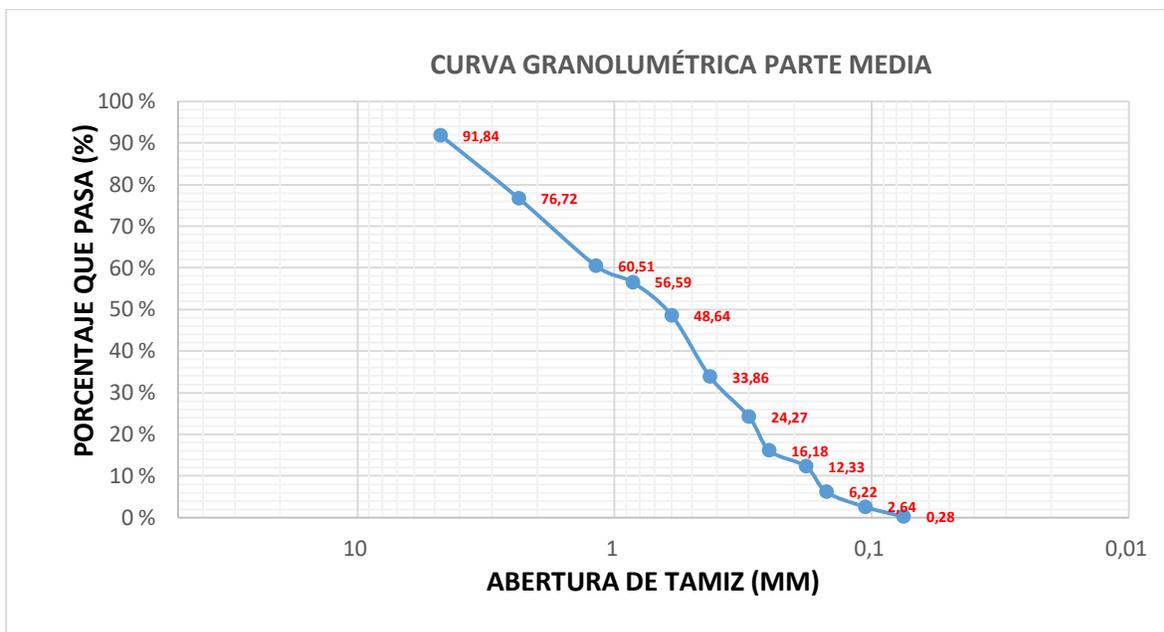


Figura 36. Curva granulométrica muestra de la parte media de la microcuenca Jurado

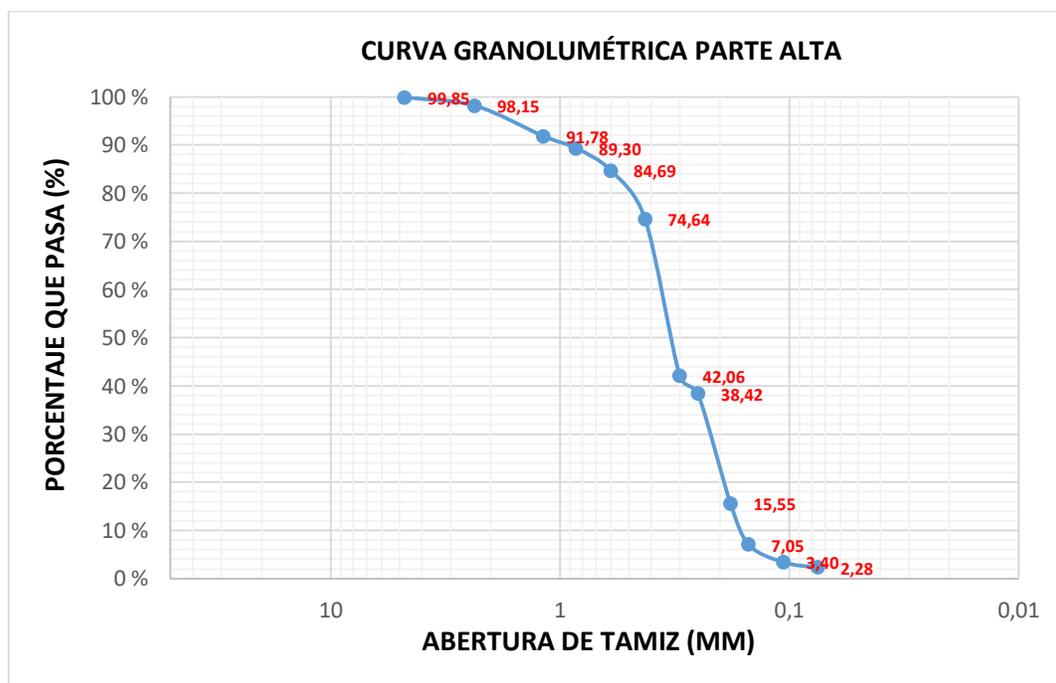
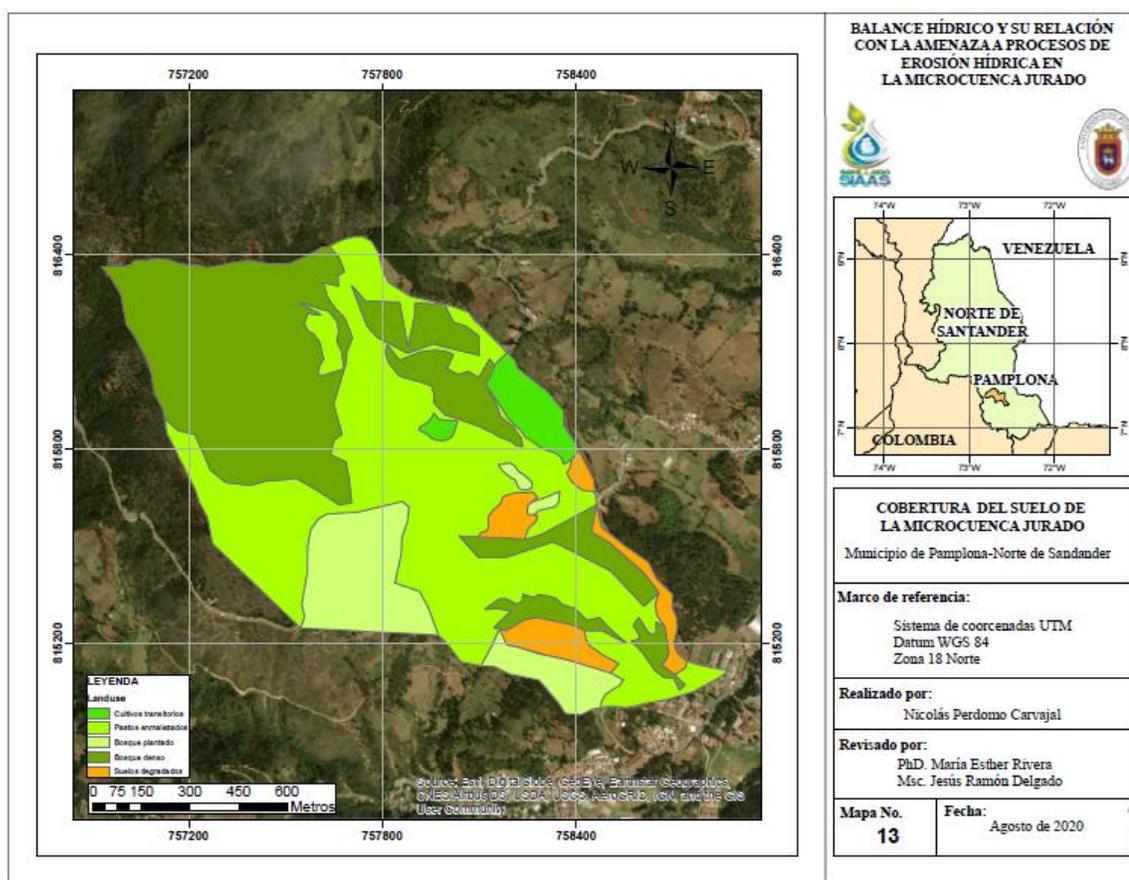


Figura 37. Curva granulométrica muestra parte alta de la microcuenca Jurado

Con base a los ensayos de granulometría realizados en el año 2018 en la Universidad de Pamplona, se puede decir que la mejor gradación de partículas de suelo la posee la curva granulométrica para la muestra tomada en la parte media de la microcuenca Jurado; esto indica,

un mayor contenido de partículas finas (arcillas), que podrían disminuir la permeabilidad del suelo. Por ende, el suelo para esa zona es catalogado como suelo tipo B, a diferencia del suelo tipo A, donde se tienen partículas de mayor tamaño como arenas y así mismo una mayor permeabilidad.

La cobertura vegetal del suelo en la microcuenca Jurado (figura 38), identifica los tipos de coberturas presentes en el área de estudio, lo cual, es un valor importante para obtener el valor del número de curva para la zona.



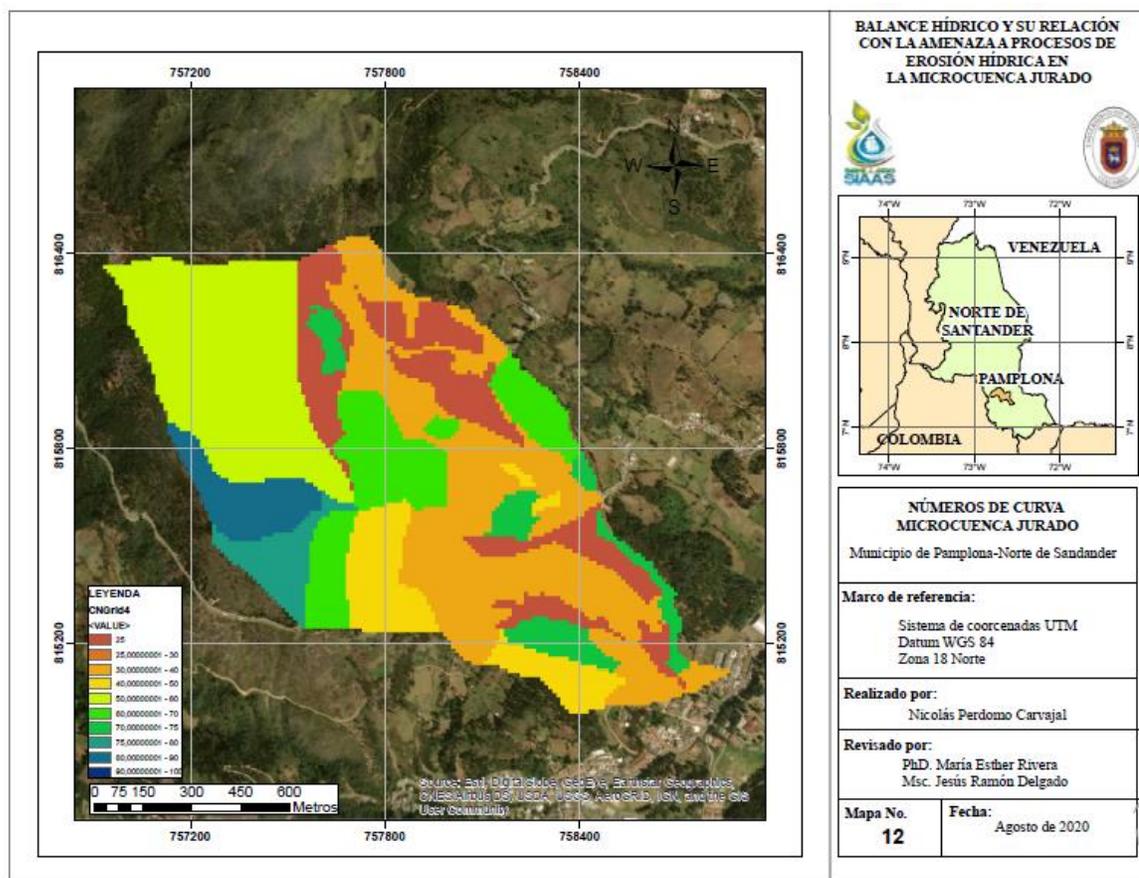
*Figura 38. Cobertura vegetal de la microcuenca Jurado*

Fuente: Elaborado por Perdomo (2020) a partir de la información del satélite Alos Palsar, en el software ArcGis Versión 10.4 de la Universidad de Pamplona.

Cabe señalar, que en la zona de la microcuenca Jurado, se evidencia la presencia de

Bosque denso en la parte alta y baja de la microcuenca; como también, hay presencia de pastizales, suelos degradados y zonas de cultivos transitorios.

Por último, se estableció el mapa de número de curva para la microcuenca Jurado (figura 39); teniendo en cuenta la relación entre la cobertura vegetal, uso, grupo hidrológico y condiciones de humedad antecedente del suelo.



*Figura 39. Mapa de número de Curva para la microcuenca Jurado*

Fuente: Elaborado por Perdomo (2020) a partir de la información del satélite Alos Palsar, en el software ArcGis Versión 10.4 de la Universidad de Pamplona.

De acuerdo a las áreas de cada sub zona con número de curva propio, se obtiene un número de curva general para la microcuenca Jurado, el cual es 52,8. Éste número de curva

indica una permeabilidad media para el área de drenaje de la microcuenca Jurado; es decir, una escorrentía superficial con valores medios.

Según las condiciones de humedad antecedentes para la zona de estudio, donde se presentes precipitaciones a lo largo del año, se opta por unas condiciones de humedad tipo 3; por ello, el número de curva total aplicando la ecuación 4, citada en el apartado 4.3.1 es 72,01.

Ahora bien, teniendo el número de curva se obtiene el número factor de retención superficial del suelo para la microcuenca Jurado, aplicando la ecuación 5, citada en el apartado 4.3. De esta manera, se obtiene un valor de 108,80. Por último, se estima el valor de escorrentía superficial  $Q$ , aplicando la ecuación 6, citada en el apartado 4.3.1. De esta manera la escorrentía superficial anual para la microcuenca Jurado es 292,41 mm/año, que en caudal equivale a  $0.01298 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

### **6.3 Determinación de la oferta y demanda hídrica en la microcuenca Jurado.**

El anterior resultado sobre caudal promedio para el año 2019, corresponde al valor de oferta hídrica para el presente objetivo. Adicionalmente, según la resolución 0865 de 2004, es pertinente aplicar dos factores de reducción de caudal. Por un lado, se tiene el factor de reducción de calidad de aguas; para el cual, según los laboratorios realizados por estudiantes de la materia de hidrología en semestres anteriores, se opta por un 25%. Por otra parte, para la reducción de caudal oferta por caudal ecológico, se opta por otro 25%. Es por ello, donde se tiene para la microcuenca Jurado, un caudal oferta de  $0.00649 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

Teniendo en cuenta que la investigación también se ha realizado en lo corrido del presente año (2020), el IDEAM suministra los datos de precipitación para el año 2020 hasta el mes de octubre. De esta manera, en la figura 40, se muestra los datos de precipitación efectiva para el año 2020.

	Precipit.	Prec. efec
	mm	mm
<b>Enero</b>	0.6	0.6
<b>Febrero</b>	0.5	0.5
<b>Marzo</b>	1.5	1.5
<b>Abril</b>	0.1	0.1
<b>Mayo</b>	0.6	0.6
<b>Junio</b>	3.3	3.3
<b>Julio</b>	1.8	1.8
<b>Agosto</b>	3.0	2.9
<b>Septiembre</b>	4.0	4.0
<b>Octubre</b>	3.3	3.3
<b>Noviembre</b>	0.0	0.0
<b>Diciembre</b>	0.0	0.0
<b>Total</b>	<b>18.6</b>	<b>18.5</b>

Figura 40. Precipitación efectiva año 2020 de la microcuenca Jurado

Fuente: Perdomo (2020), en el software Cropwat 8.0

En preciso indicar, que con la idea de obtener una precipitación efectiva anual para el año 2020, se inserta una precipitación nula (0), para los meses de noviembre y diciembre; dado que el IDEAM suministra información hasta el mes de octubre.

En ese mismo sentido, se estima una oferta hídrica para el presente año teniendo el número de curva ya calculado, el factor de retención superficial y la precipitación efectiva. De este modo, para el periodo que comprende los meses del año 2020, se estima una oferta hídrica de  $0,00047 \text{ m}^3/\text{seg}$ , lo que equivale a  $0,47 \text{ Lt}/\text{seg}$ ; ahora bien, aplicando los factores de reducción por caudal ecológico y calidad de agua que para el año 2019 fueron 25%, respectivamente. Para el presente año (2020), la microcuenca Jurado tiene una oferta hídrica de  $0,000235 \text{ m}^3/\text{seg}$  o  $0,235 \text{ Lt}/\text{seg}$ .

Por otra parte, para la demanda hídrica se tiene en cuenta los 3 sectores analizados en el

presente estudio, los cuales son el sector agrícola, pecuario y doméstico.

Se hace la aclaración que para el presente estudio, dadas las circunstancias de la emergencia sanitaria que vive el mundo por la pandemia del Covid-19, que imposibilitó visitas de campo frecuentes para el presente año, se optó por mencionar los valores de demanda hídrica estimados en el año 2018, en el proyecto “Requerimiento hídrico en la microcuenca Jurado”, realizados por los autores Perdomo y otros (2018).

Teniendo en cuenta lo anterior, el valor de demanda hídrica para el sector agrícola es de 6420 Lt/día; donde se incluye cultivos como Uchuva, Fresa, Maíz (figura 41) y tomate de árbol (figura 42)



*Figura 41. Cultivos de Maíz en la microcuenca Jurado*

Fuente: Perdomo (2018)



*Figura 42. Cultivo de tomate de árbol en la microcuenca Jurado*

Fuente: Perdomo (2018)

Por otra parte, para el sector pecuario, se tiene un estimado de 4035.3 Lt/día; donde se tiene registro de animales como caballos, vacas, perros, gatos, gallinas y patos.

Entretanto, realizadas algunas visitas de campo en el presente año, se registra para el sector doméstico un total de 32 personas que habitan la zona de la microcuenca Jurado. Así mismo, se registra una captación para la cárcel de pamplona (figura 17), la cual es en tubo de 3” y se realiza la captación para el aseo de baños en las instalaciones de la cárcel. De ésta manera, para el sector doméstico se tiene un estimado de demanda hídrica de 8640 Lt/día.

Por último, en el cálculo del balance hídrico se obtiene la evapotranspiración de referencia (figura 43).

The screenshot shows the 'ETo Penman-Monteith Mensual - untitled' window. The input fields are: País: Colombia, Estación: ISER Pamplona, Altitud: 2340 m., Latitud: 7.00 °N, and Longitud: 72.00 °E. Below these is a table with 8 columns: Mes, Temp Min (°C), Temp Max (°C), Humedad (%), Viento (km/día), Insolación (horas), Rad (MJ/m²/día), and ETo (mm/día). The table contains data for each month from January to December, with a final row for the average (Promedio).

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Viento km/día	Insolación horas	Rad MJ/m²/día	ETo mm/día
Enero	5.2	19.0	92	240	3.5	13.4	2.26
Febrero	4.8	17.5	88	192	3.7	14.4	2.38
Marzo	6.8	20.4	89	288	3.9	15.4	2.71
Abril	8.6	18.9	79	360	3.2	14.4	2.91
Mayo	8.8	21.5	84	144	3.9	15.0	2.82
Junio	10.2	22.3	83	288	3.8	14.5	3.01
Julio	8.6	20.8	75	264	4.0	14.9	3.22
Agosto	8.4	19.4	72	312	3.9	15.2	3.28
Septiembre	9.3	20.2	77	192	3.1	14.1	2.88
Octubre	10.2	19.7	83	168	3.5	14.2	2.71
Noviembre	6.7	18.5	92	192	3.9	14.0	2.33
Diciembre	5.9	17.9	95	132	3.8	13.5	2.13
Promedio	7.8	19.7	84	231	3.7	14.4	2.72

Figura 43. Evapotranspiración de referencia en la microcuenca Jurado

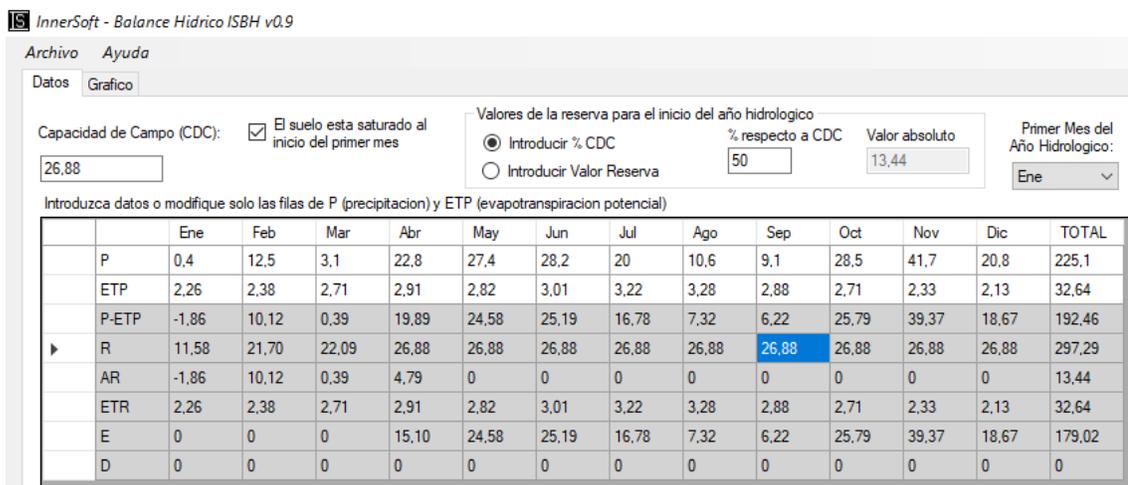
Fuente: Perdomo (2020), en el software Cropwat 8.0

Así mismo, también se obtiene la radiación solar que según el IDEAM (2014): “es la energía emitida por el sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas”.

Es preciso indicar, que la evapotranspiración como lo indica la FAO en su “Estudio de riego, drenaje y guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos”, es una variable compleja a la hora de estimar por separado, dadas las condiciones en las que se presenta la evaporación en los estomas de las plantas. Además, la FAO es enfática en afirmar que tanto la transpiración como la evaporación directa dependen del aporte de energía del sol; asimismo, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por ende, se realiza el cálculo de la evapotranspiración teniendo en cuenta estas variables hidrometeorológicas.

Ahora bien, con la evapotranspiración obtenida anteriormente, la capacidad de campo y

las precipitaciones media mensual para el periodo 2019, se realiza el cálculo del balance hídrico (figura 44).



*Figura 44. Balance hídrico en la microcuenca Jurado*

Fuente: Elaborado por Perdomo 2020, a partir del software ISBH V. 0.9 de la compañía Innersoft.

La capacidad de campo, obtenida a partir de ensayos de humedad e infiltración realizados en laboratorio y campo es de 26,88 %. Además, es preciso indicar con base a visitas de campo realizadas a la zona de estudio en el mes de enero del presente año, que el suelo presentaba saturación dadas las precipitaciones presentadas en el lugar.

Por otra parte, de acuerdo a los resultados obtenidos en el balance hídrico, el déficit hídrico que se presenta en la zona de la microcuenca Jurado es nulo. No obstante, se hace la aclaración que ésta variable es relativa, dadas las condiciones hidrometeorológicas que se presentan en un periodo de tiempo determinado. Es decir, sería posible un déficit alto si la evapotranspiración sujeta a condiciones meteorológicas fuera superior a las precipitaciones.

En este mismo contexto, en la tabla 5 se muestran los valores del Índice de humedad (Ih), Índice de Aridez (Ia), Índice de humedad de Thornthwaite (Im), clasificación climática de

Tornthwaite y subdivisión climática de Tornthwaite.

Tabla 5. Clasificación Tornthwaite

DESCRIPCIÓN	VALOR
Clasificación climática de Tornthwaite	A
Subdivisión climática de Tornthwaite	s
Índice de humedad (Ih)	548,46
Índice de Aridez (Ia)	0
Índice de humedad de Tornthwaite (Im)	548,46

Fuente: Perdomo 2020

De acuerdo con Ruiz y otros (2012), la clasificación climática de Tornthwaite tipo A, define un tipo de clima como Per húmedo, dadas las condiciones de humedad en la zona de estudio donde el índice de humedad de Tornthwaite es superior a 100%.

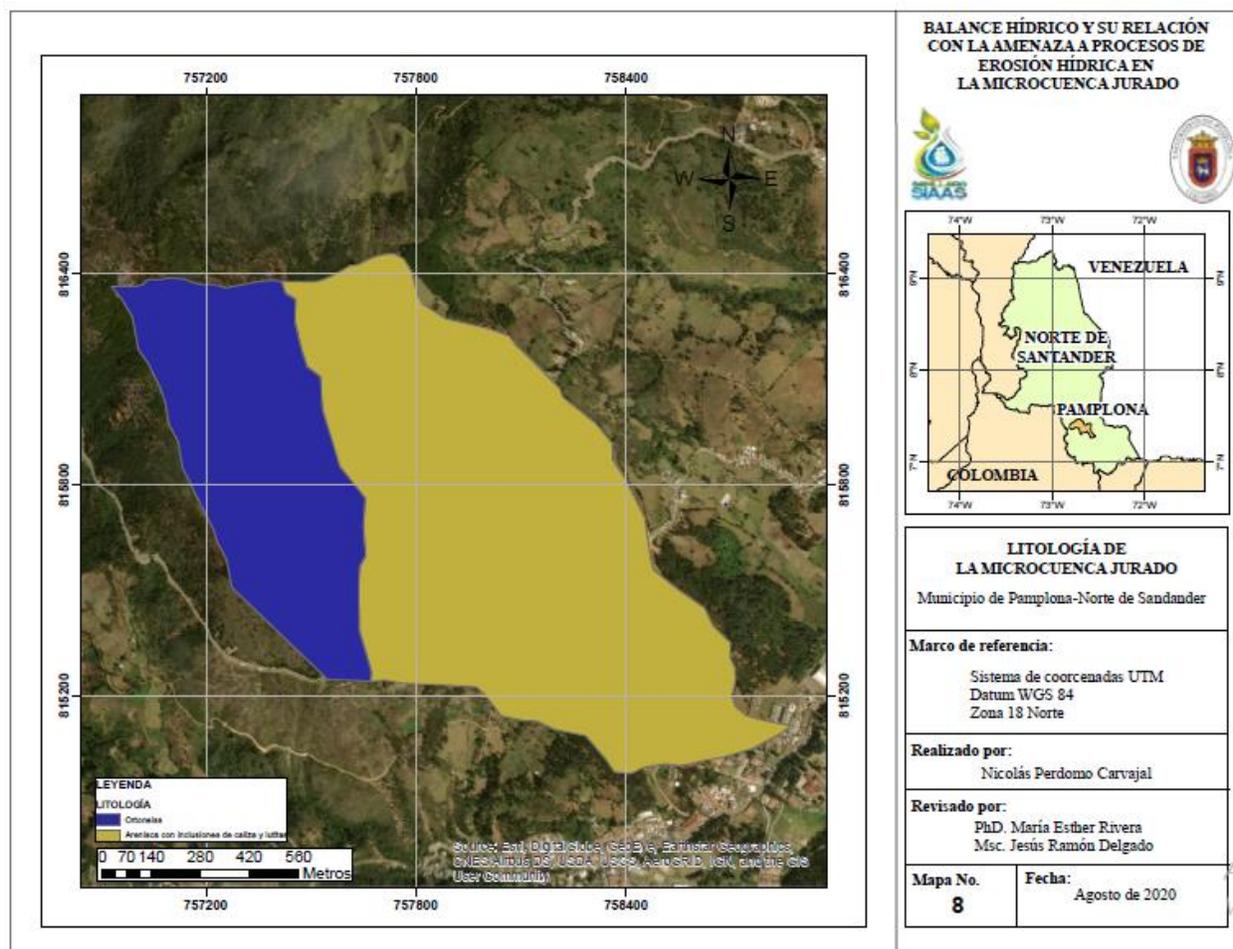
#### **6.4 Obtención de la relación precipitación-escorrentía en la microcuenca Jurado.**

Con base a las pruebas de infiltración realizadas en campo, y los registros de precipitaciones para el año 2019, por parte de la estación ISER PAMPLONA; además de tener el estimado de la escorrentía superficial en la zona de la microcuenca Jurado, se estima la relación de la precipitación-escorrentía en la zona de estudio. De ésta manera, el estimado de precipitación para el año 2019 de la microcuenca Jurado es de 225.1 mm/año; así mismo, el valor de escorrentía superficial calculado previamente es de 292,41 mm/año.

#### **6.5 Análisis de la amenaza a procesos de erosión hídrica en la microcuenca Jurado.**

De acuerdo con la metodología USLE implementada por la FAO y Chevesich (2015), además de las características físicas del suelo, es imprescindible una caracterización litológica y

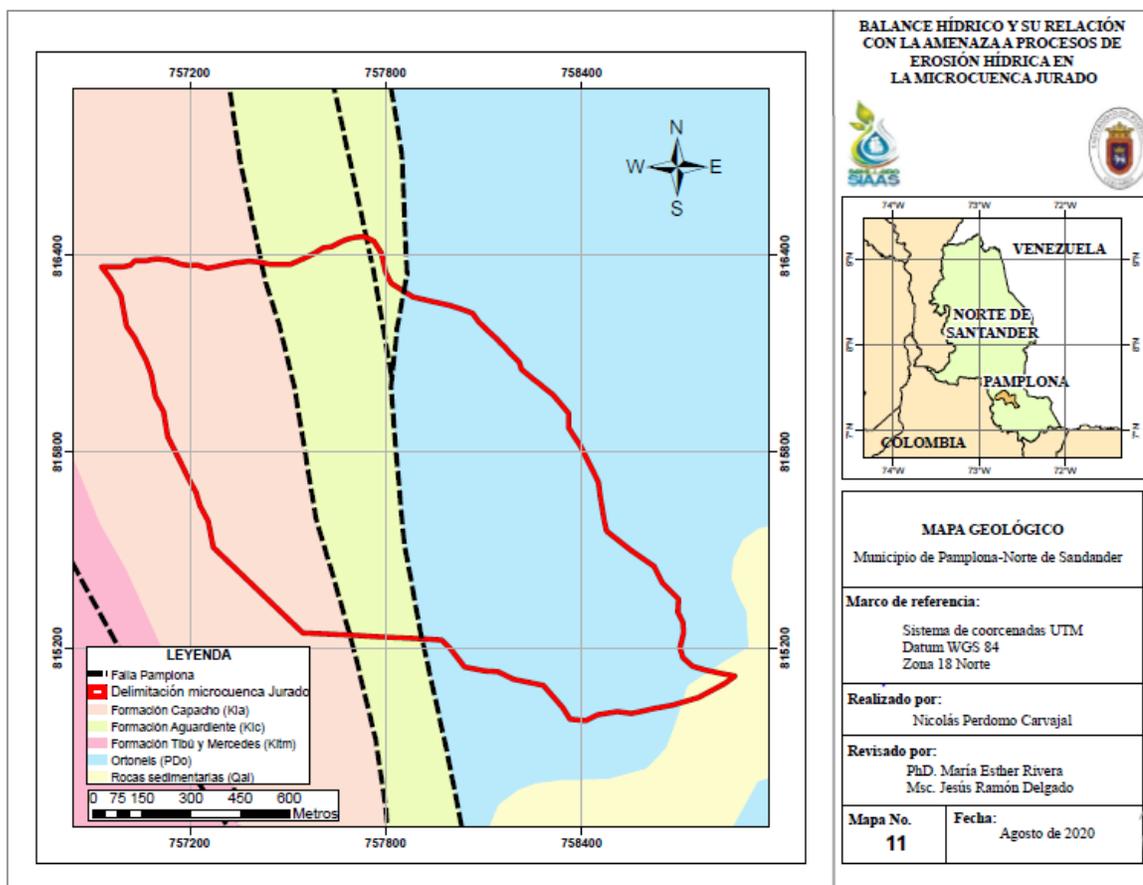
geológica de la zona de estudio. Por ende, en la figura 45 se evidencia una caracterización litológica del área de la microcuenca Jurado; asimismo, en la figura 46 se muestra una caracterización geológica de la zona de la microcuenca Jurado.



*Figura 45. Litología de la microcuenca Jurado*

Fuente: Elaborado por Perdomo (2020) a partir de la información del satélite Alos Palsar, en el software ArcGis Versión 10.4 de la Universidad de Pamplona.

Teniendo en cuenta la apreciación que realiza el IGAC en su mapa de usos del suelo para el departamento de Norte de Santander, en la zona de la microcuenca Jurado específicamente en su parte alta, se tienen rocas de tipo Ortogneis; además en su parte baja se tienen areniscas con intercalaciones de caliza y lutitas.



*Figura 46. Geología de la microcuenca Jurado*

Fuente: Elaborado por Perdomo (2020) a partir de la información del Servicio Geológico Colombiano, en el software ArcGis Versión 10.4 de la Universidad de Pamplona.

Por otra parte, y teniendo en cuenta el mapa geológico de Colombia suministrado por el Servicio Geológico Colombiano, la zona de la microcuenca Jurado presenta formación Capacho (Kia), formación Aguardiente (Kic), formación Tibú y Mercedes (Kitm), formación Ortonéis (PDo), y algunas formaciones de rocas sedimentarias (figura 44). Además, la falla geológica de Pamplona, la cual atraviesa la parte alta-media de la zona de la microcuenca Jurado y se muestra en el mapa por medio de una línea negra punteada.

En concordancia con lo anterior, y siguiendo la metodología USLE puesta en práctica en

el libro “Control de la erosión y recuperación de suelos degradados” del autor Chevesich (2015), es importante analizar cada uno de los factores que intervienen en el proceso de la erosión. De esta manera, de acuerdo a los resultados obtenidos en el software ArcGis versión 10.4 de la Universidad de Pamplona, se obtiene un estimado de erosión anual, por hectárea en un tiempo de un año, con base en las precipitaciones registradas en la estación ISER Pamplona, Cécota, Mutiscua y Pamplonita.

En éste orden de ideas, el primer factor de la metodología USLE es el factor de erosividad (R) (figura 47).

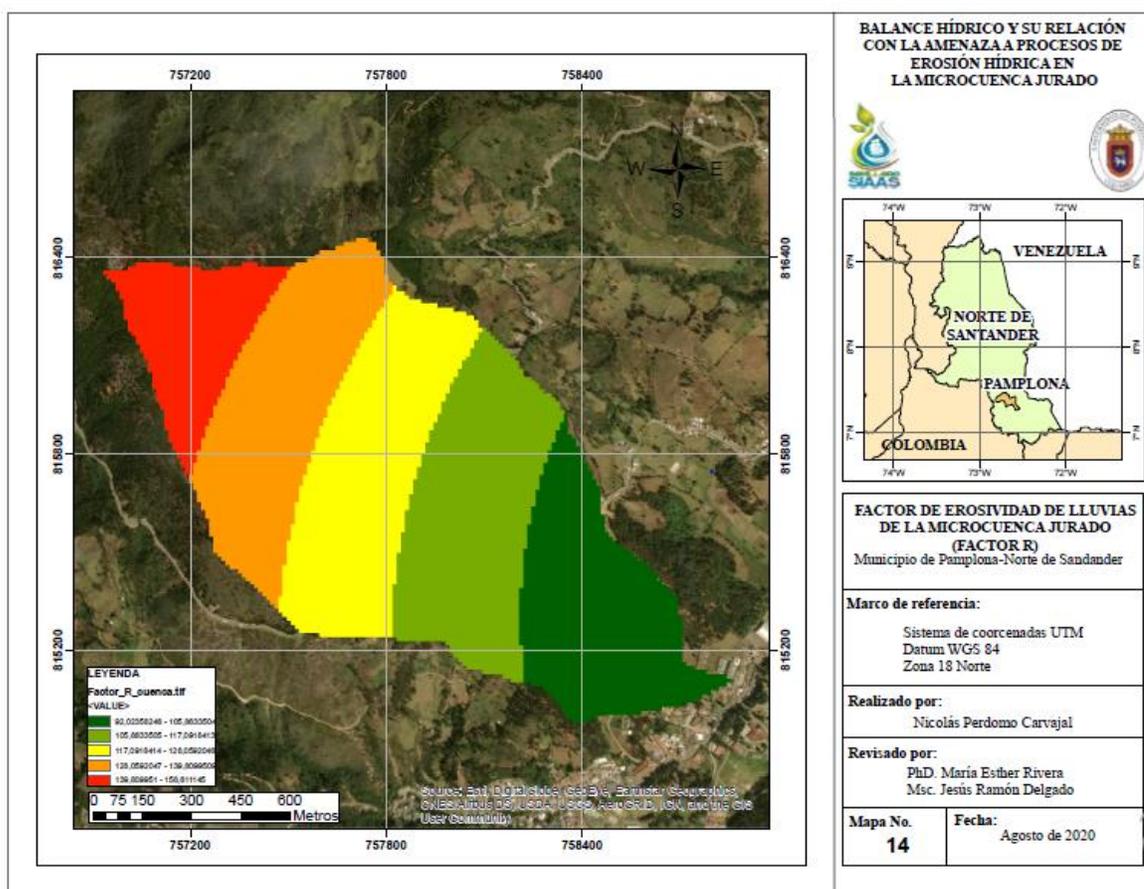


Figura 47. Factor R de la microcuenca Jurado

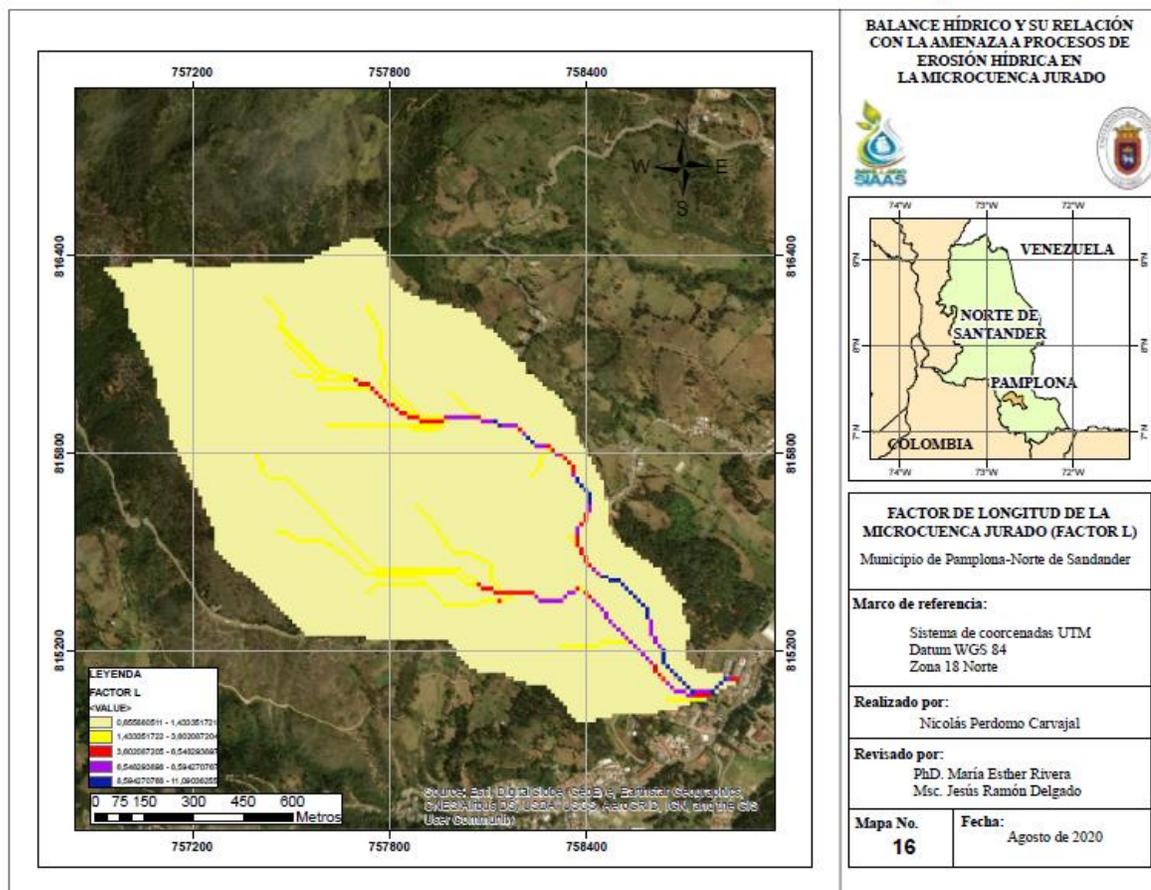
Fuente: Elaborado por Perdomo (2020) a partir de la información del satélite Alos Palsar, en el software ArcGis Versión 10.4 de la Universidad de Pamplona.



Teniendo en cuenta la figura 48, dadas las características físicas del suelo, la región de color azul y verde oscuro presenta mayor susceptibilidad del suelo a la erosión. Justificando esto, los criterios de Chevesich (2015) manifiestan un mayor grado de susceptibilidad a la erosión en los suelos arenosos, dada su poca cohesividad entre partículas. Por ende, la energía cinética propiciada por las lluvias tiene mayor impacto en este tipo de suelos.

Ahora bien, los factores topográficos juegan un papel importante en los índices de erosión. Por ende, en la figura 49 se muestra el factor longitud (L) para la microcuenca Jurado; así mismo, en la figura 50 se muestra el factor pendiente (S) para la zona de estudio. Finalmente, la combinación de los dos resultados proporciona el factor longitud-pendiente (LS), para el área de la microcuenca Jurado (figura 51).

En este mismo contexto, el coeficiente orográfico para la microcuenca Jurado es de 4.66, lo cual quiere decir que el terreno de la zona de estudio es poco accidentado; así mismo, el coeficiente de masividad para la microcuenca Jurado es de 0,00176, lo cual indica según el Instituto Nacional de Ecología (2004), citado en López (2016), que la microcuenca Jurado es catalogada por ser moderadamente montañosa.



*Figura 49. Factor L de la microcuenca Jurado*

Fuente: Elaborado por Perdomo (2020) a partir de la información del satélite Alos Palsar, en el software ArcGis Versión 10.4 de la Universidad de Pamplona.

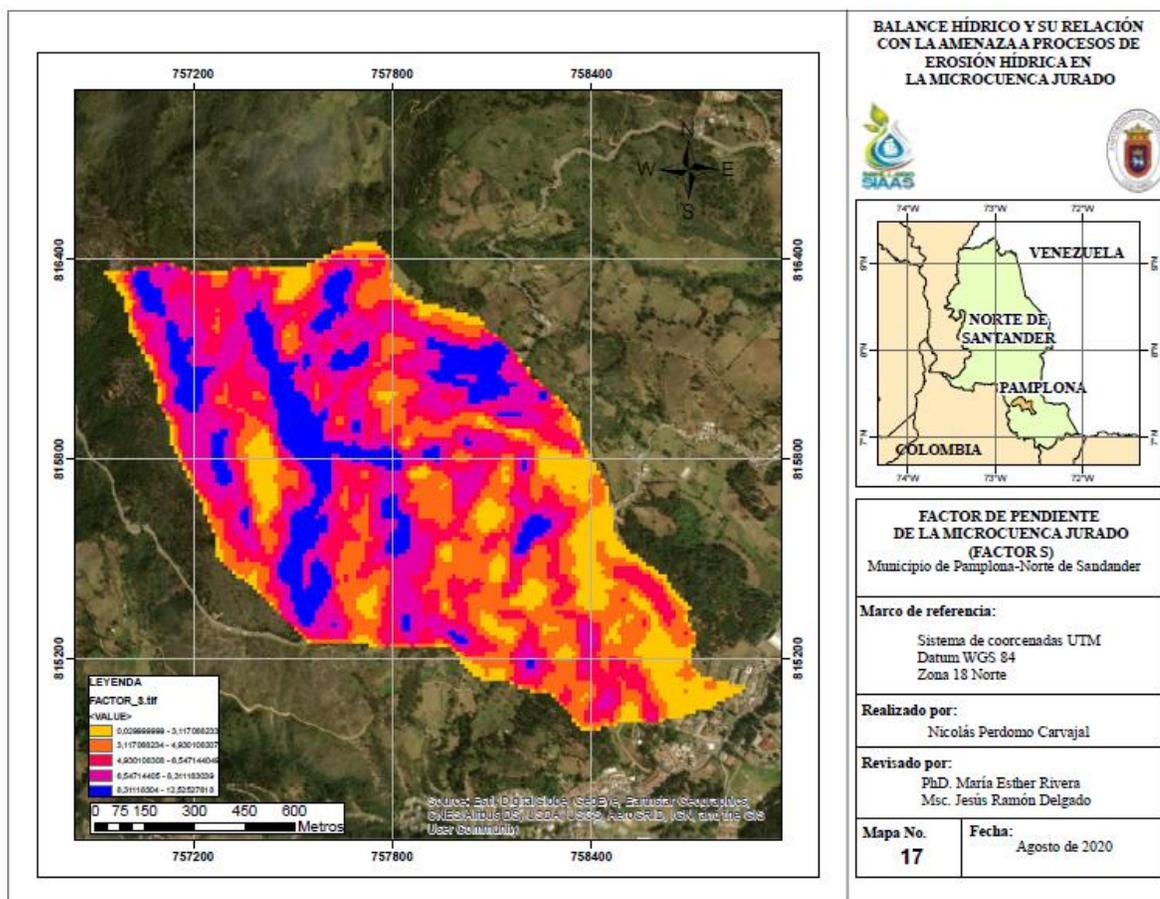


Figura 50. Factor S de la microcuenca Jurado

Fuente: Elaborado por Perdomo (2020) a partir de la información del satélite Alos Palsar, en el software ArcGis Versión 10.4 de la Universidad de Pamplona.

En la figura 48, se observa una topografía escarpada para la zona de estudio. Por ende, en el mapa del Factor S para la microcuenca Jurado, se manifiesta el índice de erosividad que conllevan la diferencia de cotas en la parte alta y media del área de estudio.



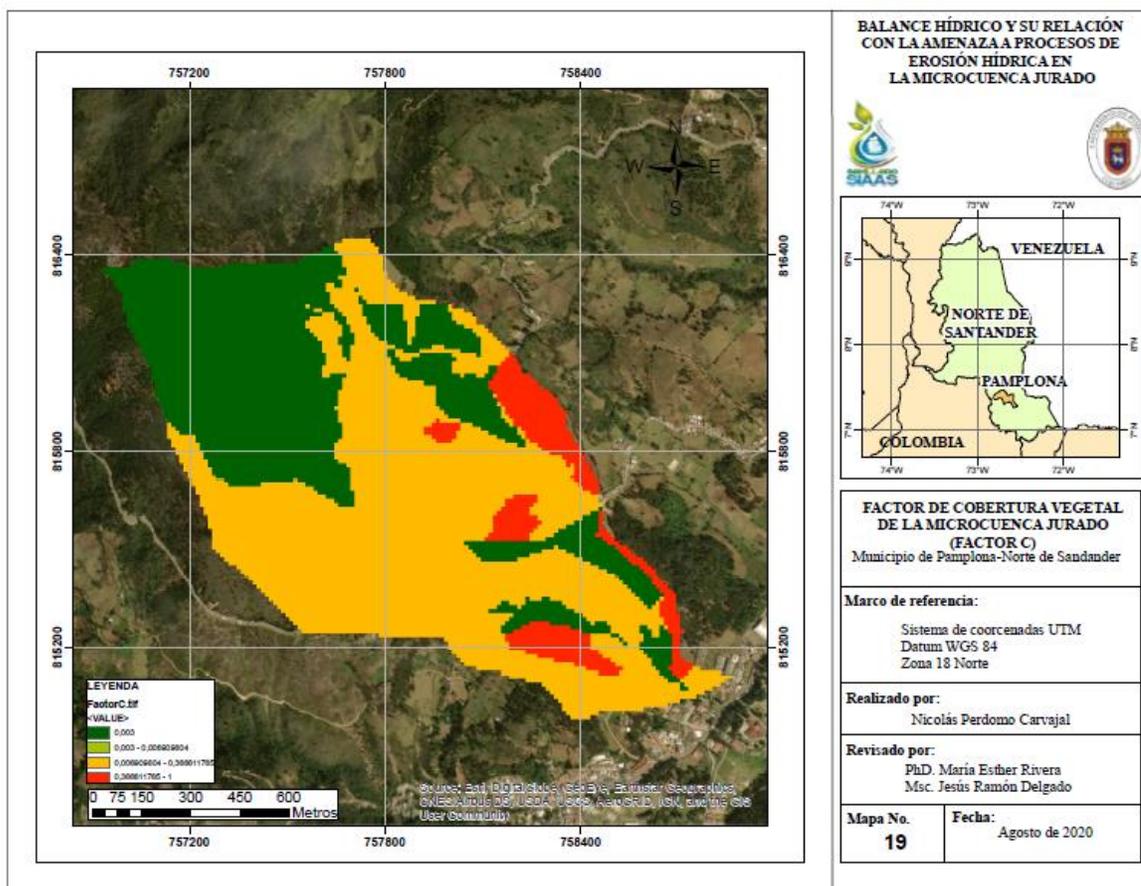


Figura 52. Factor C de la microcuenca Jurado

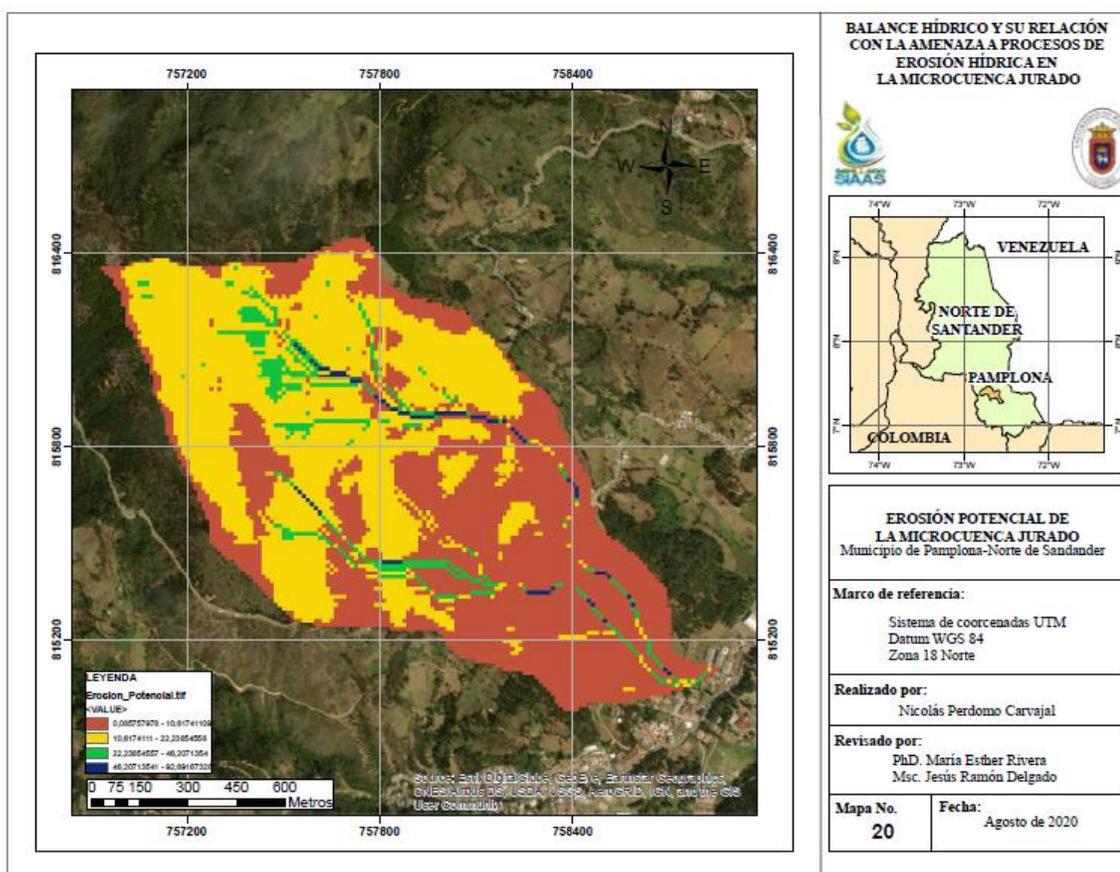
Fuente: Elaborado por Perdomo (2020) a partir de la información del satélite Alos Palsar, en el software ArcGis Versión 10.4 de la Universidad de Pamplona.

Los bosques densos que hacen presencia en la parte alta y baja de la microcuenca Jurado, se evidencian en el mapa del Factor C de la metodología USLE; así mismo, los valores críticos de color rojo en donde no se presenta cobertura o la misma en muy limitada, en algunas visitas de campo se observaron calvas de erosión.

Finalmente, dentro de los factores de la metodología USLE se tiene el factor de conservación de suelos (P), y dada las apreciaciones que se tienen en campo, éste factor se toma

como valor dado que no existen prácticas de conservación del suelo, teniendo en cuenta algunos cultivos que se presentan en la zona de la microcuenca Jurado.

Por último se obtienen los valores de erosión potencial (figura 53) y erosión total (figura (54).

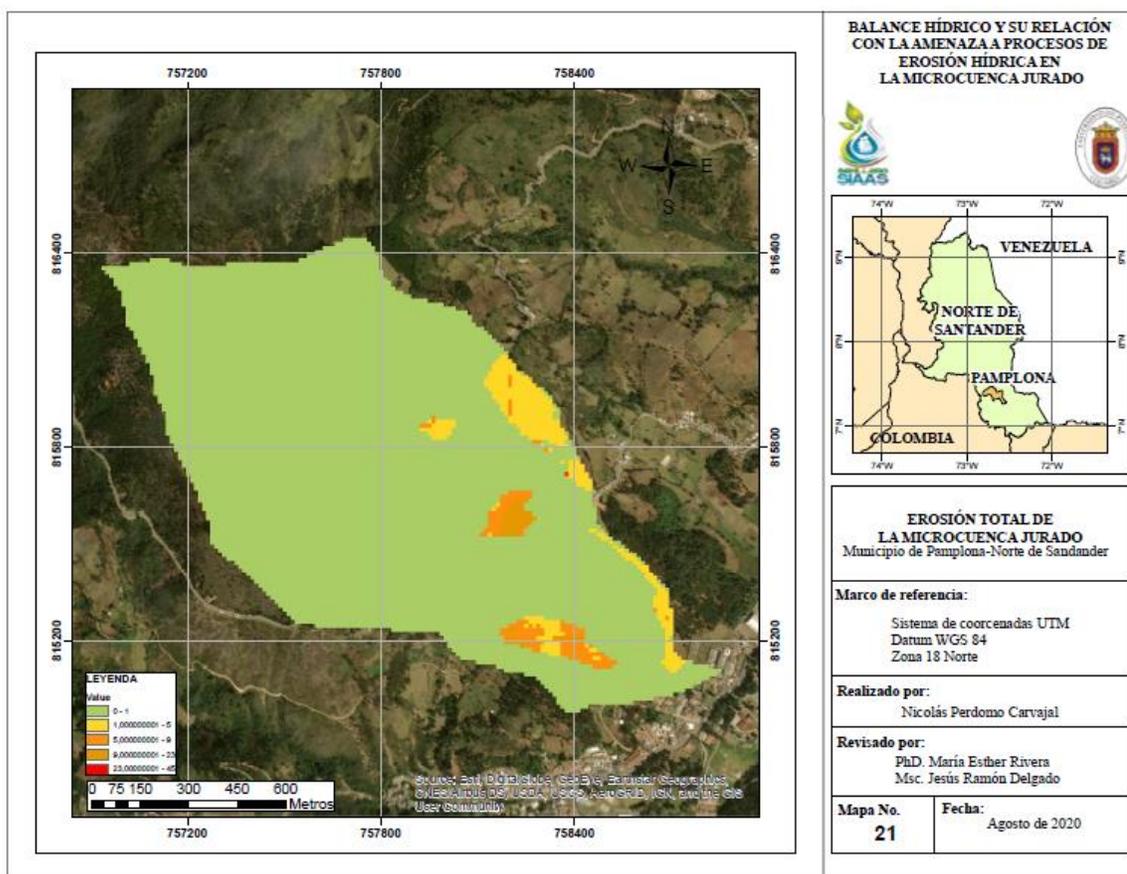


*Figura 53. Erosión potencial de la microcuenca Jurado*

Fuente: Elaborado por Perdomo (2020) a partir de la información del satélite Alos Palsar, en el software ArcGis Versión 10.4 de la Universidad de Pamplona.

Se distingue la erosión potencial y la erosión total de una zona en estudio, dado que el factor de cobertura vegetal ofrece una importante protección al suelo ante agentes externos causantes del fenómeno de la erosión. De esta manera, sin tener en cuenta la cobertura vegetal

del suelo (Factor C), es preciso indicar que la microcuenca Jurado presenta una tasa de erosión considerable que va desde leve a catastrófica en algunas zonas, teniendo como valores en toneladas/hectárea/año.



*Figura 54. Erosión total de la microcuenca Jurado*

Fuente: Elaborado por Perdomo (2020) a partir de la información del satélite Alos Palsar, en el software ArcGis Versión 10.4 de la Universidad de Pamplona.

En este mismo contexto, se realiza el mapa de erosión total de la microcuenca Jurado, para lo cual se tiene en cuenta el factor de cobertura vegetal del suelo.

Notablemente, las tasas de erosión hídrica en la microcuenca Jurado disminuyen con la

cobertura vegetal del suelo en la zona de estudio; obteniendo tasas de erosión catastrófica muy bajas en algunos puntos. Así mismo, es importante señalar que las calvas de erosión evidenciadas en el mapa de erosión total en la microcuenca Jurado, se aprecian también en campo.

De acuerdo al planteamiento que realiza Chevesich (2015), cuantificando los niveles de erosión en una zona de estudio en Tonelada/hectárea/año, para la zona de la microcuenca Jurado se tiene una erosión total de 0 a 1 ton/hec/año para un área de 137,39 hectáreas; así mismo, una erosión total de 1 a 5 ton/hec/año para un área de 6,79 hectáreas; también, una erosión de 5 a 9 ton/hec/año para un área de 3,77 hectáreas ; además, una erosión total de 9 a 23 ton/hec/año para un área de 0,082 hectáreas; y finalmente una erosión total de 23 a 45 ton/hec/año, para un área de 0,045 hectáreas.

Finalmente, dentro del contexto de amenaza por erosión hídrica en la microcuenca Jurado, se tienen dos detonantes como lo son la precipitación y la sismicidad.

En ese sentido, las precipitaciones como lo indica Chevesich (2015) pueden ocasionar erosión desde el inicio, duración y finalización de las mismas. Esto se manifiesta a través de la energía cinética de las gotas de lluvia que golpean la superficie ocasionando erosión hídrica de tipo laminar; además, la escorrentía producida por la precipitación puede ocasionar erosión hídrica de tipo surco o cárcava.

Por otra parte, Solano (2017) en su tesis sobre el análisis de los procesos erosivos en las vertientes de la microcuenca Hato Viejo en el municipio de Chitagá, define la sismicidad como una liberación de energía ocasionada por la dinámica de placas tectónicas, además de los movimientos de la superficie terrestre que se dan producto de la interacción de fallas geológicas. De esta manera, la microcuenca Jurado no está exenta de éstos movimientos en su superficie, dado que por su parte alta atraviesa la falla geológica de Pamplona, como lo indica el presente

documento en su mapa geológico.

Así mismo, según el reporte semestral del Servicio Geológico Colombiano para el primer semestre del año 2020 y el año 2019, se registraron datos de sismos en el municipio de Pamplona, los cuales se detallan en la tabla 6.

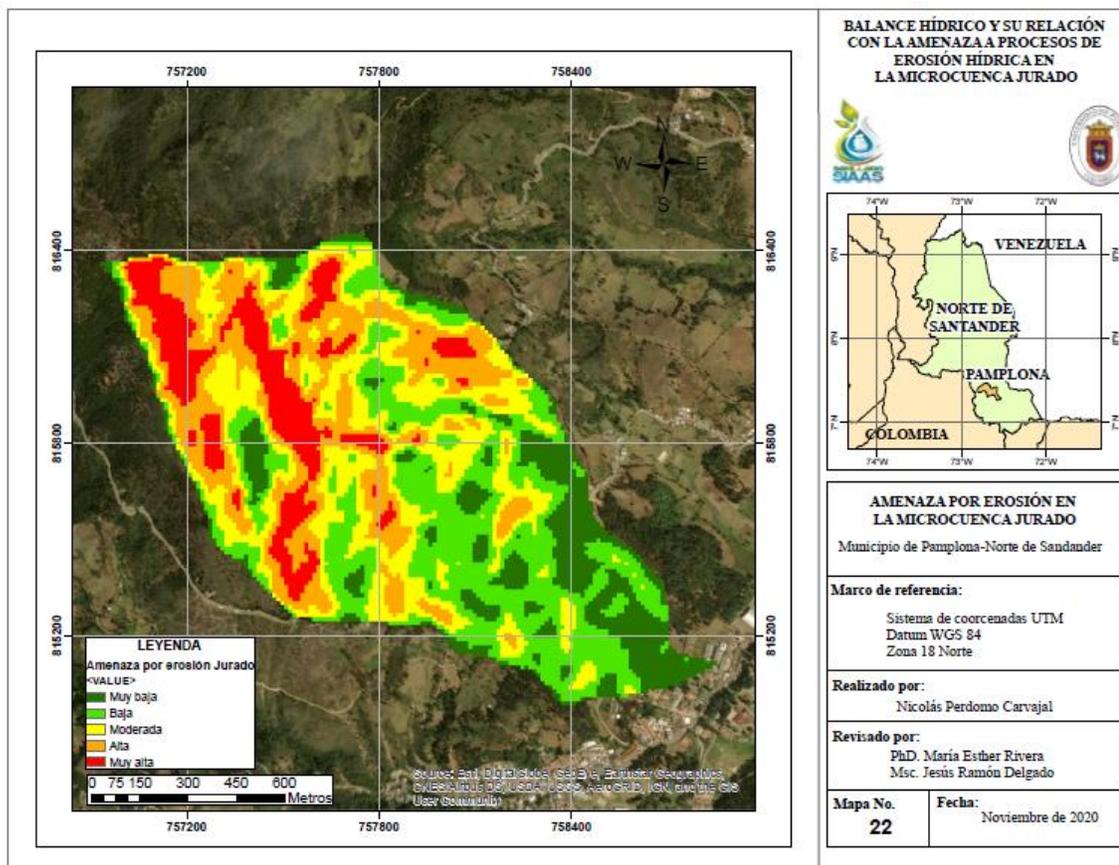
Tabla 6. Sismos registrados en Pamplona-Norte de Santander periodo 2019-1, 2019-2 y 2020-1

N	FECHA	H:M:S	LAT	LON	Z	M	UBICACIÓN
1335	2020/01/13	09:05:53	7,435	-72,67	0,0	1,4	Pamplona- N.S
6723	2020/03/19	21:17:10	7,328	-72,677	150	1,9	Pamplona- N.S
10024	2020/04/27	02:16:57	7,4	-72,697	1	1,5	Pamplona- N.S
3396	2019/08/26	11:05:58	7,374	-72,665	2	3,0	Pamplona- N.S
7786	2019/04/03	19:30:38	7,351	-72,701	1	2,1	Pamplona- N.S

Fuente: Perdomo 2020

En la figura 55, se observa la amenaza por erosión hídrica que se produce en la microcuena Jurado. De ésta manera, es preciso indicar, que la amenaza por erosión muy alta se presenta en la parte alta de la zona de estudio; dado que por ahí atraviesa la falla de Pamplona y por ende se podrían presentar sismos; además, se presenta una topografía con pendientes bastante pronunciadas. Adicionalmente, la intensidad en las precipitaciones como lo muestra el mapa de

factor de erosividad de lluvias en el presente documento es alta para la parte alta de la microcuenca Jurado.



*Figura 55. Amenaza por procesos de erosión hídrica.*

Fuente: Perdomo (2020), a partir de la información del satélite Alos Palsar, mediante el software Arcgis versión 10.4 de la Universidad de Pamplona.

Por otra parte, la amenaza a procesos de erosión hídrica en la microcuenca Jurado también se manifiesta en su parte media para algunos sectores. Esto dado a la bastante intervención antrópica que se presenta en el área, con la implementación de cultivos transitorios y quemas de bosque para la extensión ganadera.

## Conclusiones

Intervenciones antrópicas de consideración en la zona de la microcuenca Jurado han modificado la cobertura vegetal del suelo, proporcionando susceptibilidad al suelo ante agentes externos causantes de erosión. Así mismo, la pérdida de cobertura e instalación de bosque no nativo en el área de estudio, ha causado problemas en el abastecimiento de agua en temporadas de estiaje; ocasionando de éste modo, pérdida en la productividad agrícola y ganadera que hace parte de la economía de los pobladores de la zona. No obstante, en la zona de la microcuenca Jurado es interesante observar algunos nacimientos de agua que afloran a la superficie principalmente en la parte alta.

Para la zona de la microcuenca Jurado realizando el análisis de las precipitaciones para el año 2019, la zona de estudio cuenta con un caudal de escurrimiento de  $0,01298 \text{ m}^3/\text{seg}$ ; ahora bien, realizando los descuentos por caudal ecológico que equivale a un 25% y un 25% por calidad del agua, la microcuenca Jurado tiene un caudal de escurrimiento de  $0,00649 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

Por otra parte, las demandas del recurso hídrico en la zona de la microcuenca Jurado tienen los valores más altos en el sector doméstico, el cual tiene una demanda de  $8640 \text{ Lt}/\text{seg}$ , le sigue el sector agrícola con una demanda del recurso hídrico de  $6420 \text{ Lt}/\text{seg}$ , y por último el sector pecuario con una demanda de  $4035,3 \text{ Lt}/\text{seg}$ .

Cabe señalar, que la microcuenca Jurado se caracteriza por tener una topografía con pendientes abruptas; además, según la curva hipsométrica, la microcuenca Jurado se encuentra en un periodo de transición madura. De ésta manera, se puede dar la posibilidad de presentarse avenidas torrenciales como la ocurrida en el periodo 2010-2011, dadas las fuertes lluvias que se precipitaron en la zona de estudio.

Fundamentalmente, la microcuenca Jurado gracias a la cobertura vegetal que aún

conserva en sus partes altas y bajas, se caracteriza por mantener niveles bajos de amenaza a procesos erosión hídrica. No obstante, la erosión potencial hace presencia en algunos sectores de la microcuenca Jurado, específicamente en la zona de la parte media donde ha sido intervenida por el sector agrícola y la construcción de vías terciarias.

Por último, haciendo mención a la relación existente entre el balance hídrico y la amenaza a procesos de erosión hídrica en la microcuenca Jurado; el factor precipitación produce un escurrimiento superficial de 292,41 mm/año; así mismo, la metodología USLE que en sus criterios para la estimación de la erosión hídrica tiene en cuenta la precipitación como agente externo causante de la erosión hídrica, de acuerdo a la figura 42 éste tiene valores altos en la parte de la zona de estudio, produciendo de éste modo mayores índices de erosión. Al mismo tiempo, las pendientes de la microcuenca Jurado modifican el flujo del cauce, que esto a su vez propicia una mayor velocidad de flujo que podría desencadenar amenazas de erosión hídrica. Finalmente, la cobertura superficial del suelo fundamental para el cálculo del número de curva, que en la microcuenca Jurado tiene un valor de 72,01, aumenta el escurrimiento superficial disminuyendo la infiltración. En ese mismo sentido, el tipo y cantidad de cobertura vegetal para la microcuenca Jurado, disminuye la erosión total para la zona de estudio, dadas las coberturas que se aprecian en la figura 47.

## Recomendaciones

Para el presente estudio, dadas las adversidades que se presentaron por la emergencia sanitaria que vive el mundo a causa de la pandemia del Covid-19, hubo limitaciones realizar visitas frecuentes a campo para la recolección de datos y muestras. Sin embargo, haciendo uso de los Sistemas de Información Geográficos, fue posible implementar una metodología distinta para analizar la escorrentía superficial en la zona de estudio; además, realizar la medición de la erosión hídrica. No obstante, en un posible estudio a futuro en la zona, se recomienda para la parte de erosión hídrica implementar las metodologías propuestas por Pablo Chevesich mediante la ubicación de trampas de erosión en la zona de estudio; realizando de ésta manera la medición de la erosión directamente desde campo.

Por otra parte, a los pobladores de la zona de la microcuenca Jurado y entidades que les corresponde el cuidado y conservación del medio ambiente, se les hace un llamado para garantizar el uso adecuado del recurso hídrico, dadas las condiciones de racionamiento que se dan en los prolongados periodos de estiaje; cómo también, limitar la expansión del sector agrícola en zonas donde abunda el bosque denso. De ésta manera, se estaría evitando la deforestación y por ende minimizando la amenaza a procesos de erosión hídrica en la microcuenca Jurado.

## Referencias

Allende, T. C., & Mendoza, M. E. (2007). *Análisis hidrometeorológico de las estaciones de la cuenca del lago de Cuitzeo* *Hydrometeorological analysis of Cuitzeo Lake watershed, (8701)*, 56–76.

Becerra (2015). *Estudio del régimen pluviométrico de una cuenca empleando funciones ortogonales*.

Bocel (2016). *Modelación hidrológica para evaluar los niveles de erosión hídrica y producción de sedimentos en diferentes usos y coberturas de la tierra y su efecto en la calidad del agua en la subcuenca del río San Francisco, cuenca del lago de Atitlán, Guatemala*.

Chevesich (2015). *Control de la erosión y recuperación de suelos degradados*. Denver. *Outskirts Press, 2015*.

Chuvieco (1995). *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid, España, 1995.

Cocuyame y Salazar (2015). *Clasificación y zonificación de la susceptibilidad a erosión hídrica en la cuenca del río guabas con apoyo de herramientas geomáticas*.

Gutiérrez y Parrales (2017). *Caracterización geomorfológica y geomecánica de la microcuenca de la quebrada el guamal Ibagué-Tolima*.

IDEAM (2014). *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. *Radiación solar*. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar-ultravioleta>.

López (2016). *Estudio morfométrico y cálculo de caudal de creciente en la hacienda pozo rubio por método racional entre caño venado y caño el pescado*.

Lozano (2011). *Estimación de caudales ecológicos mediante métodos hidrológicos e hidráulicos en la UMC río Quindío*.

Penagos-Cruz, G. (2014). *Variables hidrometeorológicas asociadas al cambio climático*

*en Girardot y la Región del Alto Magdalena \* Hydrometeorological Variables Associated to Climate Change in Girardot and the Region Variables hydrométéorologiques associées au changement climatique à Girardot et la Région. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.AyD18-35.vhac>.*

Perdomo, Mendoza, Vargas, Pérez, Gonzales, Rivera (2018). *Estudio del requerimiento hídrico en la microcuenca Jurado, Pamplona-Norte de Santander. Ponencia en el Congreso Internacional de Medio Ambiente y Desarrollo, La Habana-Cuba 2019.*

Resolución 865 Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2004), “*Por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones*”.

Ríos (2018). *Erosión hídrica y evolución del relieve en las cuencas de los ríos Grande y San Andrés, Antioquia – Colombia.*

Ríos y otros (2012). *Balace hídrico y clasificación climática del estado de tabasco, México.*

Ruiz (2015). *Estimación de la erosión hídrica a través de modelación mediante un sig, en la zona cañera de la vertiente del pacífico de Guatemala.*

Santacruz De león (2011). *Estimación de la erosión hídrica y su relación con el uso de suelo en la cuenca del río Caohuacán, Chiapas-México.*

Sarasty (2015). *Estudios de amenazas por erosión y procesos de remoción en masa en los predios kinde y kuskungo para el reasentamiento de la población afectada pertenecientes al resguardo inga de aponte, municipio del tablón de Gómez, Nariño.*

Servicio Geológico Colombiano (SGC, 1946). *Mapa geológico de Norte de Santander.*  
<https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=19660>.

SIAC (2015). Sistema de Información Ambiental de Colombia. *Oferta y demanda hídrica*. <http://www.siac.gov.co/web/siac/ofertaagua>.

Solano (2017). *Análisis de los procesos erosivos en las vertientes de la microcuenca hatoviejo municipio de Chitagá*.

Zúñiga (2017). *Determinación de la pérdida de suelos en la cuenca aportante del embalse aguada blanca-arequipa, aplicando usle y técnicas geoespaciales*.