

**Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Forestal**

**Proyecto final de graduación para optar por el grado de Licenciatura en
Ingeniería Forestal.**

**Caracterización de fuentes de contaminación y estrategia de manejo
ambiental de la microcuenca del río Jaboncillal, San José, Costa Rica.**

Presentado por

Denia Brenes Chacón

Profesora Guía

MSc. Ing. Diana Zambrano Piamba

Cartago, Costa Rica.

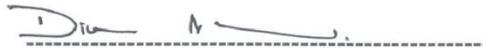
2015

Constancia de Aprobación

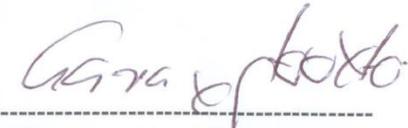
Caracterización de fuentes de contaminación y estrategia de manejo ambiental de la microcuenca del río Jaboncillal, San José, Costa Rica.

Proyecto final de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal.

Tribunal Evaluador



MSc. Ing. Diana Zambrano Piamba
Tutora de Proyecto



MSc. Ing. Ney Ríos Ramírez



Ing. Sergio Feoli Boraschi

Resumen

La microcuenca del río Jaboncillal, se ubica en la provincia de San José en el cantón de Goicoechea, mide aproximadamente 669.15 hectáreas, es un efluente del río Torres comprende parte de los pueblos de Rancho Redondo, Isla, Jaboncillal y Vista de Mar. Es un área de importancia hídrica ya que cuenta con agua subterránea por infiltración y una alta vulnerabilidad de acuíferos (Feoli 2013).

Es una microcuenca de interés para la Compañía Nacional de Fuerza y Luz por las altas tasas de sedimentación, el poco manejo de las aguas residuales y el crecimiento urbano en los últimos años, el cual ha contribuido a la contaminación por fuentes puntuales, las cuales aportan cargas de un 90% en DQO, 99% en DBO₅ y 81% en SST, respecto a fuentes por actividades ganaderas.

En términos de sedimentos, la productividad ganadera es la que ejerce una fuerte presión sobre los recursos naturales, provocando la degradación de la cuenca, especialmente de la cubierta vegetal que se traduce en la erosión de los suelos, la disminución de su fertilidad y el arrastre de sólidos hacia los cursos de agua, produciendo aproximadamente 2434.42 t/año y son arrastrados por el río 54991.92 kg/día de sedimentos en un periodo de 17 años comprendido entre 1983-1999, siendo uno de los principales contaminantes del río Jaboncillal, originados de fuentes difusas.

Para estimar la producción de sedimentos, conocer las zonas de mayor producción y la incidencia de las fuentes difusas, se realizó la modelación de la cuenca durante el periodo 1980-1999 mediante el programa SWAT, a partir de información hidrológica, topográfica, edafológica, de cobertura del suelo y climatológica, apoyada en herramientas de sistemas de información geográfica.

Palabras clave: Contaminación puntual, contaminación difusa, Jaboncillal, usos del suelo, microcuenca, SWAT, Costa Rica.

Dedicatoria

A mi familia que siempre fue el pilar fundamental a lo largo de mi carrera!!

Agradecimientos

A la MSc Ing. Diana Zambrano Piamba, por la fundamental labor como guía en cada paso durante el desarrollo de mi proyecto, por la paciencia que siempre mantuvo y por el apoyo que me brindó.

Al MSc. Ing. Ney Ríos Ramírez por guiarme durante el desarrollo de la modelación SWAT y por la disponibilidad de ayuda que siempre mostró en cada una de las dificultades que me surgieron.

Al Ing. Sergio Feoli por el apoyo con logística por parte de la CNFL para realizar el trabajo de campo y por la información brindada.

A la Ing, Jessica León Fallas por la ayuda brinda en situaciones varias durante el proyecto.

A Sophia Ruiz Vásquez por el apoyo durante el desarrollo de los análisis fisicoquímicos.

A Víctor Martínez Albán por el apoyo en el trabajo de campo.

Y a cada persona que de una u otra manera colaboró para poder finalizar con éxito este trabajo.

A todos Gracias!

Contenido

Resumen	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Índice de Tablas	vii
Índice de Figuras	viii
1. Introducción	10
2. Planteamiento del Problema	12
3. Objetivos.....	13
3.1 Objetivo General	13
3.2 Objetivos Específicos	13
4. Marco Teórico.....	14
4.1 Cuenca Hidrográfica.....	14
4.2 Contaminación ambiental	14
4.2.1 Contaminación Difusa	15
4.2.2 Contaminación Puntual	17
4.2.3 Agua Residual	17
4.2.4 Marco Normativo.....	18
4.3 Sistemas de Información Geográfica (SIG)	20
4.4 Modelo SWAT	21
5. Metodología.....	24
5.1 Área de estudio	24
5.2 Determinación de las zonas de uso del suelo.....	25
5.3 Caracterización de las fuentes de contaminación puntual y difusa	25
5.3.1 Determinación de la contaminación puntual	25
5.3.2 Determinación de la contaminación difusa	26
5.4 Formulación de una estrategia de manejo sostenible en el sector Forestal para mitigar las fuentes de contaminación identificadas.....	35

6.	Presentación y análisis de resultados	37
6.1	Categorías de uso del suelo	37
6.2	Zonas con fuentes de contaminación puntual y difusa.....	39
6.2.1	Caracterización de la contaminación puntual	39
6.2.2	Caracterización de la contaminación difusa	48
6.3	Estrategia de manejo para la microcuenca del río Jaboncillal.....	58
6.3.1	En contaminación puntual.....	59
6.3.2	En contaminación difusa	63
7.	Conclusiones	66
8.	Recomendaciones	68
9.	Referencias	69
	Anexos	75
	Anexo 1	75

Índice de Tablas

Tabla 1 - Fuentes, origen y problemática ambiental de algunos generadores de la contaminación difusa	15
Tabla 2 - Límites Máximos permisibles de tres parámetros seleccionados, para aguas residuales domésticas y por actividad ganadera.....	20
Tabla 3 - Estaciones de precipitación utilizadas.....	27
Tabla 4 - Estación de temperatura.....	27
Tabla 5 - Parámetros climáticos obtenidos en la MacroWGN	28
Tabla 6 - Coberturas utilizadas y codificación requerida por SWAT para la microcuenca del río Jaboncillal, San José, Costa Rica	29
Tabla 7 - Variables de entrada requeridas por SWAT para el análisis de suelo en la microcuenca del río Jaboncillal, San José, Costa Rica	30
Tabla 8 - DQO y SST como parámetros complementarios para la determinación de la calidad de los cuerpos de aguas superficiales para las cinco clases establecidas en el reglamento N° 33903-MINAE.....	46
Tabla 9 - Uso potencial y tratamiento requerido para la clasificación de los cuerpos de agua en la clase tres.....	47
Tabla 10 - HRU con aportes mayores a 50 ton/ha.	48
Tabla 11 - Área (ha) según la categoría de uso para cada subcuenca.	49
Tabla 12 - Usos del suelo por cada subcuenca definida por SWAT	50
Tabla 13 - Propuesta para la Estrategia de manejo ambiental en la microcuenca del río Jaboncillal.....	58
Tabla 14 - Prioridad de los puntos muestreados según la carga contaminante sobre el río Jaboncillal, evaluada con el indicador DQO Y SST.....	60
Tabla 15 - Prioridad de los puntos muestreados según la carga contaminante sobre el río Jaboncillal, evaluada con el indicador DBO ₅	60
Tabla 16 - Priorización en términos de aporte de sedimentos para cada sub-área de la cuenca del río Jaboncillal entre el año 1983 a 1999.....	63
Tabla 17 - Características de las HRU que aportan mayor cantidad (ton/ha) de sedimentos en la microcuenca de río Jaboncillal.	63

Índice de Figuras

Figura 1 - Proceso del ciclo hidrológico utilizado por SWAT	22
Figura 2 - Ubicación de la microcuenca del río Jaboncillal, San José, Costa Rica, 2014. Fuente: Atlas Digital 2014.....	25
Figura 3 – Determi.nación del rango de pendientes para la microcuenca del río Jaboncillal por medio de la herramienta slope.....	32
Figura 4 - Diagrama del proceso de Modelación con SWAT.....	35
Figura 5 - Clasificación del suelo según su categoría de uso en la microcuenca del río Jaboncillal, San José, Costa Rica.....	37
Figura 6 - Porcentaje del área ocupada según la categoría de uso en la microcuenca del río Jaboncillal, San José, Costa Rica.....	38
Figura 7 - Localización de los vertimientos puntuales y sitios de monitoreo sobre el río Jaboncillal, San José, Costa Rica.....	40
Figura 8 - Calidad de agua de los vertimientos puntuales sobre el río Jaboncillal evaluada con tres Indicadores DQO, DBO5 y SST	41
Figura 9 - Evaluación de la calidad de agua en los vertimientos puntuales de agua residual doméstica según los límites máximos permisibles para los parámetros DQO, DBO5 y SST	42
Figura 10 - Evaluación de la calidad de agua en los vertimientos puntuales por uso en actividades agropecuarias según los límites máximos permisibles para los parámetros DQO, DBO5 y SST.....	43
Figura 11 - Localización de los puntos de Monitoreo sobre el río Jaboncillal	44
Figura 12 - Concentración de los tres parámetros evaluados en los puntos de monitoreo sobre el río Jaboncillal	45
Figura 13 - Localización y área de cada subcuenca simulada por SWAT	50
Figura 14 - Comportamiento del caudal (m3/s) según la distribución de los meses de cada uno de los años del periodo 1983-1999	51
Figura 15 - Cantidad de sedimentos (Ton/ha) producidos por año, según el uso del suelo en la microcuenca del río Jaboncillal para el periodo 1983-1999.....	52
Figura 16 - Cantidad de sedimentos (Ton/ha) y la precipitación (mm)	54
Figura 17 - Total de sedimentos aportados por subcuenca y el total para toda la microcuenca en el periodo 1983-1999.....	55
Figura 18 - Cantidad de sedimentos (Ton/ha) en cada subcuenca, según el uso del suelo en la microcuenca del río Jaboncillal para el periodo 1983-1999.....	55

Figura 19 - Kilogramos de N y P en el río Jaboncillal aportado al río Torres en el periodo 1983-1999	57
Figura 20 - Carga total de DQO (Kg/día) según el tipo de agua residual	61
Figura 21 - Carga total puntual de SST (Kg/día) según el tipo de agua residual	61
Figura 22 - Carga total puntual de DBO5 (Kg/día) según el tipo de agua residual	62
Figura 23 - Localización de las áreas propuestas a reforestar producto de las HRU según la simulación SWAT.....	65

1. Introducción

El planeta cuenta con 35,2 millones de kilómetros cúbicos de agua, pero el agua dulce disponible representa únicamente el 2,5 % del total. La creciente escasez y el estrés hídrico que vive el planeta tiene su origen en los impactos de la actividad humana como la deforestación, el aumento en las zonas de cultivo, la industrialización, el crecimiento urbano, el cambio climático y la contaminación (Dobles 2008).

Costa Rica, al igual que otros países, está en un transcurso de cambio en su reforma de su marco jurídico e institucional, dando continuidad a procesos ya iniciados en años anteriores y actualizándolos para que socialmente sean aceptados y orientados al desarrollo sostenible, permitiendo transitar hacia una gestión adecuada de los recursos (Jouravlev y Solanes 2006).

El concepto de gestión integrada de recursos hídricos se traslada a todas las fases de su aprovechamiento, desde la planificación hasta la concepción de la infraestructura hidráulica, la administración del agua, la conservación de su calidad y la protección del recurso (Dobles 2008).

Actualmente, las cuencas hidrográficas han sido deforestadas y el cambio de uso de la tierra ha generado un impacto en la calidad de la escorrentía, elevando las cantidades de sedimentos en suspensión, aumentando la contaminación como la concentración de agroquímicos, aguas negras y otros vertidos dentro de los caudales (Jiménez, Calvo, Pizarro, Jiménez y González 2008).

Los aportes de contaminación puntuales o difusas en Costa Rica van desde sedimentos, aguas negras, desechos industriales y agropecuarios, agroquímicos y desechos sólidos, producidos por el aumento poblacional, el crecimiento urbanístico e industrial, así como la intensificación de las actividades agrícolas y pecuarias que generan un aumento de la contaminación ambiental y con frecuencia, grandes cantidad de desechos que se descargan contaminan a los cuerpos de agua superficiales (Segura, 2013). Según Spiegel y Maystre (2012) se han adoptado medidas de manejo ambiental para minimizar los efectos negativos y garantizar normas de calidad ambiental.

Castaño (2010), mencionó que el manejo ambiental desde el sector forestal, revierte los procesos de deforestación y degradación de áreas con alto valor de biodiversidad para la

generación de servicios ecosistémicos, especialmente hídrico y prevención de fenómenos erosivos, promueve acciones de conservación y uso sostenible de los ecosistemas, da seguimiento y monitoreo ha acciones de restauración y posiciona el papel de los bosques frente a la mitigación, la gestión integral del recurso hídrico y la conservación de la biodiversidad.

En Costa Rica, el sector forestal ha logrado avances en la regulación de las actividades productivas que tienen impacto sobre el medio ambiente por la evaluación sistemática del potencial de la tierra y del agua, con las opciones de su aprovechamiento y de las condiciones económicas y sociales (PNDF, 2011).

Así mismo, la tecnología a incluido los Sistemas de información geográfica como una herramienta para la gestión sostenible de los recursos naturales, diseñando escenarios de la calidad ambiental con un momento inicial y permitiendo el monitoreo de los usos y acciones para evitar superar la capacidad de resiliencia de los ecosistemas y lograr detectar geográficamente los puntos de interés para desarrollar el seguimiento de las acciones territoriales planificadas (Bosque 1992).

Es por tanto, que en Costa Rica, el manejo integrado de los recursos desde las cuencas hidrográficas es una alternativa viable en el marco económico, social y ambiental para mitigar la contaminación y gestionar de forma sostenible el manejo del recurso hídrico.

2. Planteamiento del Problema

El deterioro de las cuencas hidrográficas, el desarrollo de la población y la erosión de los suelos permiten visualizar una situación difícil de abastecimiento de las necesidades alimenticias y la dotación de agua de la población (Guido 2000) citado por Solórzano (2007).

En Costa Rica, el impulso al desarrollo agrícola y ganadero trajo consigo una demanda exponencial de agua año con año, el riesgo y los hechos de contaminación se fueron acrecentando. Se determinó que los cuerpos de agua están altamente presionados a causa de las diferentes fuentes de contaminación. Solamente el 5% del total de vertidos domésticos a cuerpos de agua recibe tratamiento previo. A su vez, existe presión, en magnitud no determinada, por parte de las fuentes difusas de contaminación, tema que no está siendo gestionado en el ámbito nacional, lo que impide avanzar en la reducción de la contaminación del recurso hídrico. Diferentes estudios desarrollados principalmente por el Instituto Tecnológico de Costa Rica, la Universidad de Costa Rica y la Universidad Nacional, advierten el aumento de la carga orgánica, aparición de metales pesados, químicos y otros contaminantes en los ríos de la Gran Área Metropolitana (GAM) y zonas periféricas, principalmente en áreas con crecimiento demográfico constante (CGR 2013).

En el país, el principal usuario de agua, es la generación hidroeléctrica, en promedio se utilizan unos 15.6 Km³ para generar cerca de 7000 GHz (Morales 2010), la producción de electricidad ha sido y es cada día más un elemento decisivo en el desarrollo económico y social y por consiguiente en el mejoramiento de las condiciones de vida de la humanidad. Actualmente, la presión ejercida por el crecimiento de la población y la industria han acelerado los procesos de contaminación ocasionado problemas en la calidad complicando la producción de la energía hidroeléctrica (Pérez s.f.).

Estratégicamente, el problema y la solución para la degradación de las cuencas en Costa Rica, debe plantearse a partir de la determinación de la correlación existente entre la cuenca hidrográfica y las actividades que la gente desarrolla en ella (Solórzano 2007), situación por la cual la Compañía Nacional de fuerza y Luz desarrolla proyectos a nivel de cuenca para contrarrestar los problemas ocasionados en sus plantas generadoras.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Evaluar las fuentes de contaminación puntual y difusa y proponer una estrategia de manejo sostenible para la microcuenca del río Jaboncillo.

3.2 Objetivos Específicos

- Definir las zonas de usos y amenaza en la microcuenca del río Jaboncillo.
- Caracterizar las zonas con fuentes de contaminación puntual y difusa en la microcuenca.
- Formular una estrategia de manejo sostenible en el sector forestal para mitigar las fuentes de contaminación identificadas.

4. Marco Teórico

4.1 Cuenca Hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es una unidad territorial con un sistema hídrico donde drena una corriente de agua y se combina con un subsistema económico y social impulsado por el ser humano, el capital, el trabajo y la tecnología (Torres, Mejía, Cortés, Palacios, Exilio 2005). Según CATIE (2012), la cuenca hidrográfica se visualiza como un sistema integral de flujos hídricos donde se puede suscitar el trabajo desde el ordenamiento territorial e institucional a partir de los intereses colectivos. La gobernanza local debe contemplar las necesidades ecológicas, ambientales y los mecanismos de participación y organización de los actores para la toma de decisiones correctas.

En cuanto a tamaño y complejidad, los conceptos de pequeñas cuencas o microcuencas, pueden ser muy relativos cuando se desarrollen acciones, por ende, se recomienda entonces utilizar criterios conjuntos de comunidades o unidades territoriales manejables desde el punto de vista hidrográfico.

Las acciones de manejo de cuencas son parte de los procesos de gestión ambiental, este recurso compartido regula los flujos de calidad y cantidad de agua adecuada para el consumo humano, la producción y el funcionamiento de los ecosistemas, buscando contrarrestar los efectos ambientales negativos y favorecer los positivos. Sin embargo, la aplicación del manejo resulta difícil cuando existe conflictividad de los intereses entre la población y la inestabilidad en las políticas gubernamentales (Torres et al 2005).

4.2 Contaminación ambiental

Según Mihelcic y Zimmerman (2011), la contaminación es la introducción de una sustancia en el medio ambiente y en altos niveles produce la pérdida de un recurso o la degradación de la salud de los seres humanos y en general de los ecosistemas. Otros autores como Novotny, 2003; Campbell et al, (2004) la definen como cualquier alteración en la calidad natural del medio causada por factores químicos, físicos y biológicos que normalmente son referentes a las actividades del hombre.

La alteración es comprendida como el deterioro y la afectación por medio de sustancias químicas y otros contaminantes incluyendo: sedimentos, nutrientes, microorganismos, grasas, aceites, pesticidas, entre otros, que pueden encontrarse como contaminantes si están en forma excesiva e impiden el aprovechamiento del cuerpo receptor.

4.2.1 Contaminación Difusa

Este tipo de contaminación es emitida por una fuente que puede ser continua o intermitente, debido a que está relacionada a actividades estacionales propias de la agricultura como la época de fertilización o fenómenos ocasionales entre ellos altas precipitaciones, que terminan provocando pérdidas de nutrientes por lixiviación y arrastre (Jarvis 2002).

El mecanismo por el cual se inicia el transporte de contaminantes es la lluvia, esta promueve el escurrimiento que por procesos erosivos arrastra una gran cantidad de suelo y sedimentos que tienen como destino final los cuerpos de agua superficiales. La evaluación y el control son complejos ya que involucra el transporte y transformación de desechos a través de varios medios como la deposición atmosférica, aplicación de una sustancia en el suelo y la transformación química en ellos. De modo práctico, no se pueden regular directamente, pero sí por medio de implementación y evaluación de actividades a nivel de cuenca (Bravo *et al.* 2013).

En la tabla 1, se exponen algunos contaminantes de importancia que generan contaminación por fuentes difusas.

Tabla 1 - Fuentes, origen y problemática ambiental de algunos generadores de la contaminación difusa.

Contaminante	Origen	Problema ambiental
Fósforo	Erosión del suelo, fertilizantes agrícolas, contaminación de escorrentía urbana.	Eutrofización de las aguas dulces, degradación ecológica, incremento en el costo del tratamiento de agua potable.
Nitrógeno	Fertilizantes agrícolas, emisiones vehiculares, deposición atmosférica.	Eutrofización, contaminación de aguas potables.

Sólidos suspendidos	Escorrentía de tierra de laboreo, acumulación de sólidos en superficies urbanas impermeables.	Sedimentación de estanque naturales, transportador de nutrientes y compuestos tóxicos.
Grasas, aceites e hidrocarburos	Mantenimiento vehicular, deposición de aceites al agua, derrames por manejo o almacenamiento.	Toxicidad, contaminación de sedimentos de ríos urbanos, contaminación de agua subterránea.
Desechos orgánicos biodegradables	Desechos agrícolas, lodos residuales, disposición de efluentes en el suelo.	Demanda de oxígeno, enriquecimiento de nutrientes.
Pesticidas	Controladores de malezas cercas de carreteras, agricultura, mantenimiento privado de pastos.	Toxicidad, contaminación de fuentes de agua potable, afectación de la biodiversidad en ríos, lagos y mares.
Microrganismos fecales	Falla en sistemas de tanques sépticos, conexiones ilegales en sistemas de alcantarillado.	Riesgos a la salud, incumplimiento con los estándares recreativos.
Metales pesados	Escorrentía urbana, aplicación en el suelo, agua y lodos residuales.	Toxicidad.

Fuente: Campbell et al 2004

4.2.2 Contaminación Puntual

Es aquella que se puede establecer con exactitud, son únicas, identificables y localizables, se representa por efluentes de agua residual siendo este por tubería o canal. Este tipo facilita el monitorio para reducir o evitar excesos de contaminación en los cuerpos receptores a fin de que se cumplan las normativas vigentes y determinar los incumplimientos que causan los excesos de contaminación a los cuerpos receptores.

Esta contaminación se encuentra muy ligada a efluentes de agua residual municipal principalmente al manejo de aguas residuales domésticas e industriales, siempre y cuando exista una estructura que permita la caracterización e identificación (Jarvis 2002).

4.2.3 Agua Residual

El agua residual, según su composición contiene contaminantes orgánicos e inorgánicos y dependiendo de su constitución física se encuentran tanto en suspensión como disueltos. Estos se conectan en un sistema de alcantarillado público, la concentración no siempre es uniforme y depende del tipo de descarga del cual se origina, las más comunes son: sanitaria o municipal, industrial y agropecuaria (Marín y Osés 2013).

Barajas (2002) la define como el residuo líquido recogido mediante la red de alcantarillas para su envío a una planta de depuración o bien a los ríos, generalmente son provenientes de las zonas habitacionales y generadas por actividades comerciales provenientes de manufacturado y elaboración de alimentos y domésticas principalmente por el metabolismo humano, actividades de limpieza y alimentación.

Varios de los problemas para controlar la calidad del agua se deben a la presencia de los componentes que son vertidos al drenaje y que vienen acompañados de las descargas de agua residual. Los mecanismos de depuración que se dan en la naturaleza no son capaces de eliminar las cargas de contaminantes en los cuerpos receptores, razón por la cual el hombre implementa sistemas que aceleren la eliminación del material orgánico en el agua como plantas de tratamiento (Marín y Osés 2013).

4.2.4 Marco Normativo

Algunas de las principales normas que regulan la gestión de los recursos hídricos en Costa Rica son las siguientes: Decreto N° 32868-MINAE del 2006 (Canon por concepto de aprovechamiento de aguas), Ley de aguas N° 276 de 1942, Reglamento N° 34431-MINAE del 2008 (Canon ambiental por vertidos), Reglamento N° 33903 del 2007 (Evaluación y clasificación de la calidad de cuerpo de agua superficiales), Reglamento N° 33601-MINAE-S del 2007 (Vertido y reuso de agua residual), Ley orgánica del ambiente N° 7554, Ley Forestal N°7575.

Entre la problemática ambiental, se destaca que la contaminación de las aguas en Costa Rica es uno de los problemas de mayor incidencia negativa en el entorno ambiental debido al crecimiento poblacional y la inapropiada disposición de los residuos sólidos, motivos que resaltan la adopción de medidas de control para el vertido de agentes contaminantes en manantiales, zonas de recarga, ríos, quebradas y en general en las aguas nacionales (CONAMAR 2013).

El decreto N° 33601-MINAE del 2007 reglamenta el vertido y reuso de aguas residuales considerando la importancia de constituir pautas y parámetros para definir los límites que permiten establecer los requerimientos de calidad del vertido.

Este decreto define el agua residual como aquella que ha recibido un uso y cuya calidad ha sido modificada por la incorporación de agentes contaminantes. Estableciendo dos tipos: ordinario y especial. El agua residual de tipo ordinario es la generada por las actividades domésticas del hombre (uso de inodoros, duchas, lavatorios, fregaderos, lavado de ropa, etc.), mientras el agua de tipo especial, es el agua producto de procesos agropecuarios, químicos, minerales, orgánicos, comerciales e industriales.

Se debe tomar en cuenta que el agente contaminante es aquella sustancia cuya incorporación al agua conlleva al deterioro de su calidad física, química o biológica.

Dentro del análisis obligatorio para vertidos de aguas residuales se establecen los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que deberán ser analizados obligatoriamente, entre los parámetros universales se encuentran:

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): es la medida del contenido de materia biodegradable. Se basa en la medición de oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de degradación de la materia orgánica.

La Demanda Química de Oxígeno (DQO): Se entiende como la cantidad de materia orgánica e inorgánica en un cuerpo de agua oxidable químicamente.

Los Sólidos Suspendidos Totales (SST): son comprendidos como la cantidad de sólidos no filtrables secados entre 103°C y 105°C.

Grasas y aceites (GyA): son grupos de sustancias químicas y características fisicoquímicas similares que son extraíbles en hexano.

Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM): Medida de la cantidad de surfactantes (tensoactivos) tales como detergentes sensibles al azul de metileno.

Sólidos sedimentables (Ssed): Sólidos que sedimentan al cabo de 1 hora de reposo.

Potencial de Hidrógeno (pH): Se relaciona con la acidez o alcalinidad en el agua.

Temperatura: Propiedad física del agua que se mide en grados centígrados.

Los límites contenidos en el capítulo III de este reglamento, son valores permisibles y de acatamiento obligatorio para todos los entes generadores, donde el Ministerio de Salud acepta un intervalo de variación que será establecido por los límites de confianza al 95% del respectivo parámetro.

En la microcuenca del río Jaboncillal se analizó DQO, DBO₅ y SST, la tabla 2 presenta los límites máximos permisibles para estos tres parámetros en aguas residuales domésticas y por actividad ganadera vertidas en un cuerpo receptor.

Tabla 2 - Límites Máximos permisibles de tres parámetros seleccionados, para aguas residuales domésticas y por actividad ganadera.

Actividad	Límite máximo permisible (mg/L)		
	DBO _{5,20}	DQO	SST
Aguas residuales domésticas vertidas en un cuerpo receptor	50	150	50
Ganadería de vacas, ovejas, cabras, caballos, asnos, mulos, etc.; Ganadería lechera.	200	500	200

Fuente: Gaceta N°55, 19 de marzo del 2007, Costa Rica.

4.3 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los sistemas de información geográfica generalmente son definidos como un conjunto de programas y aplicaciones informáticas que permite la gestión de datos organizados en bases referenciadas espacialmente. Son herramientas para las actividades en educación ambiental ya que a través de estrategias de enseñanza teórico-prácticas para el análisis espacial de la información referenciada geográficamente permiten obtener: inventarios de bienes ambientales del territorio, diseñar mapas de sensibilidad ecosistémica, evaluar riesgos ambientales, realizar zonificaciones geográficas y generar modelos ambientales (Peña 2006).

Los datos son la base del SIG y en el espacio digital, son de formato vectorial y raster y cada uno de ellos es importante para que el usuario conozca cuál de ellos desarrollará según las necesidades y los objetivos que desee alcanzar. Dentro de la estructura que posee cada uno de los formatos están: puntos, líneas y polígonos en el vectorial y malla de celdas o píxeles en el raster. La serie de capas de información se pueden combinar en un mismo procedimiento con orígenes y formatos diferentes incrementando la complejidad del sistema (Peña 2006).

4.4 Modelo SWAT

SWAT representan en sus siglas el modelo Soil and Water Assessment Tool (Herramienta para la evaluación del suelo y el agua), este fue desarrollado por el Dr. Jeff Arnold para el departamento de agricultura de los Estados Unidos (USDA). Simula el manejo de cuencas hidrográficas y tiene como principal objetivo predecir el efecto en la toma de decisiones para el control de la producción de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas (Arnold *et al* 1987) citado por Uribe (2010).

Es un modelo continuo en el tiempo y para su funcionamiento requiere información específica. Se basa en la ecuación del balance hídrico que determina la entrada, salida, el almacenamiento de agua y sedimentos en la cuenca. Está basado físicamente en un modelo real que incorpora la regresión de las ecuaciones que describen la relación entre las variables de entrada y de salida; requiere la información específica sobre el clima, características del suelo, topografía, vegetación y las prácticas de uso de la tierra (Ríos 2014).

Para efectos de la modelación, SWAT divide la cuenca hidrográfica en un número variado de sub-cuencas las cuales se verán afectadas por el uso del suelo que impacte la hidrología del sector y las agrupará en unidades de respuesta hidrológica (HRU) las cuales serán áreas que corresponden a todas las únicas posibles combinaciones de cobertura y tipo de suelo, así como de la pendiente. Los procesos físicos son asociados con el movimiento del agua, sedimentos, ciclos de nutrientes y cosechas en general (Uribe 2010).

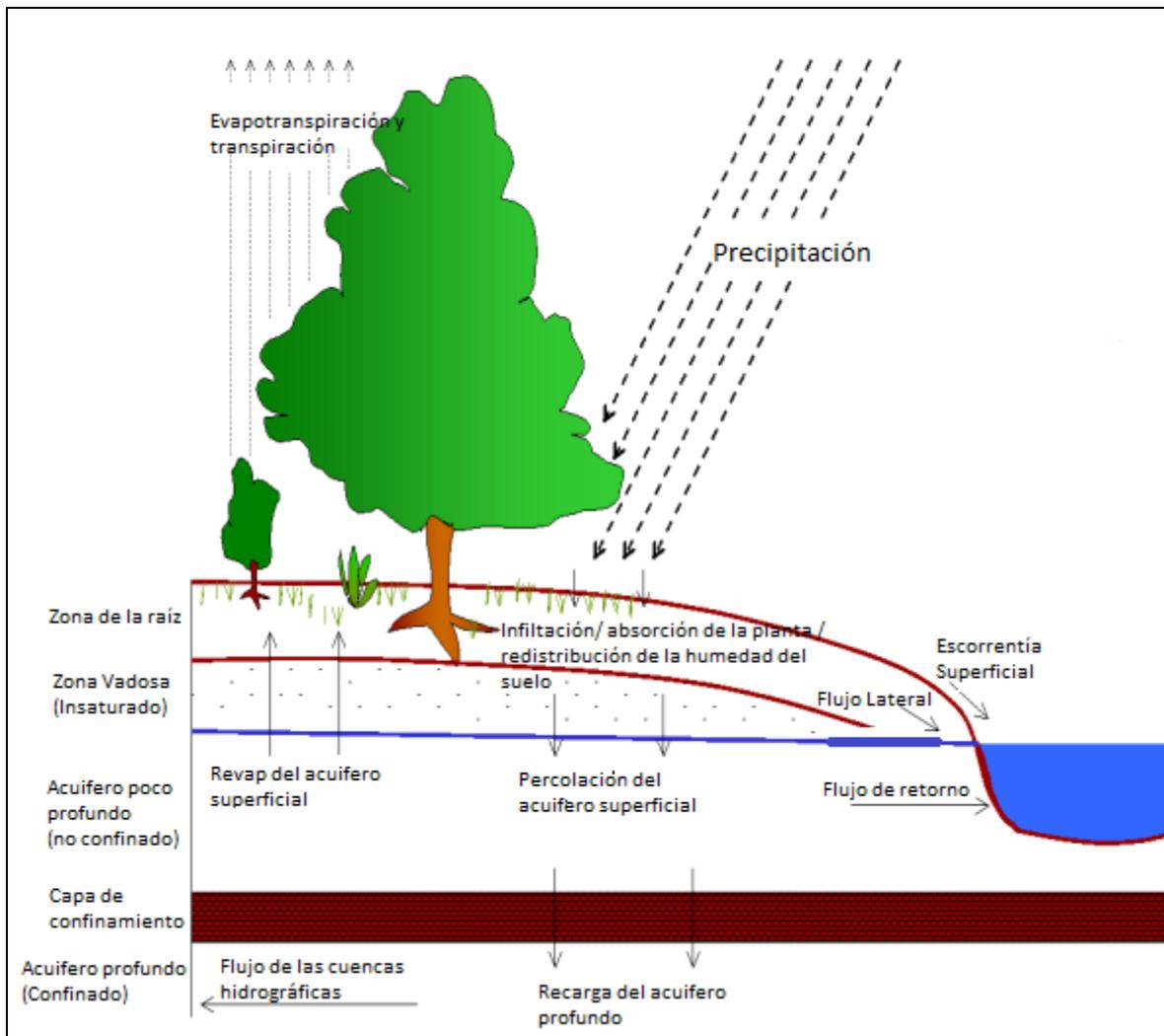


Figura 1 - Proceso del ciclo hidrológico utilizado por SWAT.

Para mostrar los resultados de la simulación, SWAT importa archivos de texto de salida en bases de datos Access. Entre los parámetros de salida, el modelo despliega el reporte de la distribución de la Unidades de respuesta hidrológica, datos de la cuenca, archivos de entrada y salida conteniendo los datos de control, reportes de pesticidas y archivos sobre calidad del agua, además, cuando el periodo es generado anualmente genera una tabla en formato DBF con archivos de salida de cada HRU (Uribe 2010).

Dentro de las ventajas que presenta el modelo se encuentran: caracterización del sitio por medio de la generación de una base física con documentación de aplicaciones, se emplea con datos de entrada relativamente fáciles de conseguir, detalla según a la base de datos de cultivos la modelización del crecimiento de los mismos, caracteriza por medio de bases

de datos las diferentes coberturas de uso de la tierra y especialmente produce un estudio a nivel de cuencas (Ríos 2014).

Entre sus limitaciones el software no realiza la simulación de eventos subdiarios como la ocurrencia de una tormenta, realiza la simulación del direccionamiento de pesticidas uno por uno, la red de corrientes y los datos de simulación generados para cada HRU no se visualizan automáticamente de manera espacial, sino que depende de los Sistemas de Información Geográfica (Ríos 2014).

5. Metodología

5.1 Área de estudio

La microcuenca se localiza en San José, provincia N° 1 de Costa Rica, en el cantón N° 8 Goicoechea y el distrito N°4 Mata de Plátano, entre las coordenadas 9°57,8645' N y 83°59,5764 W. Mide aproximadamente 669.15 hectáreas. Según la clasificación de Holdridge se encuentra en la zona de vida Bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB), es un afluente del río Torres el cual pertenece a la cuenca del río Grande de Tárcoles y comprende parte de los pueblos de Rancho Redondo, Isla, Jaboncillal y Vista de Mar. Los suelos predominantes se caracterizan como Andisoles y la precipitación promedio anual es de 2500 a 3000 mm. El área presenta importancia hídrica al contar con agua subterránea por infiltración y alta vulnerabilidad de acuíferos a lo largo de la microcuenca (Feoli 2013) .

La figura dos muestra la ubicación de la microcuenca del río Jaboncillal en la provincia de San José, Costa Rica.

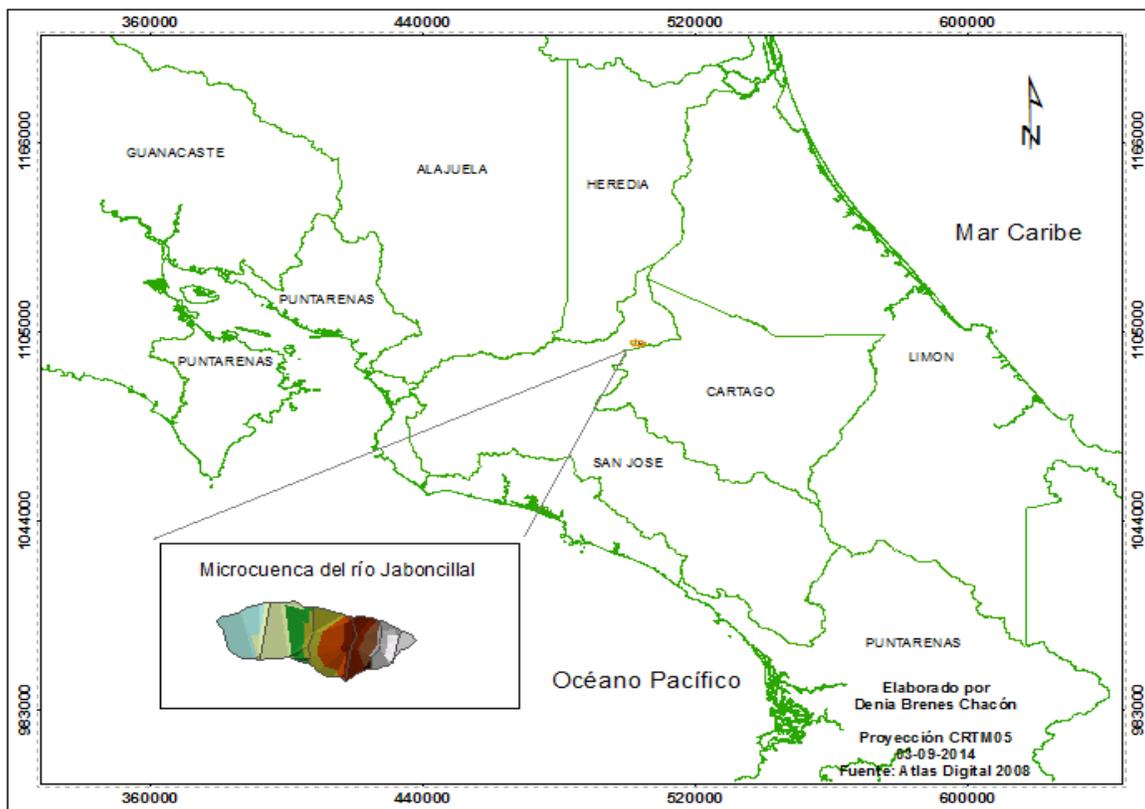


Figura 2 - Ubicación de la microcuenca del río Jaboncillal, San José, Costa Rica, 2014. Fuente: Atlas Digital 2014.

5.2 Determinación de las zonas de uso del suelo.

El mapa de uso del suelo se derivó del análisis de una imagen satelital RapidEye con tres bandas espectrales, suministrada por medio de la CNFL. La fotografía aérea se digitalizó e interpretó mediante Roigs en el software ENVI 4.8, donde se generó una clasificación supervisada y luego se aplicó un filtro de mediana de 5x5, seguidamente, se exportó al programa de SIG ArcMap 10.2 en formato shape.

La verificación se realizó en campo mediante la metodología porcentaje de validación, visitando 62 puntos al azar entre las distintas coberturas, en cada sitio se georreferenció un punto con GPS y se observó la cobertura existente. Los puntos en formato shape se sobrepusieron en el mapa de uso obtenido, alcanzando comparar la cobertura observada y la obtenida en dicho mapa. El porcentaje de validación acepta el mapa cuando la precisión sea mayor a 80% y se estimó mediante la fórmula $((\text{aceptados} / \text{Observados}) * 100)$, siendo los aceptados los que coinciden con la cobertura existente y los observados el total de puntos visitados (Feoli 2014).

5.3 Caracterización de las fuentes de contaminación puntual y difusa

5.3.1 Determinación de la contaminación puntual

Se realizó un recorrido por el río Jaboncillal donde se localizaron y georeferenciaron las diferentes descargas puntuales provenientes de aguas residuales domésticas y de actividades de ganadería lechera. Cada vertimiento fue aforado volumétricamente o con molinete según se requiriera y se recolectó una muestra para los análisis fisicoquímicos usados como parámetros indicadores de contaminación y de carácter obligatorio para el estudio de aguas residuales siendo DBO₅, DQO y SST en diez puntos de interés.

El muestreo se realizó en el mes de Octubre del 2014 en un día seco y la distribución de los sitios se llevó a cabo de la siguiente manera: seis puntos de vertimientos puntuales donde tres son por descargas de agua residual doméstica, uno la finca Piza y otro por vertimiento de la quebrada Hospicio de Huérfanos, además de cuatro puntos de monitoreo distribuidos a lo largo del río, la selección de los sitios se realizó según puntos identificados y de importancia para la Compañía Nacional de Fuerza y Luz . De cada uno se extrajo una muestra de agua recolectando, 250 ml para el análisis de DBO₅ y DQO y 500 ml para SST, todos los puntos fueron georreferenciados con GPS Oregon 550.

Los análisis de las muestras se realizaron en el Centro de Investigación y de servicios Químicos y Microbiológicos CEQIATEC y en el laboratorio 1, Aire y Agua Potable de la escuela de Ing. Ambiental del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Para cada análisis se utilizó el procedimiento según el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

Las cargas (Kg/día) de contaminantes se determinaron por medio de la relación entre las concentraciones (mg/l) obtenidas por cada parámetro y los caudales (m³/s) medidos en cada sitio, logrando obtener las unidades de masa por unidad de tiempo.

5.3.2 Determinación de la contaminación difusa

Se determinó por medio del modelo ArcSWAT 2012, bajo la plataforma de ArcGis 10.2. Se suministraron datos distribuidos espacialmente en la topografía, cubierta vegetal, la gestión del suelo y el clima para predecir caudales, sedimentos, N total y P Total.

Los datos son de tipo raster y vector compatibles con ArcGIS, en formatos GRID, shapefiles y feature classes así como archivos Excel como base de datos con información acerca de la cuenca.

A continuación se describe la metodología para la determinación de los parámetros de alimentación del modelo SWAT.

Datos de Clima y Temperatura

Para la precipitación se analizaron datos diarios (mm) del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) para dos estaciones, Avance de tres Ríos y Concepción de tres Ríos en un periodo de 20 años comprendido entre 1980 y 1999. Estas estaciones se utilizaron por la cercanía a la

microcuenca ya que dentro de ella no se encuentran estaciones, la tabla cinco muestra las coordenadas y la elevación de cada una de ellas.

Tabla 3 - Estaciones de precipitación utilizadas.

Estación	Latitud (CRTM 05)	Longitud (CRTM 05)	Elevación (m)	Fuente
Avance de Tres Ríos	9,9333333	83,9500000	1870	IMN
Concepción de Tres Ríos	9,9166667	84,0000000	1320	IMN

La temperatura se obtuvo a partir de la base de datos climáticos globales para SWAT (weather Data for SWAT), donde se encontró una estación ubicada a 1529 m con datos de temperatura diaria, tanto máxima como mínima, se tomaron los datos para el periodo de 20 años comprendido entre 1980 y 1999. La tabla seis muestra las coordenadas y la elevación de la estación, misma que fue utilizada por la cercanía a la microcuenca.

Tabla 4 - Estación de temperatura.

Estación	Latitud (CRTM 05)	Longitud (CRTM 05)	Elevación (m)	Fuente
Weatherdata-98-841	9,835	84,063	1529	weather Data for SWAT

Los datos anteriores se analizaron mediante climogramas para observar el comportamiento del clima por cada estación durante el periodo a estudiar, valorando la continuidad de los mismos.

Estos datos se trabajaron estadísticamente por medio de la hoja Excel MacroWGN, la cual es sugerida por la plataforma web-SWAT. La tabla siete muestra los parámetros generados así como la descripción de cada uno.

Tabla 5 - Parámetros climáticos obtenidos en la MacroWGN.

Parámetros	Descripción
TMPMX	Promedio mensual de la temperatura máxima diaria (°C)
TMPMN	Promedio mensual de la temperatura mínima diaria (°C)
TMPSTDMX	Desviación estándar mensual de la temperatura máxima diaria (°C)
TMPSTDMN	Desviación estándar mensual de la temperatura mínima diaria (°C)
PCPMM	Promedio mensual de la precipitación diaria (mm H ₂ O)
PCPSTD	Desviación estándar mensual de la precipitación diaria (mm H ₂ O/día)
PCPSKW	Coeficiente de asimetría mensual de la precipitación diaria
PR_W1	Probabilidad mensual de ocurrencia de un día húmedo luego de un día seco
PR_W2	Probabilidad mensual de ocurrencia de un día húmedo luego de un día húmedo
PCPD	Promedio mensual del número de días de lluvia
RAINHHMX	Máxima lluvia de media hora por mes (mm H ₂ O)
SOLARAV	Promedio mensual de la radiación solar diaria (MJ/m ² /día)

DEWPT	Promedio mensual del punto de rocío (MJ/m ² /día)
WNDV	Promedio mensual de la velocidad de viento diaria (m/s)

Cobertura y usos del suelo

Para la cobertura del suelo se utilizó el mapa de uso elaborado por medio del software Envi y ArcGis 10.2. Se comprendieron las cuatro categorías: Sector Urbano, Bosque, Potrero e Invernadero. La tabla ocho muestra las coberturas y la codificación requerida por SWAT.

Tabla 6 - Coberturas utilizadas y codificación requerida por SWAT para la microcuenca del río Jaboncillal, San José, Costa Rica.

Nombre de Cobertura	Nombre SWAT
Bosque	FRST
Potrero	RNGE
Invernadero	INVR
Urbano	URLD

Determinación del componente suelo

Para los parámetros de suelos se determinaron distintas variables las cuales se describen en la tabla 9.

Tabla 7 - Variables de entrada requeridas por SWAT para el análisis de suelo en la microcuenca del río Jaboncillal, San José, Costa Rica.

Parámetros	Descripción
SOL_ZMX	Máxima profundidad del perfil del suelo con presencia de raíces (mm)
ANION_EXCL	Fracción de porosidad desde donde los aniones son excluidos
SOL_CRK	Fracción del volumen de rompimiento potencial o máximo del perfil de suelo
SOL_Z	Profundidad desde la superficie del suelo hasta el fondo del horizonte (mm)
SOL_BD	Densidad real (Mg/m^3 o g/cm^3)
SOL_AWC	Capacidad de disponibilidad de agua del horizonte de suelo (mm H_2O / mm suelo)
SOL_K	Conductividad hidráulica saturada (mm/hr)
SOL_CBN	Contenido de carbono orgánico (% del peso del suelo)
SOL_ALB	Albedo del suelo húmedo
SOL_EC	Conductividad eléctrica (dS/m)
USLE_K	Factor USLE de erodabilidad del suelo
CLAY	Contenido de arcilla (% del peso del suelo)
SILT	Contenido de limo (% del peso del suelo)
SAND	Contenido de arena(% del peso del suelo)
ROCK	Contenido de fragmentos de roca (% del peso del suelo)

Los datos de textura, profundidad, perfiles (mm), contenidos de Materia Orgánica (%), arcilla (%), arena (%) y limo (%), fueron extraídos de análisis físicos y químicos de tres fincas ubicadas dentro de la microcuenca.

La densidad real, la capacidad de agua del horizonte del suelo y la conductividad hidráulica saturada, se determinaron a partir del programa SPAW Hydrology el cual es una herramienta para presupuestar agua de campos de cultivo, lagunas y humedales inundados mediante el método número de curva y fue desarrollado por la universidad estatal de Washington (Dong 2013).

El Factor K se obtuvo por medio de la ecuación de la Pérdida Universal del Suelo.

$$K_{USLE} = \frac{0.00021 \cdot M^{1.14} \cdot (12 - OM) + 3.25 \cdot (c_{soilstr} - 2) + 2.5 \cdot (c_{perm} - 3)}{100}$$

Dónde:

K_{USLE} : es el factor de erodabilidad del suelo.

M: es el parámetro del tamaño de las partículas.

OM: es el porcentaje de materia orgánica.

$c_{soilstr}$: es el código de la estructura del suelo en la clasificación del suelo.

c_{perm} : es el perfil de las clases de permeabilidad.

El contenido de carbono Orgánico (% del peso del suelo) mediante la fórmula

$$C.org = \frac{\text{Materia orgánica \%}}{1.724}$$

Para el Albedo del suelo húmedo se utilizó la fórmula:

$$A = \frac{0.6}{\exp(0.4 \cdot OM)}$$

Dónde: A es albedo del suelo y OM es la materia orgánica del suelo (%).

Modelo de Elevación Digital

Se utilizó el Modelo de Elevación Digital DEMCR 10x10 del atlas digital 2014 en formato GRID, unidades de metros y fue corregido mediante la herramienta Fill del ArcToolbox de ArcGis con el fin de eliminar los sitios puntuales que no drenan a una de las celdas adyacentes y depurar aquellas que se encuentran en los extremos logrando que drenen hacia afuera de la cuenca para obtener de manera más precisa y no mayorar los caudales que drenan hacia la cuenca de interés (García 2014).

Determinación de los rangos de Pendiente

A partir del Modelo de Elevación digital anterior, se creó el mapa de pendientes por medio del comando Slope donde clasifica el terreno de acuerdo a su inclinación. Determinando cinco rangos (%) 0-10, 10-25, 25-35, 35-50 y >50. La figura tres presenta los pasos necesarios para obtener estas pendientes por medio del software ArcGis 10.2



Figura 3 – Determinación del rango de pendientes para la microcuenca del río Jaboncillal por medio de la herramienta slope.

Aplicación de ajustes al modelo

El modelo fue ajustado en parámetros hidrológicos y en la base interna de SWAT, para lograr una simulación acorde a la realidad, entre ellos fueron:

Los coeficientes de manning para la rugosidad de caudales según Ven Te Chow (2004) se utilizó 0.050 para el cauce principal, 0.030 para pastos y 0.040 para bosque.

Se determinó el número de curva según el software Determinación de números de curva (2006), utilizando curva de 80 para pastos y 64 para bosque, esto de acuerdo a los contenidos (%) de arena, (%) arcilla y (%) limo reportados en los estudios físicos realizados en las fincas de la zona.

Para la concentración de CO₂ en la atmosfera se usó 365 ppm según el Cuarto Informe del estado de la Región centroamericana (Corrales 2010).

Se agregó el promedio de agua utilizado por la planta del AyA siendo 2.592×10^4 m³/mes.

Se incorporó datos de manejo en el área de potrero añadiendo el consumo de materia orgánica seca (Ton/ha) y el periodo de rotación de ganado por área. Menciona Campabadal (2000) que el consumo de materia seca es el principal factor que influye en la producción de leche y en la condición corporal del ganado, Almeyda (2014) indica que se utiliza un factor de 3.2% en zonas altas y que por lo general se consumen de 2 a 2,25 kg de MS por cada 100 kg de peso corporal.

A la vez WingChing, Cabalceta y Alvarado (2009) señalan que las zonas perteneciente y aledañas a Coronado presentan alta carga animal, para Jaboncillal se estiman aproximadamente 525 cabezas de ganado con pesos que rondan entre 450 y 525 kg/animal por lo que se obtienen 640 UA para la zona y el periodo de rotación es de 40 a 45 días.

De acuerdo a los datos anteriores se obtuvo el consumo de materia seca el cual es de 8192 (Ton/ha) y se utilizó un periodo de rotación de 45 días.

En la base interna de SWAT se incorporó la categoría de invernadero (INVR) como un cultivo ya que los parámetros fueron ajustados de acuerdo a la siembra de helechos. Según Aedo (2005), el cultivo de esta especie requiere de suelos con alto contenido de materia orgánica, bien drenados y aireados donde la preparación y labranza del suelo es mínima ya que posee un sistema radicular pequeño no desarrollado extensamente por lo que se tomó un factor de erosionabilidad del suelo (USLE_C) de 0.001, además, menciona que la temperatura oscila entre 13 y 30 °C, que el manejo y riego es controlado y la intensidad lumínica en el rango óptimo de 32.000 a 54.000 lux, sin ser expuesta directamente al sol y el índice de área foliar

varía entre 2.5 a 4 como indicadores de crecimiento por lo tanto se utilizó una altura máxima de helechos de 0.6 m, un valor de Manning de 0.1 y un índice de área foliar máxima de 4.

Del mismo modo, se modificó el número de curva para el sector urbano, ya que durante la modelación, SWAT toma por defecto Bermuda grass (BERM) para estos sitios, el modelo reconocer que no son áreas totalmente permeables y asigna un numero de 54, este valor se ajustó manualmente a 90 el cual es propuesto Gaspari, Senisterra y Marlats (2006) los cuales mencionan que el número de curva igual a 1 indica que toda la lluvia infiltra y un número de 100 representa el escurrimiento total de la precipitación, por lo mencionan que las zonas urbanas infiltran pero en mayor cantidad contribuyen a la esorrentía superficial.

Ejecución de la simulación Run-SWAT

Se llevó acabo la simulacion de la microcuenca tomando una lectura mensual de los datos y un periodo de calentamiento de los tres primeros años. Este periodo se puede determinar como el tiempo que una simulación requiere para alcanzar un estado estable facilitando el inicio de recolección de información estadística de las variables de respuesta y eliminando el sesgo ocasionado por observaciones consideradas en el estado transitorio del modelo (Ballesteros 2003).

La figura cuatro presenta un esquema sobre el proceso que se requiere para llevar acabo la modelación con SWAT.

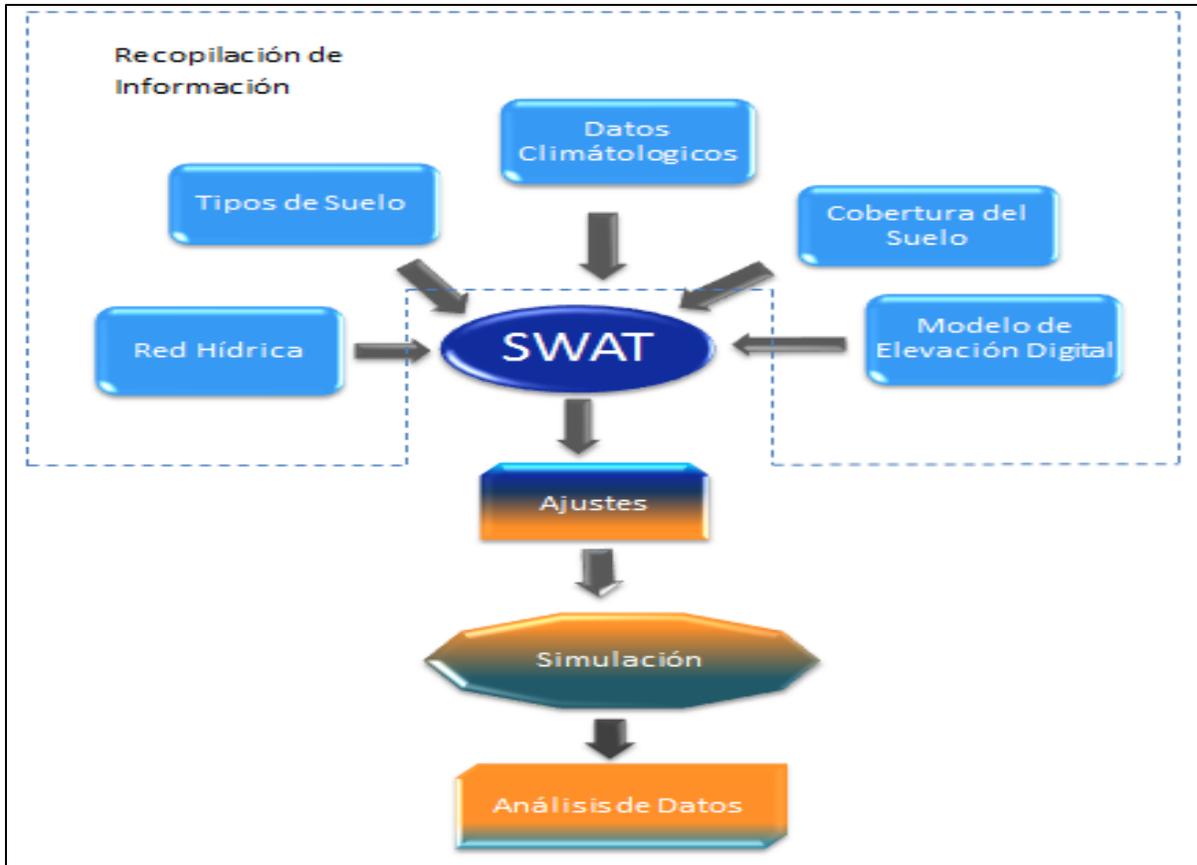


Figura 4 - Diagrama del proceso de Modelación con SWAT.

5.4 Formulación de una estrategia de manejo sostenible en el sector Forestal para mitigar las fuentes de contaminación identificadas.

Se identificó y se analizó la problemática ocasionada por los tipos de contaminación en estudio.

Para la contaminación puntual, se caracterizó los vertimientos que aportan mayor contaminación según la carga, el tipo de aguas vertidas y el impacto que estas producen, a partir de ello se plantearon medidas de trabajo y acciones que contribuyan a disminuir la contaminación existente.

Para la contaminación difusa se caracterizó cada sitio según las HRU tomando en cuenta, la pendiente, la cobertura y tipo de suelo, además de las prácticas realizadas en la zona. Para cada sector, se identificó el problema y el impacto ocasionado.

Ambas se tabularon en una matriz con acciones de mitigación para reducir las fuentes potenciales identificadas.

6. Presentación y análisis de resultados

6.1 Categorías de uso del suelo

La microcuenca en estudio presenta un área total de 669.15 ha con cuatro usos del suelo, según la figura 5 se observa bosque, potrero, invernadero y sector urbano, además de una fragmentación de la cobertura a lo largo del área. La Figura 6 presenta la distribución porcentual de estos usos.

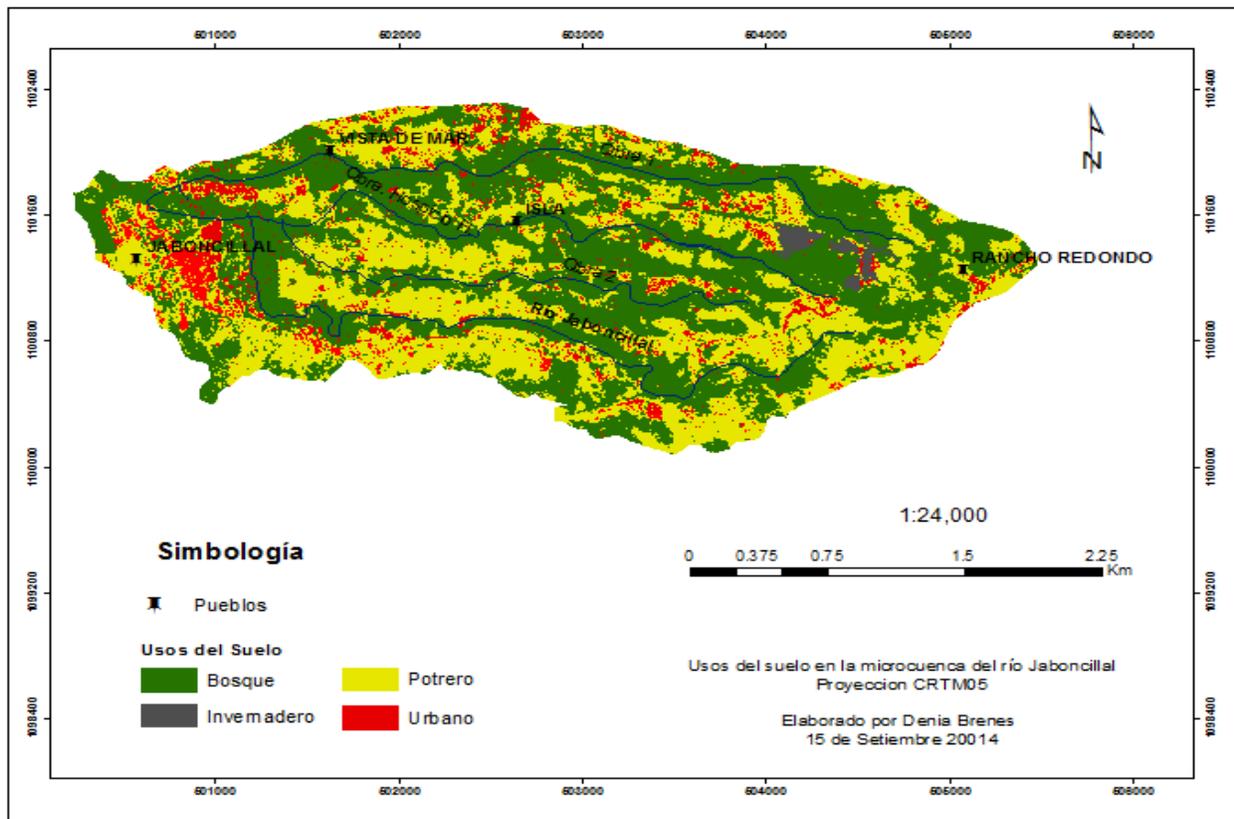


Figura 5 - Clasificación del suelo según su categoría de uso en la microcuenca del río Jaboncillal, San José, Costa Rica.

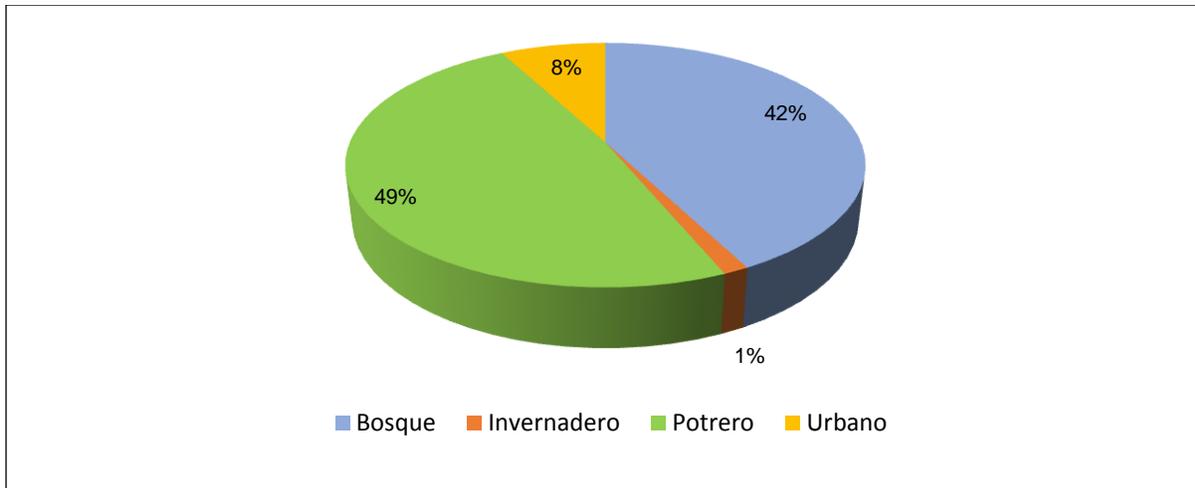


Figura 6 - Porcentaje del área ocupada según la categoría de uso en la microcuenca del río Jaboncillal, San José, Costa Rica.

Las tierras ocupadas con pastos cubren la mayor área de la microcuenca en un 49% (317.84 ha) (Figura 6), en estas áreas ha sido desarrollada la actividad ganadera. Las lecherías de la zona son categorizadas intensivas y altamente tecnificadas, los potreros o zonas de pastoreo presentan una estructura irregular producida por pequeños deslizamientos, la mayor raza de ganado utilizado es Holstein según WingChing, Cabalceta y Alvarado (2009), este tipo de ganado aumenta la densidad aparente en esta clase de suelo variando entre un 14 y 31% lo que afecta el microrelieve de los mismos, además mencionan que estas zonas presentan un alto uso de pastoreo, que ha disminuido la cobertura arbórea y siguen siendo deforestados con el paso del tiempo.

El Bosque cubre un 42% y se distribuye en forma lineal principalmente en el curso de la red hídrica, son zonas especialmente de protección para los ríos del área, presenta vegetación secundaria principalmente especies de ribera y de importancia para la fauna del sitio como: *Ficus sp*, *Perseas* (aguacatillos), *Cedrela odorata* (Cedro), *Alnus acuminata* (Jaúl), *Oreopanax arboreus*, *Quercus sp*, *Ehretia latifolia* (Raspaguacal), *Croton draco* (Targuá), *miconea sp* (Plomillo), entre otras.

En la parte alta de la microcuenca se observa un amplio sector de bosque (Figura 5) el cual corresponde a la finca los Coyotes misma que posee una Reserva que conlleva su nombre, el fragmento mide 25 ha el cual se compone de bosque tropical muy húmedo montano bajo, es un área protegida privada con el fin de proteger especies animales y vegetales que han ido perdiendo su hábitat debido al cambio en el uso del suelo en la Cordillera Volcánica Central (Hernández 2013).

El sector de Invernaderos está constituido por dos pequeñas áreas localizadas en la finca los Coyotes e Irene Pacheco, comprenden 9.02 ha (1%), estos sitios fueron dedicados a la producción de Rumohra adiantiformis (Helecho cuero de hoja) para la exportación, su funcionamiento decae desde el 2010 y son utilizados actualmente como bodegas,

El sector urbano, está conformado por los pueblos Vista de Mar, Jaboncillal e Isla pertenecientes al cantón de Mata Plátano, además, parte de la población del distrito Rancho redondo, este mosaico cubre 42.61 ha y representan un 8% del área total, el crecimiento poblacional ha aumentado en el transcurso del tiempo en Mata Plátano el total de habitantes en zona rural es de 122, mientras en zona urbana 17 248, en Rancho redondo se encuentran 975 habitantes en el sector urbano y 1 563 en el área rural, se caracterizan por ser zonas de actividad agrícolas y ganaderas donde los pobladores presentan características socioculturales similares y la mayoría trabaja en las fincas de la zona (INEC 2012).

En la verificación de campo, de los 62 sitios visitados 59 son aprobados aceptado el mapa con un porcentaje de 95.16%.

6.2 Zonas con fuentes de contaminación puntual y difusa

6.2.1 Caracterización de la contaminación puntual

El río Jaboncillal posee una longitud de 5.03 kilómetros desde el punto de su nacimiento hasta desembocar en el río Torres. Los principales usos de la red hídrica son por actividades agropecuarias y el abastecimiento de agua para consumo humano, aprovechado por Acueductos y Alcantarillados (AyA) en la planta Mata Plátano.

En la figura 7 se muestra la localización de cada uno de los sitios muestreados tanto de los vertimientos puntuales como los puntos de monitoreo sobre el río Jaboncillal.

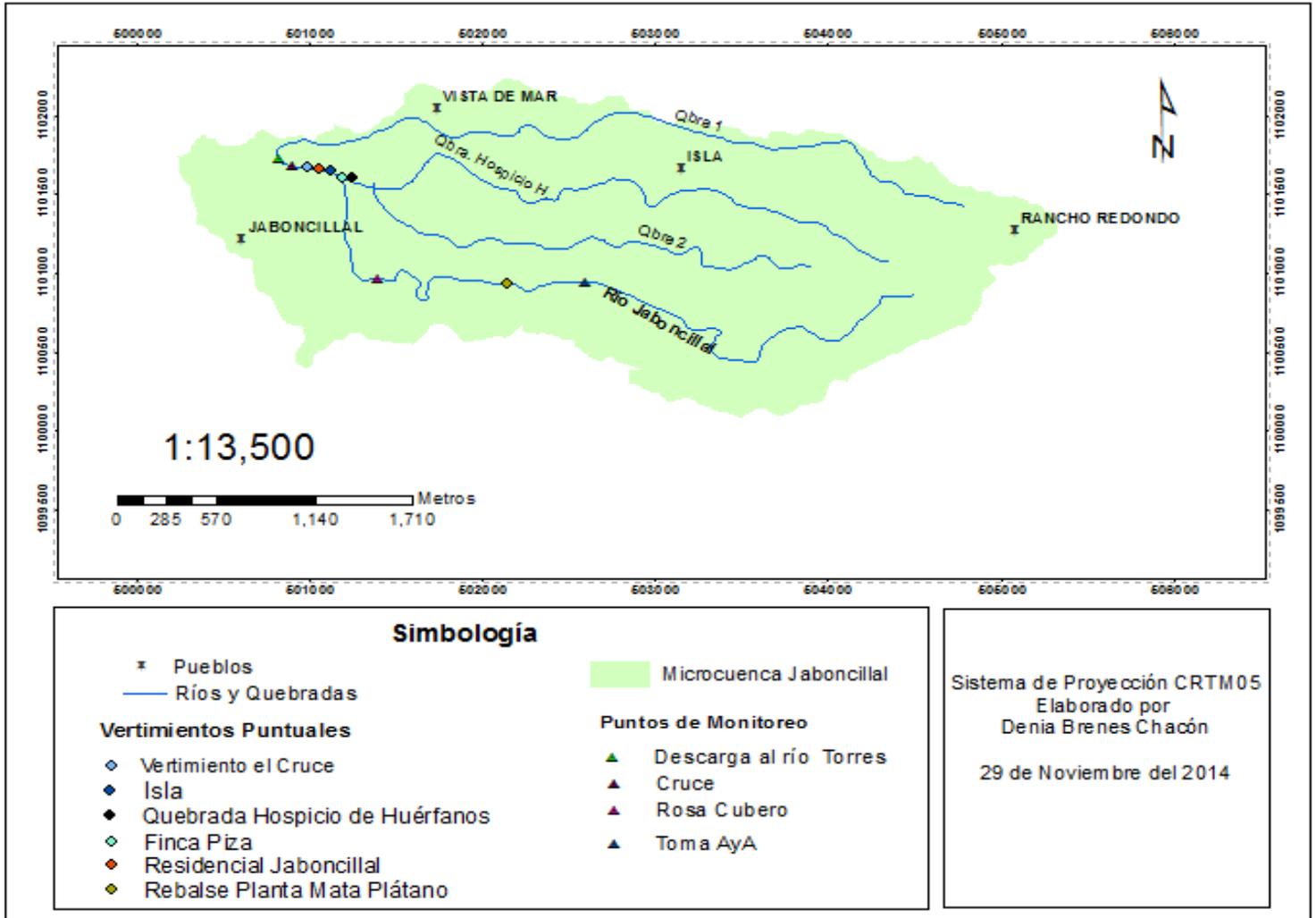
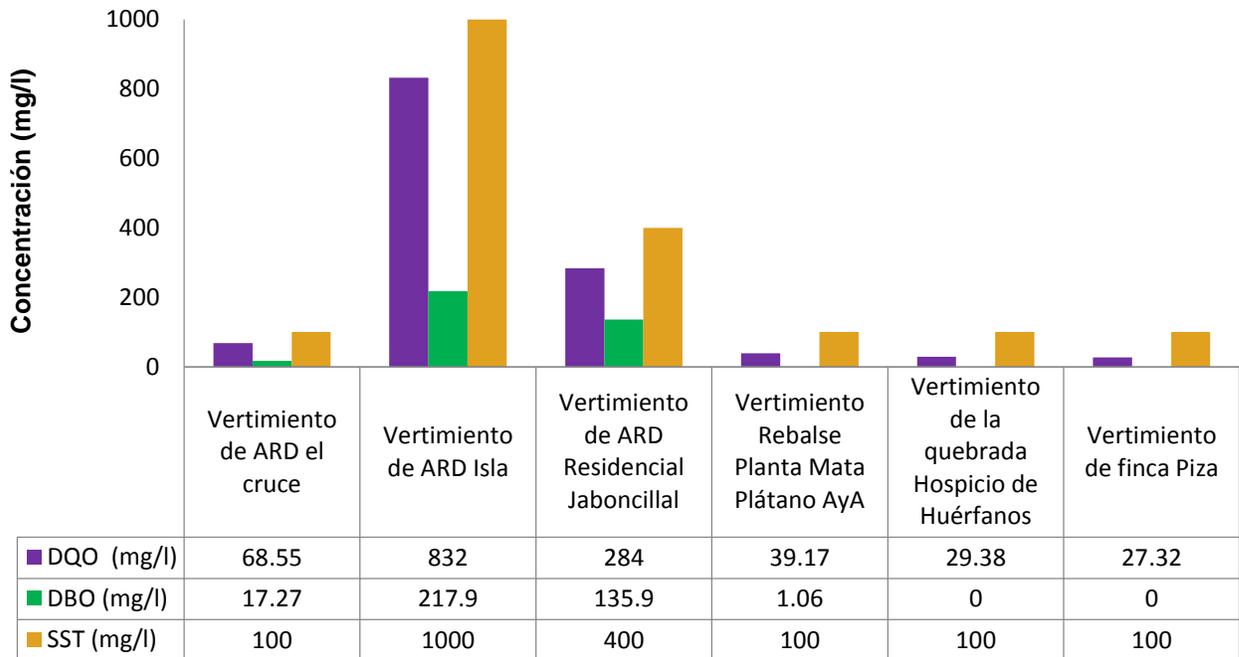


Figura 7 - Localización de los vertimientos puntuales y sitios de monitoreo sobre el río Jaboncillal, San José, Costa Rica.

Según los análisis fisicoquímicos realizados, en términos de calidad, la figura 8 muestra la concentración en mg/l de tres parámetros indicadores de contaminación en los seis puntos de vertimiento puntual sobre el río Jaboncillal, donde tres descargas son por agua residual doméstica, uno por la finca Piza, el vertimiento de la quebrada Hospicio de Huérfanos y por último el rebalse de la planta Mata Plátano, siendo estas dos últimas influenciadas por las fincas de la zona.



*ARD: Agua Residual doméstica

Figura 8 - Calidad de agua de los vertimientos puntuales sobre el río Jaboncillal evaluada con tres Indicadores DQO, DBO₅ y SST.

Los sitios Isla, el Cruce y residencial Jaboncillal son vertimientos por agua residual doméstica donde la composición depende principalmente de la calidad, el tipo de disposición suministrado resultado de los hábitos de vida de las personas y las actividades de los hogares, así como la cantidad de agua utilizada la cual determina su concentración, según estudios anteriores se ha estimado que el promedio de agua por persona es de 100 a 400 l/p/día pero mucho depende de las zonas (Morel y Diener 2006).

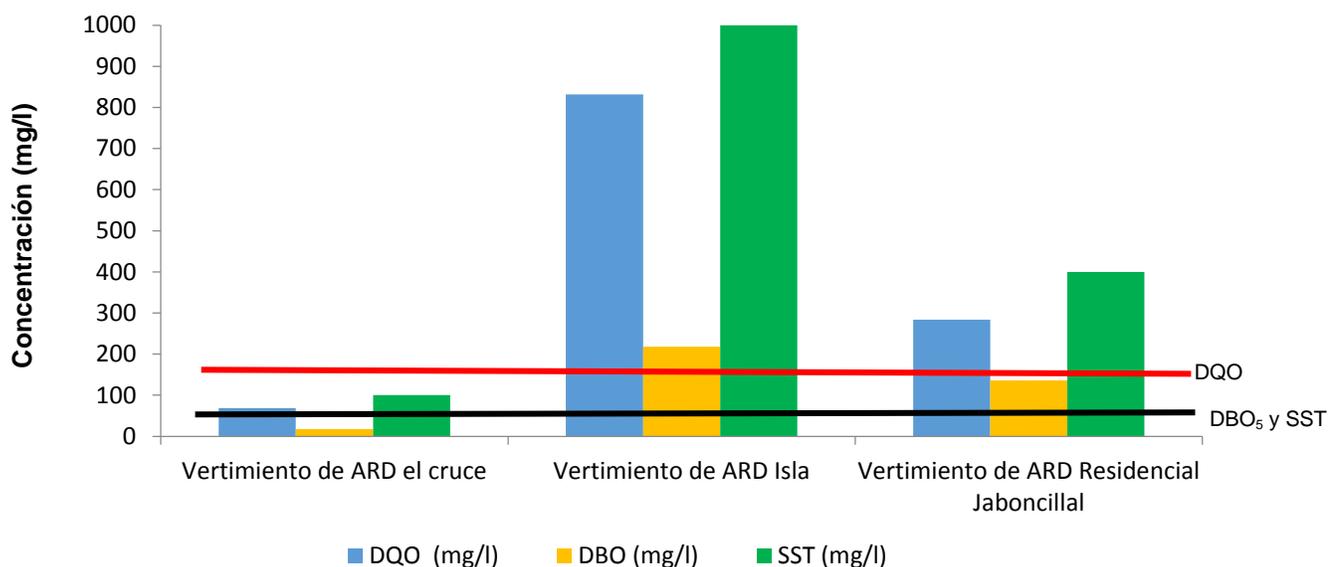
Estos vertimientos presentan las mayores concentraciones de DQO, DBO₅ y SST con respecto a los vertimientos de aguas residuales por actividades de ganadería lechera. Los cambios pueden ser producto de las características que presentan los tipos de aguas, ya que las residuales domésticas se diferencian de otras corrientes por los altos contenidos en grasas, aceites y materia orgánica (Al- Jayyousi, 2003; Christova-Boal et al., 1996; Little, 2002; Wilderer, 2004) citado por Zambrano (2012).

Según Mara (2003), cuanto mayor sea la concentración de materia orgánica en las aguas residuales, su concentración de DBO₅ es mayor, por tanto los sitios influenciados por fincas pueden estar aportando materia orgánica no biodegradable logrando ser el caso de la planta

Mata Plátano la que aporta en menor cantidad 1.06 mg/l, así como los vertimientos por la quebrada y la finca Piza, sitios que no aportan concentración en este indicador.

Las concentraciones de sólidos suspendidos en aguas residuales vertidas en el río Jaboncillal presentan rangos de 100 a 1000 mg/l.

En Costa Rica se han establecidos parámetros máximos permisibles que regulan el vertimiento de este tipo de aguas residuales según la actividad realizada, en las tablas 2 se muestran los valores requeridos por la normativa, mientras en las figuras 9 y 10 se puede identificar cuáles de las fuentes anteriores superan los límites y requieren de monitoreo y control para evitar la contaminación que aportan.



*ARD: Agua Residual Domestica.

Figura 9 - Evaluación de la calidad de agua en los vertimientos puntuales de agua residual doméstica según los límites máximos permisibles para los parámetros DQO, DBO₅ y SST.

En costa Rica, las aguas residuales por uso doméstico presentan un máximo permisible de 50 mg/l para los indicadores DBO₅ y SST mientras para el parámetro DQO es de 150 mg/l (Tabla 2).

El vertimiento Isla y residencial Jaboncillal sobrepasan los límites de los tres indicadores. Donde Isla presenta en demasía 682 mg/l en DQO, 167.9 mg/l en DBO₅ y 950 mg/l en SST, y

el vertimiento de aguas del residencial excede 134 mg/l en DQO, 85.9 mg/l de DBO₅ y 350 mg/l de SST. El cruce es el único que presenta altos valores en el indicador DQO y SST aportando 18.55 mg/l y 50 mg/l respectivamente. El comportamiento entre estas aguas residuales puede ser resultado de las características variables que presentan así como de su composición, (Al-Jayyousi, 2003; Christova-Boal et al., 1996; Little, 2002; Wilderer, 2004) citado por Zambrano (2012).

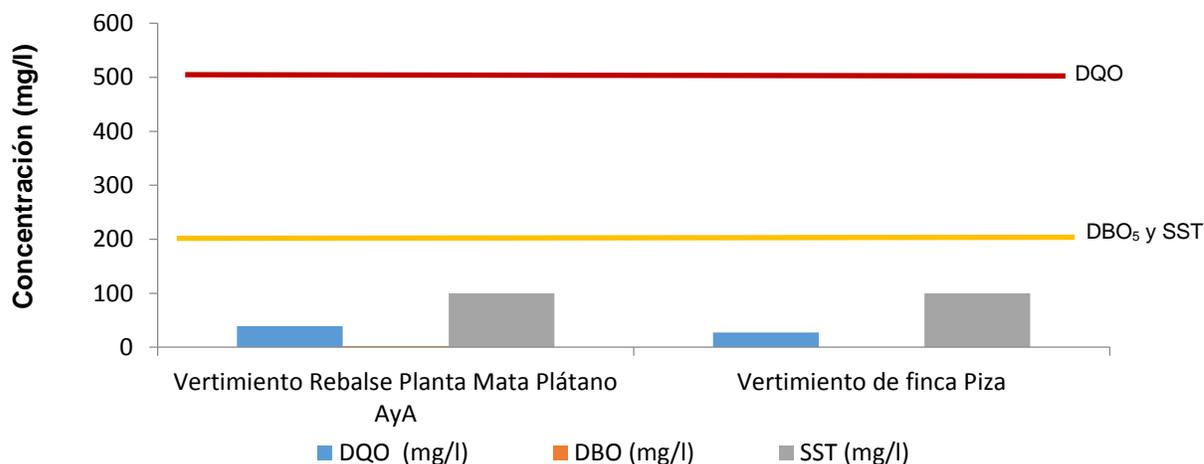


Figura 10 - Evaluación de la calidad de agua en los vertimientos puntuales por uso en actividades agropecuarias según los límites máximos permisibles para los parámetros DQO, DBO5 y SST.

Respeto a los vertimientos por actividades agropecuarias (ganadería lechera), en Costa Rica el máximo permisible es de 200 mg/l para los indicadores DBO₅ y SST mientras para el DQO es de 500 mg/l. Por lo tanto, se puede observar (figura 10) que el aporte de los dos sitios de muestreo se encuentra por debajo de los límites máximos no aportando mayor contaminación según lo establecido.

Según reportes de la Dirección de Aguas del MINAE, existen diferentes fuentes de contaminación de los recursos hídricos, siendo la principal el vertido de aguas residuales domésticas, las cuales, son vertidas a los ríos sin ningún tratamiento y superan los límites máximos permisibles exigidos por la normativa entre los parámetros incumplidos se encuentran las Sustancias Activas al Azul de Metileno, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Sólidos suspendidos Totales, Grasas y Aceites y Demanda Química de Oxígeno (CGR 2013).

A la vez, reportes operacionales del Ministerio de Salud para el periodo 2009-2011 mencionan que ninguno de los 4 grandes colectores administrados por el AyA en la gran área metropolitana (GAM), cuenta con sistemas de tratamiento y descargan las aguas residuales directamente en los ríos lo que incrementa la contaminación logrando afirmar que los resultados obtenidos coinciden con los estudios antes realizados ya que las aguas residuales por uso doméstico vertidas en el río Jaboncillal son las que aportan mayor contaminación mismas que sobrepasan los límites máximos permisibles.

Puntos de Monitoreo sobre el río Jaboncillal

Entre los puntos de monitoreo se definieron cuatro sitios los cuales se muestran en la figura 11, el primero se localiza a 0.065 Km antes de la descarga del río Jaboncillal al río Torres, el segundo a los 0.2 Km en el sitio llamado el cruce, el tercero a una distancia de 1.31 Km siendo identificado como Rosa Cubero y el último a 2.93 Km frente a la toma del AyA. La Figura 12 presenta gráficamente las concentraciones de los principales indicadores de contaminación a lo largo de la fuente de estudio en los puntos de interés descritos.

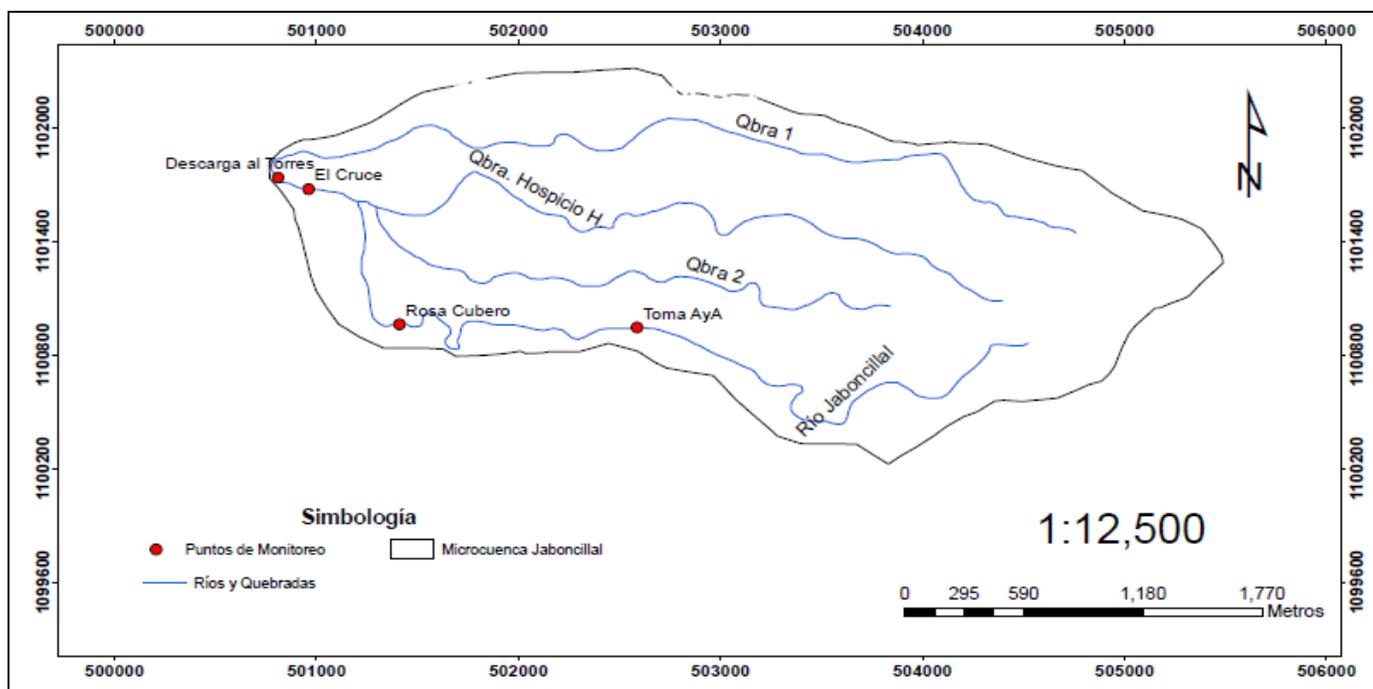


Figura 11 - Localización de los puntos de Monitoreo sobre el río Jaboncillal

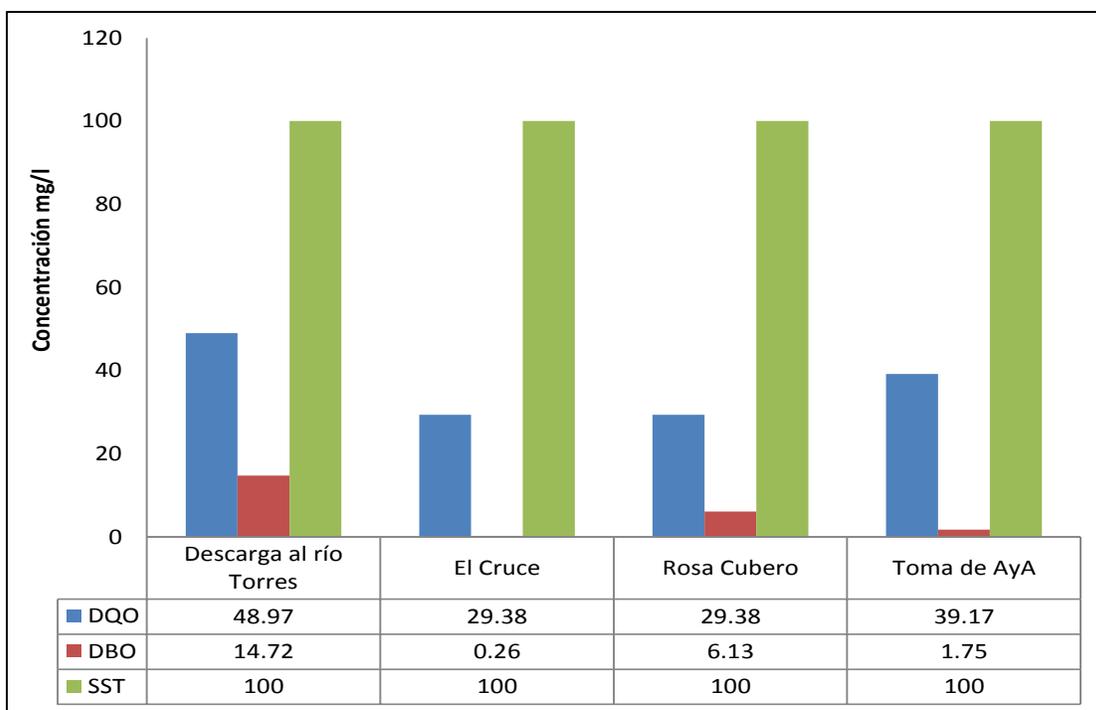


Figura 12 - Concentración de los tres parámetros evaluados en los puntos de monitoreo sobre el río Jaboncillal.

En términos de concentración, en los puntos de monitoreo la figura 12 muestra que existe un comportamiento de disminución en la concentración de DQO pero cabe resaltar que conforme la distancia disminuye al desembocar al río Torres el caudal aumenta por las descargas que son proporcionadas en las partes bajas y los niveles de concentración tienden a estar más diluidos. La diferencia de concentración (29.38 mg/l) encontrada entre el recorrido del cruce y el punto de descarga al río torres (48.97 mg/l) se puede ver afectado por algunas viviendas sobre este trayecto. En términos de DBO₅ se presenta un alto contenido en el punto reconocido como Rosa Cubero por lo que se puede estar aportando materia orgánica por las fincas en estas zonas mientras en términos de sólidos en todos los puntos se presentan una concentración de 100 mg/l.

Generalmente el sitio con mayor concentración en los tres parámetros es el punto donde se descarga al río torres el cual recibe el agua de todos los vertimientos realizados a lo largo del río. El caudal total para el río en estudio a inicios del periodo estacional de invierno es de 0.56 m³/s y el total de carga puntual aportada al río Torres es de 2377.83 Kg/día de DQO, 714.92 kg/día en DBO₅ y en sólidos suspendidos 4855.68 Kg/día.

En términos de calidad del agua, según el decreto N° 33903-MINAE en su capítulo II establece la clasificación y monitoreo de las aguas de cuerpos superficiales, estableciendo cinco clases de acuerdo a los parámetros complementarios para la determinación de la calidad. En la tabla 8 se muestra la concentración según los parámetros DQO y SST requeridos para cada clase. De acuerdo a ellas, la calidad del agua del río Jaboncillal en términos de DQO y SST se encuentra en la clase tres, ya que sus concentraciones (mg/l) rondan entre 29.38 y 48.97 para DQO y 100 para SST.

Tabla 8 - DQO y SST como parámetros complementarios para la determinación de la calidad de los cuerpos de aguas superficiales para las cinco clases establecidas en el reglamento N° 33903-MINAE.

Parámetros complementarios (Unidades)	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	< 20	20 a < 25	25 a < 50	50 a < 100	100 a 300
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	< 10	10 a 25	25 a 100	100 a 300	> 300

Fuente: Decreto N° 33903-MINAE.

Según el capítulo III y la clase definida anteriormente, los usos potenciales para los cuales es recomendable utilizar el agua del el río Jaboncillal se encuentran: generación hidroeléctrica, navegación, riego de especies arbóreas y forrajeras, además, se permite el abastecimiento de agua para consumo humano y utilización en actividades industriales destinadas en la producción de alimentos siempre y cuando este uso presente tratamientos avanzados de potabilización. No es recomendable usar este cuerpo de agua para actividades recreativas de contacto primario, acuicultura, como fuente de conservación y de equilibrio natural de las comunidades acuáticas así como para el riego de hortalizas o frutas que se consuman crudas y sin la eliminación de la cáscara. Para actividades pecuarias o abastecimiento de abrevaderos estas aguas no presentan limitaciones. En la tabla 9 se presenta el uso potencial y el tratamiento que se requiere para los cuerpos de agua ubicados en la categoría tres.

Tabla 9 - Uso potencial y tratamiento requerido para la clasificación de los cuerpos de agua en la clase tres.

Usos	Clase 3
Abastecimiento de agua para uso y consumo humano	Con tratamiento avanzado
Abastecimiento de agua para actividades industriales destinadas a la producción de algunos alimentos de consumo humano	Con tratamiento avanzado
Abastecimiento de agua para abrevadero y actividades pecuarias	Sin limitaciones
Actividades recreativas de contacto primario	No utilizable
Acuicultura	No utilizable
Fuente para la conservación del equilibrio natural de las comunidades acuáticas	No utilizable
Fuente para la protección de las actividades acuáticas	No utilizable
Generación Hidroeléctrica	Utilizable
Navegación	Utilizable
Riego de especies arbóreas, cereales y plantas forrajeras	Utilizable
Riego de plantas sin limitación, irrigación de hortalizas que se consuman crudas o de frutas que son ingeridas sin la eliminación de la cáscara.	No utilizable

Fuente: Decreto N° 33903-MINAE.

Según dos análisis biológicos realizados por Acueductos y Alcantarillados (AyA) en el mes de Julio del 2014 en el puente los coyotes y finca Rosa Cubero, localizados en la parte alta y media de la microcuenca respectivamente, se determinó el índice Biological Monitoring Working Party, modificado para Costa Rica (BMWP-CR), este índice se calcula sumando las puntuaciones asignadas a los distintos taxones encontrados en las muestras de macro-invertebrados, donde la puntuación es asignada en función del grado de sensibilidad a la contaminación.

Según los resultados obtenidos, la parte alta del río Jaboncillal se ubica en la clase dos con coloración verde, indicando aguas de calidad regular eutrofia de contaminación moderada y en la parte media se ubica en la clase tres con coloración amarillo revelando aguas malas y contaminadas, según el decreto N° 33903- MINAE (Mora 2014).

6.2.2 Caracterización de la contaminación difusa

La modelación de la microcuenca con SWAT, fue dividida en tres subcuencas y 75 unidades de respuesta hidrológica (HRU) considerando la pendiente, la cobertura del suelo y los suelos. Las tres subcuencas, SWAT las genera con el fin de hacer útil una simulación cuando existen diversas áreas de la cuenca que se ven afectadas por el uso del suelo o suelos bastante desiguales, de tal forma que impactan grandemente la hidrología del sector, logrando localizar los resultados de acuerdo al espacio (Uribe 2010).

Neitsch, Arnold, Kiniry y Williams (2005) mencionan, que las unidades de respuesta hidrológica (HRU) son agrupadas en áreas de tierra dentro de la subcuenca por tipo de cobertura, suelo y combinaciones de manejo. Las 75 unidades se agruparon según codificación SWAT, tipo de suelo (suborden Typic Hydrudand dividido en Fuertemente Ondulado y Moderadamente Ondulado), cobertura (FRST,RNGE, URLD e INVR) y pendientes en rango de 0-10, 10-25, 25-35, 35-50 y de 50-9999 esta última por defecto del modelo.

Durante el periodo de estudio se determinaron 15 combinaciones que están generando aportes mayores de 50 ton/ha de sedimentos, entre combinaciones principalmente de pastos y bosques con suelos moderada y fuertemente ondulados y pendientes que rondan entre 25, 35% y >50% (Tabla 10).

Tabla 10 - HRU con aportes mayores a 50 ton/ha.

HRU	Sedimentos (ton/ha)	Clasificación
4	76.337	FRST_TypicHydrudandMO_35-50
8	70.258	FRST_TypicHydrudandFO_25-35
9	110.412	RNGE_TypicHydrudandMO_50-9999
17	47.777	RNGE_TypicHydrudandMO_10-25
32	90.453	RNGE_TypicHydrudandFO_25-35
33	50.821	URLD_TypicHydrudandMO_25-35
37	80.468	URLD_TypicHydrudandMO_50-9999
39	121.767	RNGE_TypicHydrudandMO_50-9999
44	66.952	FRST_TypicHydrudandFO_35-50
45	97.403	FRST_TypicHydrudandFO_25-35
60	82.645	INVR_TypicHydrudandMO_35-50

62	56.518	INVR_TypicHydrudandMO_10-25
64	87.945	INVR_TypicHydrudandMO_50-9999
71	71.271	RNGE_TypicHydrudandMO_35-50
72	79.65	URLD_TypicHydrudandMO_35-50

La Tabla 11 presenta las características de cada subcuenca en relación a las coberturas del suelo y la figura 13 la localización de cada subcuenca en la microcuenca del río Jaboncillal.

Tabla 11 - Área (ha) según la categoría de uso para cada subcuenca.

Coberturas del suelo	Subcuencas			Total
	1	2	3	
Bosque	123.21	107.67	52.36	283.24
Invernadero	6.98	2.02		9.02
Potrero	111.86	137.38	75.35	324.59
Urbano	30.77	13.56	7.99	52.32
Total	272.82	260.53	135.7	669.15

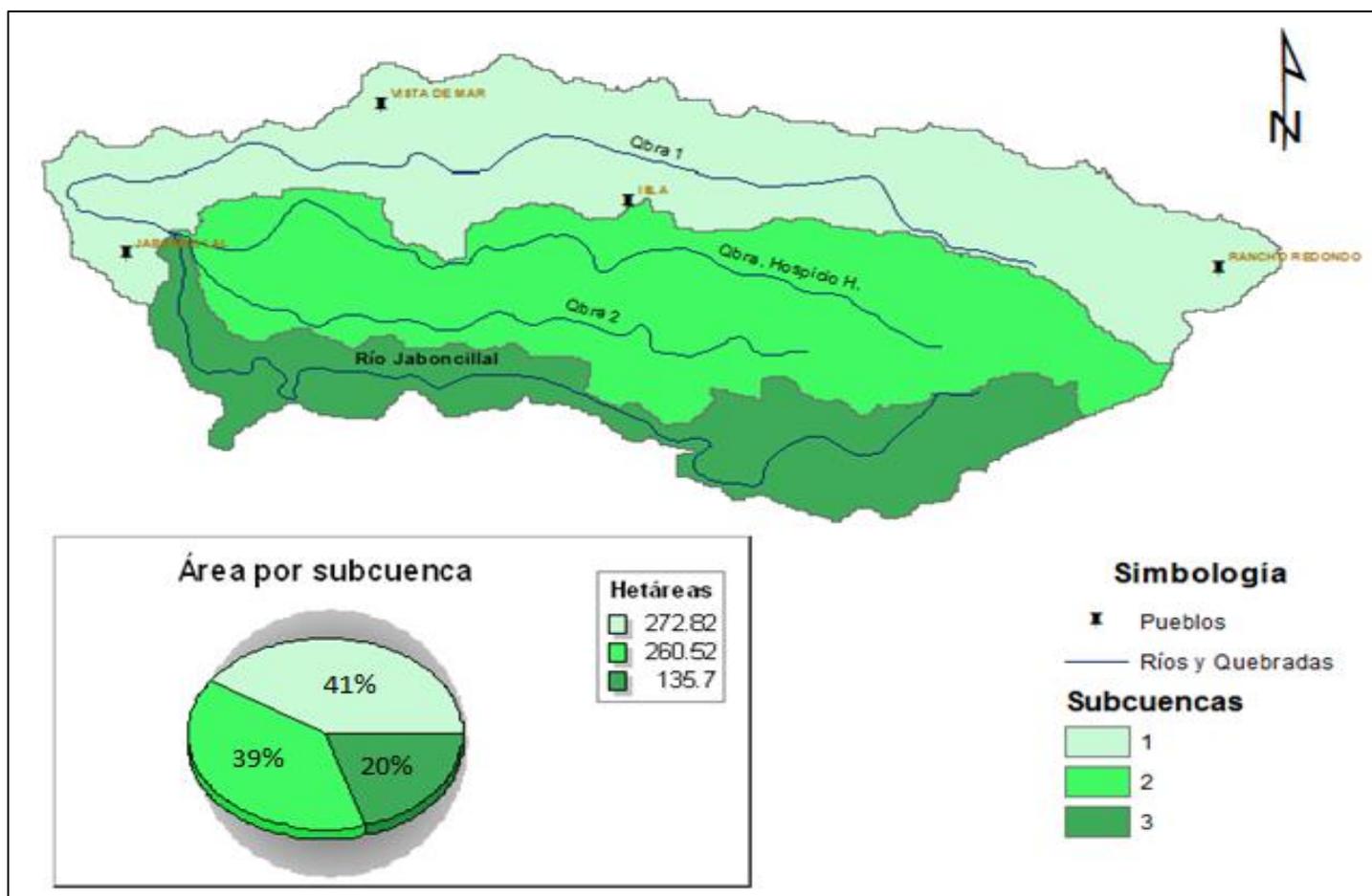


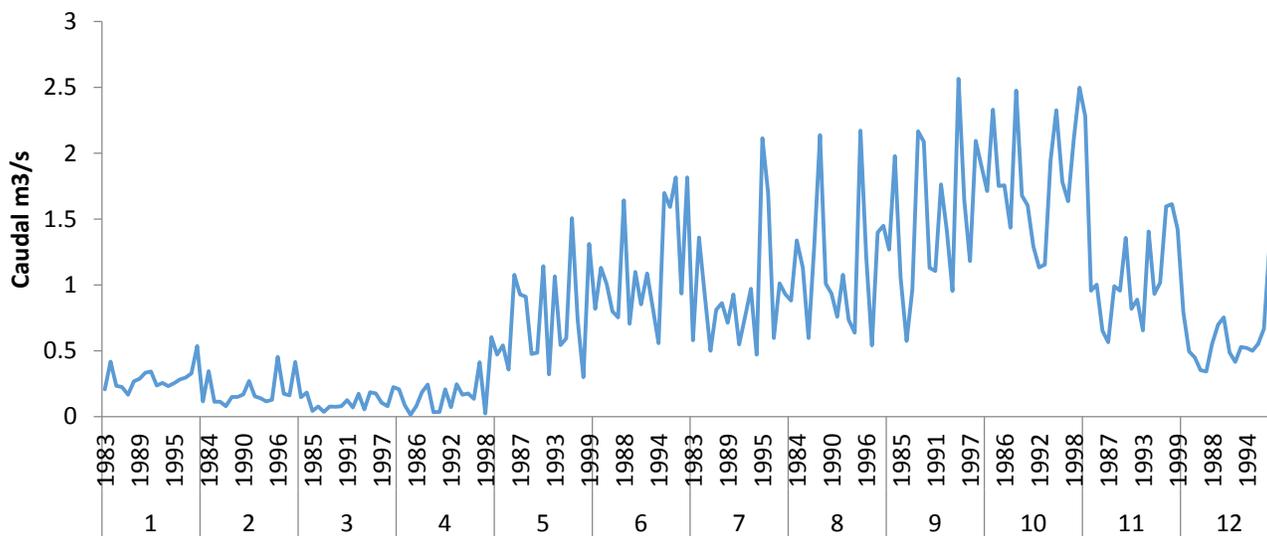
Figura 13 - Localización y área de cada subcuenca simulada por SWAT.

La subcuenca uno tiene una elevación que ronda entre los 1440-2040 msnm, presenta un área de 272.82 ha, es la subcuenca más grande, representan un 41% del área total. La subcuenca dos, la elevación ronda entre 1480-2020 msnm, con un área de 260.52 ha. La subcuenca tres es la más pequeña contiene 135.7 ha, es drenada por el río Jaboncillal y su elevación es de 1487 a 1920 msnm. Los usos de cada subcuenca se muestran en la tabla 12, logrando observar que únicamente la subcuenca tres es la que no presenta áreas con invernaderos.

Tabla 12 - Usos del suelo por cada subcuenca definida por SWAT.

Subcuenca 1	Subcuenca 2	Subcuenca 3
Bosque	Bosque	Bosque
Potrero	Potrero	Potrero
Invernadero	Invernadero	Urbano
Urbano	Urbano	

Con respecto a los caudales (Figura 14) para el periodo 83-99 existe un comportamiento normal logrando observar el periodo seco y lluvioso definido que presenta el pacifico central, donde el seco se extiende aproximadamente cinco meses comprendiendo mediados de diciembre hasta abril, y de abril a noviembre el periodo lluvioso, sin embargo, se debe tener en cuenta que se encuentran influenciados por la Zona de Convergencia Intertropical donde pueden existir eventos que provocan frentes fríos, bajas presiones, ondas del este, lluvias intensas, entre otros, en cualquier momento del año (Solano, Retana y Villalobos 2002). En los meses secos los caudales son menores estos varían de 0.033 m³/s a 0.412 m³/s, mientras en el periodo lluvioso rondan de 0.504 m³/s a 1.76 m³/s, los años donde se reportan altas precipitaciones y eventos atmosféricos varían entre 1.97 a 2.56 m³/s siendo este el caudal alcanzado en el mes de setiembre del año 1995 y el mayor caudal alcanzado durante el periodo de estudio.



Distribución de los meses según los años del periodo 1983-1999

Figura 14 - Comportamiento del caudal (m³/s) según la distribución de los meses de cada uno de los años del periodo 1983-1999.

6.2.2.1 Caracterización por sedimentos

Dentro de la contaminación difusa por sedimentos Bravo et al. (2013) afirma que uno de los problemas del agua se genera como el resultado del uso intensivo del suelo, además, Alfaro y

Salazar (2005) citan que la producción agropecuaria es considerada como una de las principales actividades responsables de la contaminación por sedimentos, debido a que genera usos excesivos del suelo provocando pérdidas por erosión y el consecuente arrastre a los cursos de agua.

En la microcuenca del río Jaboncillal, el mayor impacto provocado por sedimentos a lo largo del periodo 1983-1999 se encuentra en el mosaico de pastos y bosque, (Figura 15), la producción por medio de áreas de pastos en los diferentes años ha contribuido entre 37.5 a 44.2 ton/ha mientras en sus aportes más altas han contribuido desde 74.28 a 95.39 ton/ha, el bosque ha producido entre 13.57 a 26.95 ton/ha y en sus picos mal altos 45.5 a 65.84 ton/ha , debido principalmente a falta de adopción de prácticas de manejo de los suelos a lo largo de los años. Los sitios de pasto son manejados de manera extensiva, principalmente dedicados a la producción de forraje de corta y al pastoreo, a pesar de que se utiliza una rotación de 45 días se maneja un alta carga animal ocasionando graves problemas de sobrepastoreo, además, existe una carencia de prácticas adecuadas en el manejo de los potreros y una incorporación de zonas con altas y moderadas pendientes (WingChing, Cabalceta y Alvarado 2009).

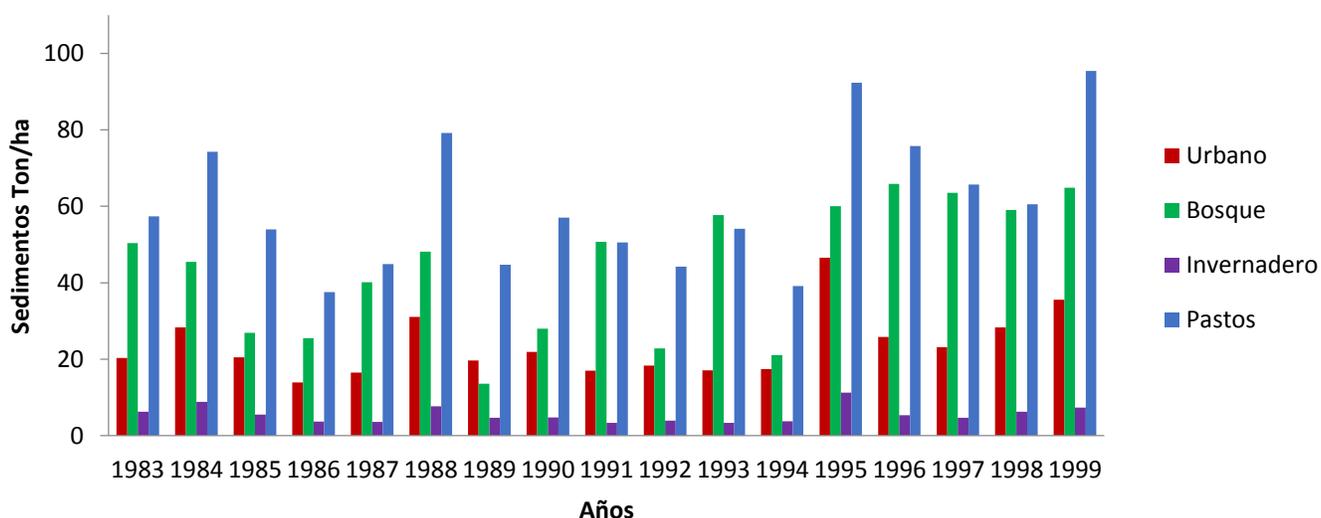


Figura 15 - Cantidad de sedimentos (Ton/ha) producidos por año, según el uso del suelo en la microcuenca del río Jaboncillal para el periodo 1983-1999.

Con respecto a la cobertura boscosa (42%), su distribución y pequeños parches distribuidos en el área han logrado contribuir con la erosión ya que han sido amenazadas por la intervención del ser humano logrando efectuar un cambio de uso del suelo, Baltodano (2009) señala, que

los sectores pertenecientes a la GAM, son áreas que presentan sobre-uso porque deberían tener cobertura forestal y están bajo otros tipos de cobertura, a la vez resalta que estas zonas deben recuperarse para realizar un manejo adecuado de cuenca ya que en estos momentos son responsables de generar algún grado de contaminación difusa (por erosión, plaguicidas, entre otros.).

Las zonas urbanas aportan a este tipo de contaminación por un amplia gama de contaminantes (sedimentos, materia orgánica, nutrientes, hidrocarburos, elementos patógenos (bacterias y virus), metales, pesticidas) los cuales son acumulados en la superficie en periodos secos y en eventos de precipitación son lavados y arrastrados hacia la red de colectores, (Momparker y Doménech 2008), a pesar de ellos en la microcuenca contribuyen en menor cantidad junto con los invernaderos ya que el mosaico urbano está muy ligado con el sector rural y no presenta grandes áreas de pavimentos, esto debido a que las hogares se distribuyen en las fincas, los pueblos son pequeños y el crecimiento de infraestructuras o viviendas se da en los márgenes de la red vial.

Aunado a la falta de prácticas de manejo en la zona, el problema de arrastre de sedimentos se ve ligado al comportamiento hidrológico de la microcuenca, principalmente en el periodo de lluvias donde la escorrentía y el contenido de humedad del suelo es decisivo en la magnitud de los eventos de máxima precipitación (Duarte 2006).

En la figura 16 se muestra la precipitación (mm) y los sedimentos (Ton/ha) para el periodo 1983-1999 donde los años 1983, 1984, 1988, 1995, 1998 y 1999, se contabilizan fenómenos meteorológicos que ocasionaron inundaciones en ciertos sectores del país principalmente en el área metropolitana. Estos disturbios atmosféricos provocaron lluvias durante varias horas y periodos que van de uno a varios días. Las lluvias se caracterizaron porque afectaron grandes extensiones, fueron de intensidad moderada pero la persistencia acumuló grandes cantidades de agua. Estas precipitaciones fueron originadas por depresiones y tormentas tropicales, huracanes y bajas presiones, todos contabilizados entre esos años.

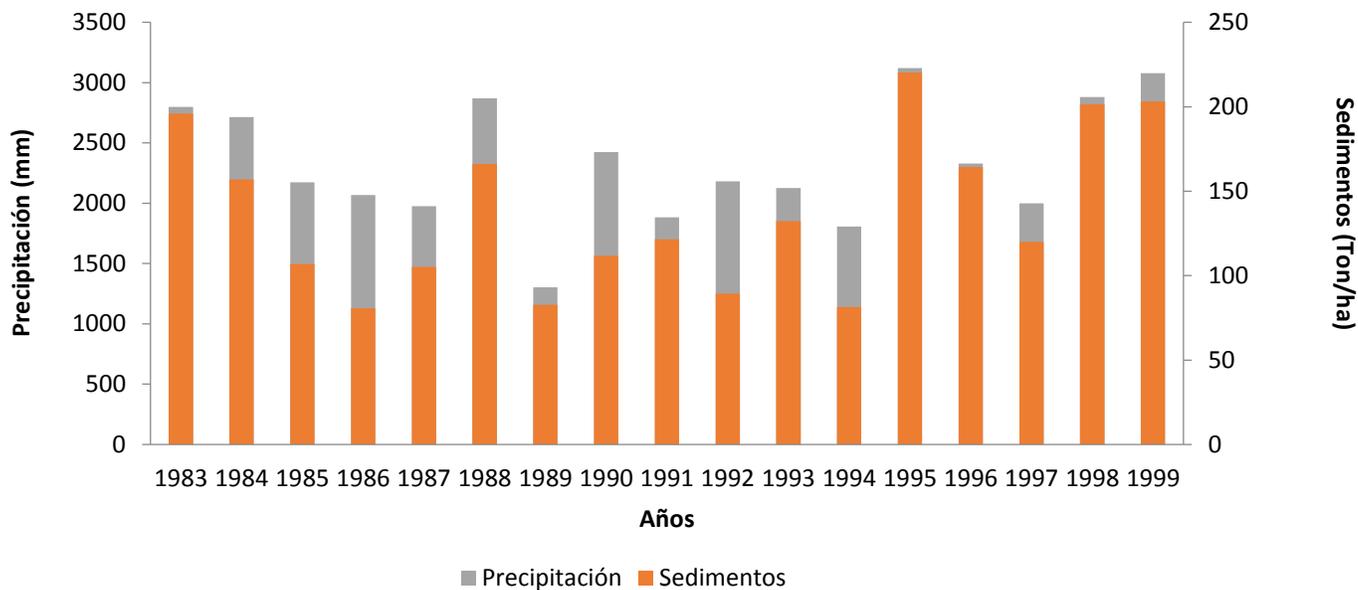


Figura 16 - Cantidad de sedimentos (Ton/ha) y la precipitación (mm).

Para los años 1995 y 1999 a pesar de las fuertes y constantes lluvias que se contabilizan para el valle central, se encontraron tres tormentas locales severas para el año 1995 y dos para 1999. Estas tormentas dejaron ciertos daños principalmente en el pacífico central ya que acumularon grandes cantidades de lluvia en periodos de pocas horas, acumulando más de 55 mm en una hora, lo que produjo inundaciones en las áreas urbanas, desborde de taludes, alcantarillas y cauces de ríos que atraviesan la ciudad logrando arrastrar gran cantidad de sedimentos por la red hídrica que atraviesa la GAM (Ramírez, 1988) citado por Solano, Retana y Villalobos (2002), razón por la cual existen altas tasas de sedimentos rescatando que aunado a ello también se conjugan la exposición y la sensibilidad del suelo a ser erosionado y que los pastos son las áreas que mayormente contribuyen debido a que el ganado en suelo con altos contenidos de humedad afectan directamente en la producción de sedimentos ya que la pisoteada produce deslizamientos removiendo la cobertura y dejando huella con suelos expuestos (WingChing, Cabalceta y Alvarado 2009).

A nivel de subcuenca en términos del aporte total de sedimentos (Ver figura17), la subcuenca uno es la que aporta mayor cantidad de sedimentos seguido de la dos y la tres y han aportado 2434.42 ton/ha en un periodo de 17 años comprendido entre 1983 a 1999.

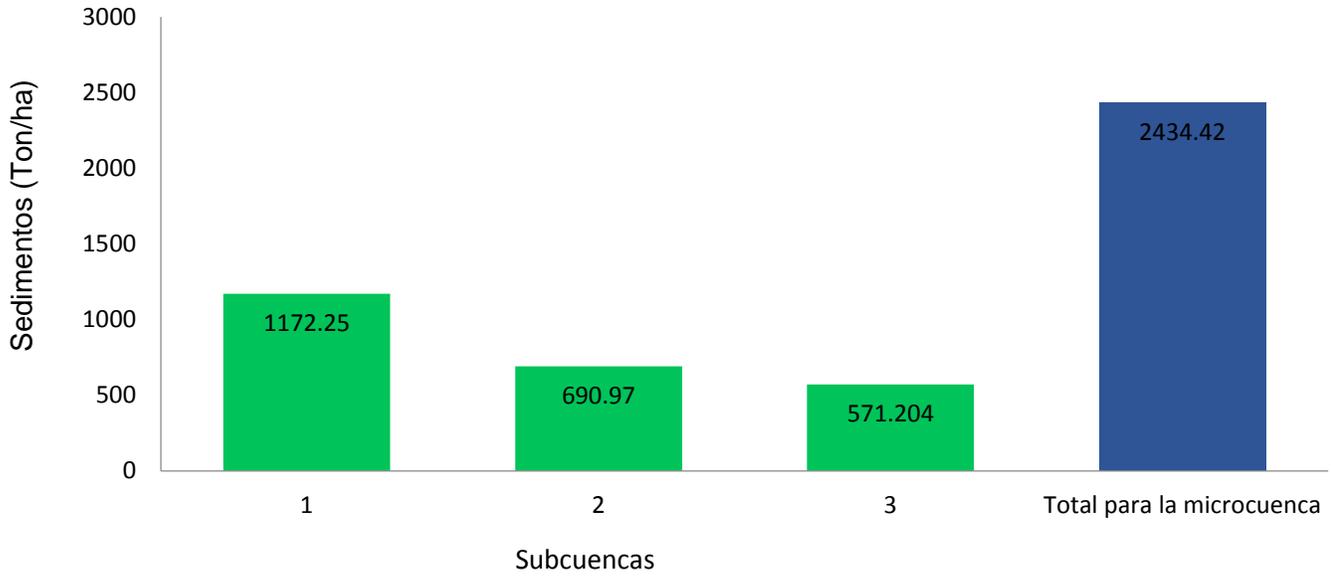


Figura 17 - Total de sedimentos aportados por subcuencia y el total para toda la microcuencia en el periodo 1983-1999.

Asociado con los usos para cada subcuencia, la Figura 18 presenta la cantidad de sedimentos que aportan cada uno de estos usos.

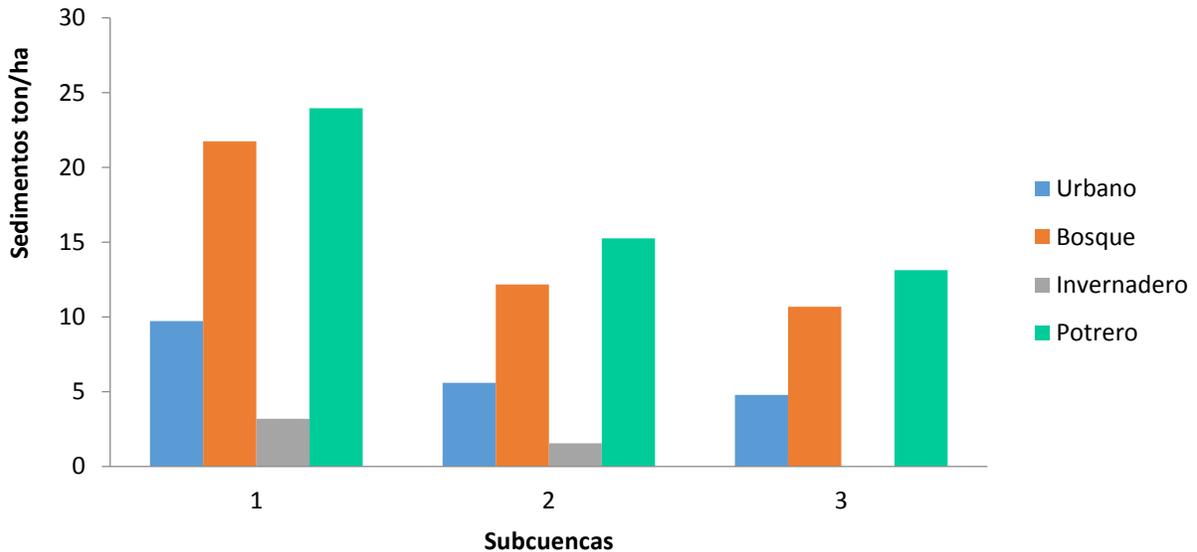


Figura 18 - Cantidad de sedimentos (Ton/ha) en cada subcuencia, según el uso del suelo en la microcuencia del río Jaboncillal para el periodo 1983-1999.

La subcuenca uno, a pesar de que posee mayor superficie cubierta por bosque (Tabla 11) es la que tiene mayor tasa de sedimentos. La figura (18) muestra que la categoría de uso de pastos es la que ha producido mayor impacto aportando 23.96 (ton/ha) en el periodo del año 1983 al 1999, mientras el sector de bosque 21.75 (ton/ha). Cabe resaltar que con respecto a las subcuencas 2 y 3 también posee mayor área en el sector urbano e invernaderos y que estas categorías aportan mayor tasa de sedimentos en esta área.

Para la subcuenca dos, los pastos contribuyen con 15.24 (ton/ha) de sedimentos y contienen mayor área (130.63 ha) respecto a las otras categorías, el bosque produce 12.16 (ton/ha) y cubre 107.67 hs, el sector de invernaderos se presenta solo en las subcuencas 1 y 2 y en esta subcuenca aporta en menor cantidad (1.54 ton /ha).

Subcuenca tres no presenta área de invernadero y contiene mayor área de potrero (75.35 ha). Con respecto al aporte en sedimentos es la que impacta en menor cantidad respecto a la 1 y 2. El sector urbano ha llegado a contribuir con 4.77 ton/ha en el periodo de 1983 a 1999.

6.2.2.2 Caracterización por nutrientes: N y P.

El poder erosivo de las tierras, el uso de los suelos y las precipitaciones, son factores que han logrado que los ríos arrastren sales, materia orgánica y sólidos en suspensión. A esto, la acción humana añade residuos provenientes de actividades domésticas, agrícolas y ganaderas, provocando que la capacidad de autodepuración que el agua posee no lo pueda asumir, por lo que se desencadenan procesos de contaminación (Arce 2003).

La mayor parte de nutrientes son eliminados por lixiviación en escorrentías superficiales, para la microcuenca del río Jaboncillal, los aportes de fósforo (P) al caudal han sido en menor cantidad a lo largo de los años (figura 19), esto estaría asociado al origen volcánico que presentan los suelos andisoles, ya que se caracterizan por presentar alta capacidad de fijación de P y retienen más del 85% que es aplicado como fertilizante, en forma contraria al nitrógeno (Pinochet 1999), citado por Alfaro y Salazar (2005).

Además, varios estudios han demostrado que el nitrógeno presenta mayor movilidad y que las pérdidas por lixiviación y arrastre pueden ser hasta cinco veces más alta que el fosforo en sitios bajo pastoreo, debido parcialmente al efecto de orina y la destrucción de la potreros razón por la

cual el pastoreo se conoce como una actividad de alto potencial contaminante ya que favorece los procesos de erosión y posee una alta cantidad de nutrientes, principalmente nitrógeno (N) y fósforo (P) transferidos al medio ambiente, tanto al aire como al agua (Jarvis, 2002) citado por Alfaro y Salazar (2005).

El río Jaboncillal aportó alrededor de 159 510 kg de nitrógeno (N) y 40 279 Kg de fósforo (P) al río Torres en el periodo 1983 a 1999 y los años (1983, 1988, 1995, 1998 y 1999) presentaron la mayor pérdida de estos nutrientes asociado a las altas precipitaciones.

Estas pérdidas han contribuido a desarrollar procesos de eutrofización en los embalses de las plantas hidroeléctricas Electriona I y II propiedad de CNFL, este proceso se conoce como el enriquecimiento de las aguas con nutrientes, a un ritmo tal que no puede ser compensado por la mineralización total, de manera que la descomposición del exceso de materia orgánica produce una disminución del oxígeno en las aguas profundas. Esto se ha considerado un problema en los embalses por la producción masiva de algas y plantas acuáticas, además, de los impactos en los procesos físicos, químicos y bióticos del ecosistema (Arteaga, Cuéllar, Ramírez, Ríos y Jaramillo, 2010).

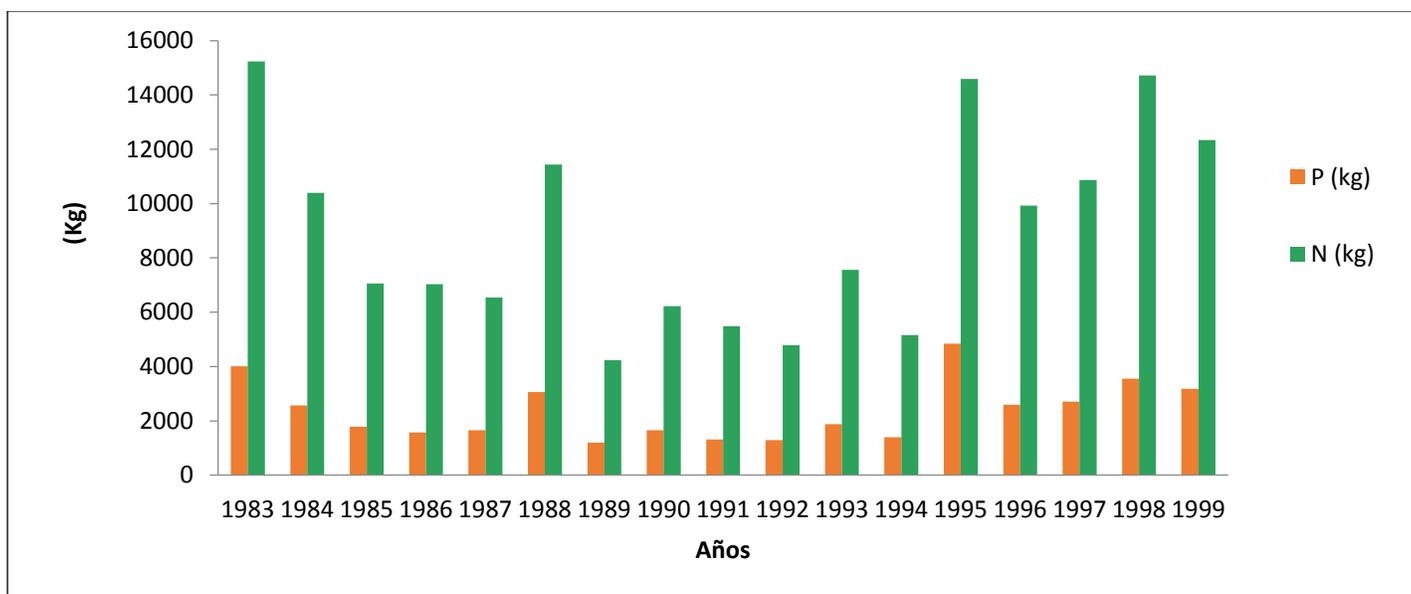


Figura 19 - Kilogramos de N y P en el río Jaboncillal aportado al río Torres en el periodo 1983-1999.

6.3 Estrategia de manejo para la microcuenca del río Jaboncillal

La contaminación se genera como consecuencia de las actividades que desarrolla el hombre para su supervivencia; el uso inadecuado de los recursos naturales ha deteriorado el ambiente limitando el uso benéfico de los recursos. La sostenibilidad de la producción agropecuaria y la integridad de los ecosistemas del país, están seriamente afectados por la degradación de la tierra y en consecuencia se requiere emprender acciones que propicien el manejo sostenible tomando en cuenta que el hombre juega tres roles distintos en ese proceso: es productor, es consumidor y es víctima (Guevara s.f.).

A partir de la caracterización de las fuentes de contaminación puntuales y difusas se propone una estrategia en la cual en primera instancia se prioriza las fuentes a atender en función de las cargas aportantes y posteriormente se plantea una estrategia de manejo ambiental la cual consiste en la implementación de acciones cuya finalidad es proponer un conjunto de medidas de prevención, corrección o mitigación que generen diversos planes o programas que ayuden a mitigar, reducir o eliminar los efectos negativos que se están produciendo (Guevara s.f.), orientadas en términos de los resultados. La propuesta general de manejo se presenta en la tabla 13.

Tabla 13 - Propuesta para la Estrategia de manejo ambiental en la microcuenca del río Jaboncillal.

Tipo de Contaminación	Problemática	Impacto	Acciones de Mitigación
Puntual	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de manejo de aguas residuales domésticas. • Altas cantidades de sólidos vertidos a los ríos y quebradas. 	<p>Alteraciones sobre el recurso hídrico superficial.</p> <p>Variaciones en la calidad del aire.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Manejo individual o colectivo de Aguas residuales domésticas. • Programas de GIRS. • Charlas de concientización sobre manejo y calidad de agua. • Campañas de recolección de basura.
Difusa	<ul style="list-style-type: none"> • Ausencia o poco manejo de áreas utilizadas en 	Alteraciones sobre el recurso hídrico superficial.	<ul style="list-style-type: none"> • Reforestación Tipos:

Tipo de Contaminación	Problemática	Impacto	Acciones de Mitigación
	<p>actividades de ganadería de leche.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sobrepastoreo. • Disminución de la cobertura boscosa y cambio uso del suelo. • Poco uso de técnicas de conservación de suelo. 	<p>Modificaciones sobre el recurso de suelo.</p>	<p>Restauración</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Cercas Vivas (implementado sistemas silvopastoriles). 2. Bloques en zonas de alta pendiente. <p>Protección</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. En las riberas de ríos y quebradas. 2. Bloques en los claros de bosque. <ul style="list-style-type: none"> • Uso de acequias de ladera o canales empastados. • Someter las áreas de bosque a pagos de servicios ambientales (PSA)

En términos de carga total de sólidos por cada tipo de contaminación, se encuentra un aporte promedio de 93 Ton/día por contaminación difusa y 0,0616 Ton/día por contaminación puntual, siendo prioritario la atención y el manejo de las áreas para el control del mayor aportante de carga contaminante. A continuación se describe la estrategia por cada tipo de fuente.

6.3.1 En contaminación puntual

Para la contaminación puntual, en las tabla 14 y 15 se priorizó de los vertimientos puntuales en términos de carga, determinando el grado de contaminación presente en unidades de masa por unidad de tiempo.

Tabla 14 - Prioridad de los puntos muestreados según la carga contaminante sobre el río Jaboncillal, evaluada con el indicador DQO Y SST.

Punto	DQO (Kg/día)	SST (Kg/día)
Vertimiento de ARD Cruce	14.81	21.6
Vertimiento de ARD Isla	13.07	15.7
Vertimiento de ARD Residencial Jaboncillal	8.92	12.6
Vertimiento Rebalse planta Mata Plátano	2.94	7.5
Vertimiento de finca Piza	0.68	2.3
Vertimiento de Quebrada Hospicio de Huérfanos	0.56	1.9

Tabla 15 - Prioridad de los puntos muestreados según la carga contaminante sobre el río Jaboncillal, evaluada con el indicador DBO₅.

Punto	DBO (Kg/día)
Vertimiento de ARD Residencial Jaboncillal	4.27
Vertimiento de ARD Cruce	3.73
Vertimiento de ARD Isla	3.42
Vertimiento Rebalse planta Mata Plátano	0.08
Vertimiento de finca Piza	0.00
Vertimiento de Quebrada Hospicio de Huérfanos	0.00

Cabe resaltar que de los vertimientos puntuales por descarga doméstica, el que aporta mayor cantidad es el vertimiento del residencial Jaboncillal el cual aporta 21.6 kg/día de SST y 14.81 kg/día de DQO. En segundo lugar se encuentra el cruce con 15.7 kg/día de SST y 13.07 kg/día de DQO y en el puesto tres la Isla con 12.6 kg/día de SST y 8.92 kg/día de DQO.

Fuera de los vertimientos por agua residual doméstica, el vertimiento de la planta Mata Plátano aporta 7.5 kg/día de SST y 2.94 kg/día de DQO y en menores cantidades la finca piza y el vertimiento por la quebrada Hospicio de Huérfanos las cuales contribuyen con 2.3 y 1.9 kg/día de SST y 0.68 y 0.56 kg/día de DQO respectivamente.

Según el indicador DBO₅ el residencial contribuye con 4.27 kg/día seguido de Isla con 3.73 kg/día encontrándose en menor cantidad la muestra ocho con tan solo 0.08 kg/día, mientras los puntos cinco y cuatro no aportan cargas por medio de este parámetro.

En términos de carga total puntual (Kg/día) aportada al río Jaboncillal por el tipo de vertimiento el agua residual doméstica es la presenta un alto aporte en los tres parámetros evaluados (Figuras 20,21 y 22).

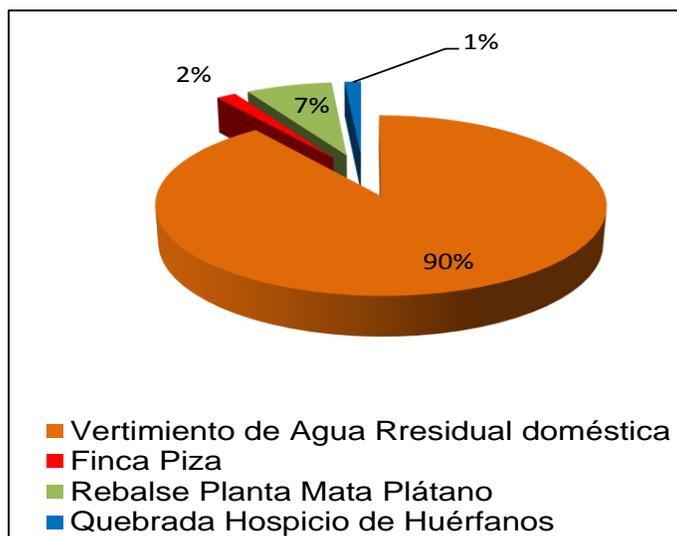


Figura 20 - Carga total de DQO (Kg/día) según el tipo de agua residual.

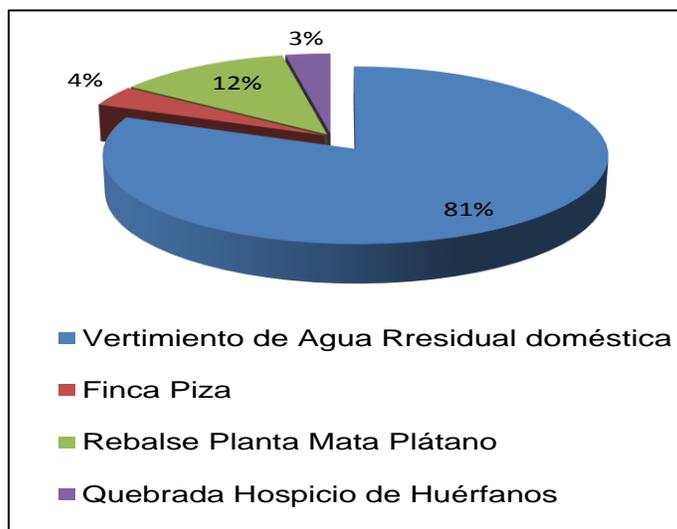


Figura 21 - Carga total puntual de SST (Kg/día) según el tipo de agua residual.

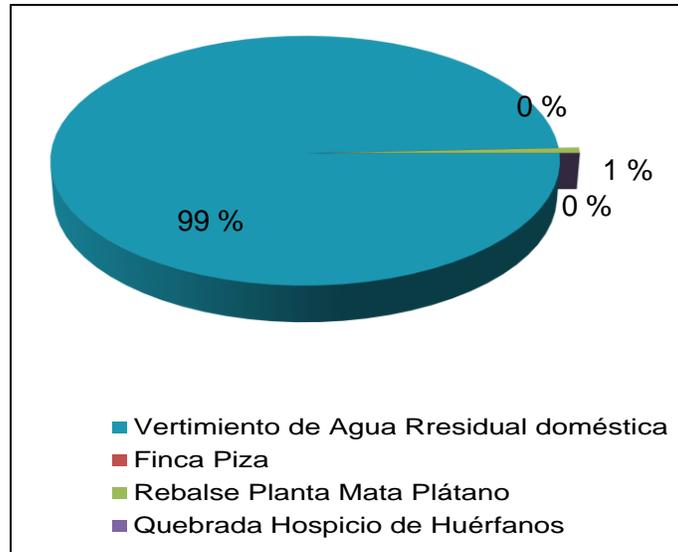


Figura 22 - Carga total puntual de DBO₅ (Kg/día) según el tipo de agua residual.

Dentro de esta contaminación, el manejo de aguas residuales domésticas individuales o colectivas será fundamental para lograr disminuir las concentraciones y la carga contaminante que hoy, son servidas sin ningún tratamiento previo al río Jaboncillal.

Para ello, se deben considerar plantas de tratamiento o procesos que ayuden a remover total o parcial los contaminantes del agua antes de ser transportados al río, utilizando técnicas específicas de manejo a bajos costos y alta eficiencia principalmente en los sitios el Cruce, Isla y el vertimiento de las aguas del residencial Jaboncillal.

Se propone trabajar con los desechos sólidos implementando el programa GIRS, talleres de manualidades para reutilizar los desechos, con la finalidad de separar adecuadamente los residuos, aprovechar del valor intrínseco de cada uno de ellos y evitar que su inadecuado manejo impacte los ecosistemas (aire, agua y suelo).

Se deben desarrollar charlas con el propósito de dar a conocer la problemática existente en la microcuenca y a la vez promover campañas de recolección de basura para tratar de que los habitantes a pesar de sus diversas formas de sobrevivencia y de su cultura, logren tomar conciencia ya que son parte importante en la solución del problema, donde pequeños cambios en los resultados de sus acciones son de importancia para disminuir los impactos ocasionados en la zona.

6.3.2 En contaminación difusa

Las cargas contaminantes totales de sedimentos por sub-área de la cuenca, identificadas con el modelo SWAT se presentan en la tabla 16.

Tabla 16 - Priorización en términos de aporte de sedimentos para cada sub-área de la cuenca del río Jaboncillal entre el año 1983 a 1999.

Área de influencia	Área (Ha)	Aporte de sedimentos 1983 a 1999		Aporte de sedimentos promedio (Ton/día)
		Ton/ha	(Ton)	
Área 1	272,82	1172,25	319.813	51,5
Área 2	260,52	690,97	180.012	29,0
Área 3	135,70	571,20	77.512	12,5
Sumatoria	669,04	2.434	577.337	93,0

La definición de áreas de reforestación y la implementación de sistemas silvopastoriles es fundamental para disminuir los sedimentos aportados ya que son los que producen mayor contaminación.

Como resultado de las Unidades de respuesta hidrológica para disminuir las tasa de sedimentos se propone: trabajar bajo 3 combinaciones (Tabla 17) y 4 HRU, las cuales tiene mayores aportes, la figura 23 presenta la localización de cada uno de ellas espacialmente.

Tabla 17 - Características de las HRU que aportan mayor cantidad (ton/ha) de sedimentos en la microcuenca de río Jaboncillal.

HRU	Combinación			Área (ha)
	Cobertura	Suelo	Pendiente	
9	Pasto	Moderadamente ondulado	>50	5.85
32	Pasto	Fuertemente ondulado	25-35%	0.81
39	Pasto	Moderadamente ondulado	>50	9.29
45	Bosque	Fuertemente ondulado	25-35%	2.81

Considerando las áreas de potrero y los sitios con moderadas y altas pendientes (25-35 y >50), es importante realizar una reforestación de restauración y canales empastados como técnica de conservación de suelo con el propósito de aumentar la cobertura y evitar áreas expuestas que sean sensibles a los procesos de erosión, mientras en las zonas con pastos se propone trabajar con cercas vivas, ya que nos conlleva a laborar con sistemas silvopastoriles combinando la producción pecuaria y las especies arbóreas bajo un sistema de manejo integral buscando una alternativa de producción sostenible que permita reducir el impacto ambiental de los sistemas tradicionales.

Además de ello, a nivel de cuenca es importante enriquecer las riberas de los ríos y los claros de bosque para aumentar la densidad de la cobertura y proteger los ríos del área logrando conservar el recurso hídrico y las especies de fauna que enriquecen la biodiversidad de la zona, esto se puede lograr sometiendo estas áreas a pago de servicios ambientales, de esta manera se protege el áreas, se prohíbe el cambio de uso del suelo y se genera un pequeño incentivo para el productor.

Para poder establecer las especies óptimas, se sugiere realizar un diagnóstico de los sitios que pueden estar degradados y un inventario de las especies de la zona para poder recomendar acertadamente aquellas que deben incorporarse a la estrategia. Las especies a recomendar deben poseer características como: ser nativas, que se acoplen a la temperatura, el suelo, las precipitaciones para lograr un óptimo desarrollo, además, que sean de doble propósito (forrajeras, de importancia para la fauna, que proporcionen belleza escénica, que protejan el recurso hídrico y que cumplan una alternativa económica para el productor).

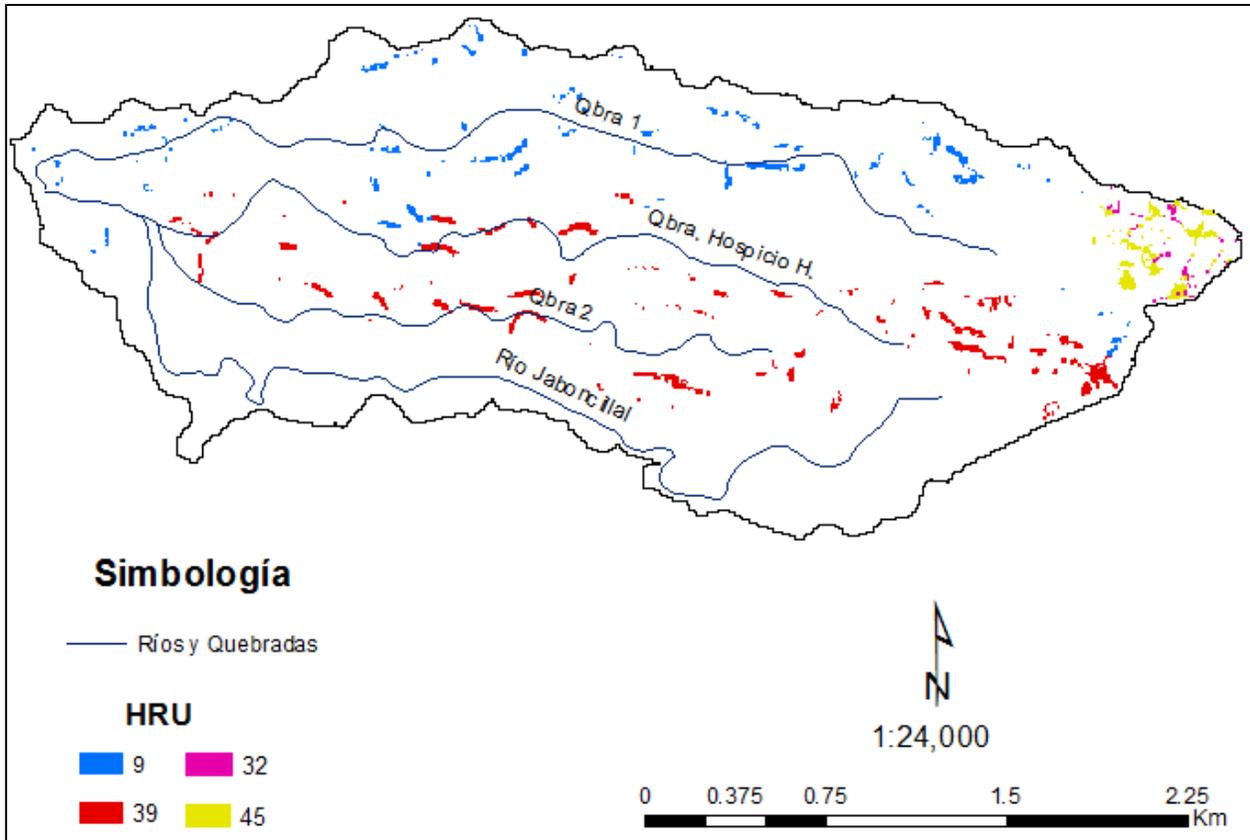


Figura 23 - Localización de las áreas propuestas a reforestar producto de las HRU según la simulación SWAT.

7. Conclusiones

La microcuenca del río Jaboncillal se delimito por medio del programa SWAT y mide aproximadamente 669.15 ha, dentro de las coberturas que posee, los pastos cubre el 49%, seguidamente por bosques (42%), mucha de esta áreas presentan pendientes que rondan entre los 25% y 35% encontrando sectores con inclinaciones mayores a 50%, el área urbana representa un 8% y tan solo un 1% el área de invernaderos. El trayecto de bosque en la parte alta de la cuenca es principalmente la reserva los Coyotes y las áreas de pasto son utilizadas en su mayor parte como áreas de pastoreo.

La contaminación que presenta es proveniente de fuentes difusas y puntuales. El río Jaboncillal transportó alrededor de 20272.05 ton producidas por contaminación difusa y arrastró el 98% (3234.81 kg/día) mientras un 2% es transportado producto de la contaminación puntual (61.06 kg/día).

Las fuentes difusas se asocian a las áreas de pastos por la alta producción de sedimentos (1047 ton/ha) ya que son áreas dedicados a la ganadería de leche y muchas presentas sobrepastoreo.

De las subcuencas definidas por SWAT, el uso del suelo que aporta mayor cantidad de sedimentos en ellas son los pastos, mientras el invernadero es el que aporta en menor cantidad (94 ton/ha), este último se distribuye únicamente en la subcuencas 1 y 2 y ocupa un área de 9 ha.

Las precipitaciones y la cobertura son un factor importante en la producción de sedimentos, en la microcuenca las áreas de potrero, con suelo andisoles bajo el suborden Typic Hydrudand caracterizado como moderada y fuerte mente ondulado y altas pendientes, son las que han aportado mayores tasa de sedimento a través del tiempo y en los años donde se han reportado fuertes precipitaciones y eventos atmosféricos, mismos que han ayudado a la producción de las altas tasa de erosión.

Dentro de la contaminación puntual, las aguas residuales domésticas son las que aportan mayor contaminación según los tres parámetros evaluados y sobrepasan los límites máximos permisibles. En términos de carga (Kg/día) las aguas residuales aportan en DQO un 90% (49.88 kg/día), los SST 81% y el DBO₅ un 99%, respecto a los vertimientos de la finca Piza, el

rebalse y la quebrada Hospicio de Huérfanos. Cabe resaltar que en términos de DBO_5 la finca Piza y la quebrada Hospicio de Huérfanos no aportan contaminación probablemente por el poco aporte de materia orgánica no biodegradable.

En términos de estimación de caudales, nutrientes y sedimentos para la microcuenca, el modelo SWAT fue ajustado y a pesar de que no se lograron encontrar datos para su validación, sus resultados son confiables y precisos ya que este modelo presenta una alta eficiencia a la hora de modelar al ser basado en estadística y bajo fórmulas específicas para realizar cada simulación. Define la cuenca y la delimita mediante modelos de elevación, utiliza la fase terrestre del ciclo hidrológico y debido a las precipitaciones controla el equilibrio del agua, trabaja bajo información específica de la zona en estudio. Además, es basado en varios modelos con constantes mejoras, desde los años noventa que fue creado ha experimentado revisión y expansión continua de sus capacidades (Mankin, Srinivasan y Arnold 2010).

La propuesta de manejo se ha dirigido a las áreas identificadas con altas tasa de erosión las cuales corresponden a cuatro categorías de HRU representadas por las unidades 9, 32, 39 y 45 las cuales presentan combinaciones de bosques y pastos con suelos moderada y fuertemente ondulados y con pendientes de varían entre 25 a 35% y mayores a 50%, esto con el fin de contrarrestar los efectos producidos en las zonas de bosque y potrero principalmente al ser las zonas que mayor impactan la contaminación difusa por sedimentos y contribuyen al aporte de nutrientes de N y P.

Con respecto a la contaminación puntual se debe trabajar con actividades que integren las comunidades por medio de charlas con temas de interés ambiental y que logren concientizar a la población del problema ambiental que se presenta en la microcuenca, así como talleres de manualidades que enseñen a reutilizar los residuos.

Para el tratamiento de aguas residuales se plantea tratar las aguas ya sea colectiva o individualmente por medio de plantas de tratamiento o diferentes métodos que logren reducir las cargas antes del vertimiento en el río.

8. Recomendaciones

Dar a conocer las fuentes provenientes y los aportes de contaminación por medio campañas de capacitación en los diferentes asentamientos urbanos para concientizar a la población.

Realizar análisis fisicoquímicos al menos dos veces al año en las épocas secas y lluviosas para poder comparar la concentración (mg/l).

Realizar planes de restauración ecológica para poder determinar especies de importancia para la zona y potencializar los viveros forestales de la CNFL para la producción de estas especies, logrando realizar planes de reforestación en los sitios con alta vulnerabilidad a la erosión.

Centrar fuerzas de trabajo en las unidades de respuesta hidrológica que proporcionan mayores cantidades de sedimentos.

Que las construcciones del sector urbano se establezcan tomando en cuenta el plan regulador de la zona, logrando que el desarrollo de este sea de bajo impacto y no cause cascos urbanos de alta densidad.

Trabajar conjuntamente entre las instituciones AyA, CNFL, Ministerio de Salud y Municipalidad con el fin de unir fuerzas y recursos para que sus labores no sean afectadas por el impacto de la contaminación actual.

Para futuros proyectos en el sector agrícola, se recomienda el desarrollo de esta actividad en las zonas que presenten aptitud según lo defina el plan regulador. Además, es de importancia implementar las técnicas de conservación de suelos principalmente que la siembra se realice en contorno con manejo de aguas en canales empastados en las áreas que presenten moderadas y altas pendientes. Es importante definir rotación de cultivos y que estos no sean de carácter intensivo ni extensivo para lograr conservar este recurso, evitando la exposición del suelo a la erosión.

9. Referencias

- Alfaro, M., y Salazar, F. (2005). Ganadería y Contaminación Difusa, Implicancias para el Sur de Chile. *Agricultura Técnica*, 65(3), 330-340.
- Almeyda, J. (2014). Manejo y Alimentación de vacas productoras de leche en sistemas intensivos (parte II). Recuperado de <http://www.actualidadganadera.com/articulos/manejo-alimentacion-de-vacas-productoras-de-leche-sistema-intensivos-parte-dos.html>
- Arce, O. (2003). Eutrofización de cuerpos de agua. Química del agua. Recuperado de <http://www.fcyt.umss.edu.bo/docentes/29/documentos/Eutrofizacion.Pdf>.
- Arteaga, J., Cuéllar, W., Ramírez, D., Ríos, S. y Jaramillo, S. (2010). Manejo de plantas acuáticas invasoras en embalses de EMP. Caso: buchón de agua (*eichhornia cassipes*) en el embalse Porce II, Antioquia-Colombia
- Ballesteros, P. (2003). Determinación del periodo de calentamiento en simulaciones de estado estable. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia.
- Baltodano, J. (2009). Programa Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Decimoquinto Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible.
- Bravo, L., Saldaña, P., Izurieta, J., y Mijangos, M. (2013). La importancia de la contaminación difusa en México y en el mundo. 10 pp
- Barajas, M. G. (2002). Agua residual. Capitulo tres, revisiones bibliográficas. Recuperado de https://scholar.google.com/scholar?rlz=1C1CHWA_enCR617CR617&espv=2&bav=on.2,or.r_cp.r_qf.&bvm=bv.82001339,d.eXY&ion=1&biw=1366&bih=628&um=1&ie=UTF-8&lr&q=related:T81z_1pzQVUmFM:scholar.google.com/

Bosque, J. (1992)- Sistemas de Información Geográficos. Ed. Rialp. Madrid.

Campbell et al. (2004). Diffuse Pollution: An Introduction to the Problems and Solutions. IWA Publishing. Cornwall, United Kingdom. 322 pp

Calvo, J., Jiménez, J., González, E., Pizarro, F, Jiménez. (2008). Determinación preliminar del caudal ambiental en el río Tempisque, Costa Rica: el enfoque hidrológico con limitación de datos. Kurú, 5 (13).

Castaño, C. (2010). Manejo Forestal sostenible en Colombia. Retos y perspectivas. Colombia.

CATIE. (2012). Guía metodológica para la construcción de una Agenda Territorial Común. (Informe Núm. 51). Costa Rica.

Cambapadall, C. (2000). Desarrollo de un Sistema Moderno de Nutrición y Alimentación para Vacas Lecheras. Centro de Investigación en nutrición animal. Asociación Americana De Soya.

Comisión Nacional del Mar (CONAMAR). 2013. Política Nacional del Mar: Costa Rica 2013-2028. San José, Costa Rica.

Clesceri, L. S., Greenberg, A. E. y Eaton, A. D. (1998). Standard methods for the examination of water and wastewater (Vol. 20). American Public Health Association, Washington, DC.

Corrales, L. (2010). Para Centroamérica, E. D. C. C. Efectos del cambio climático. CUARTO INFORME ESTADO DE LA REGIÓN.

Contraloría General de la República. (2013). Informe acerca de la eficiencia del Estado para garantizar la calidad del agua en sus diferentes usos (2013).

D. Mora, comunicación personal, correo electrónico, 8 de setiembre de 2014

- Dobles, R. (2008). Política hídrica nacional y la gestión del agua como recurso y como servicio. National water policy and water management as a resource and service.
- Dong, X. (2013). Moulding SWAT model for chines Qingjiang river for rainfall-runoff simulations.
- Duarte, A. (2006). Contaminación difusa originada por la actividad agrícola de riego a la escala de la cuenca hidrográfica. Córdoba : Universidad. ETSIAM.
- Feoli, S. (2013). Cartografía biofísica- microcuenca del río Jaboncillal. Power Point. San José, Costa Rica. Sin publicar
- García González, N. (2014). Aplicación de las herramientas SIG al estudio de la cuenca del Río Nalón. (Tesis de maestría, Universidad de Oviedo). Recuperado de http://dspace.sheol.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/28025/4/TFM_Nerea%20Garc%C3%ADa%20Gonz%C3%A1lez.pdf
- Guevara, E. s.f. Criterios para la regulación y control de la contaminación ambiental. Universidad de Carabobo.
- Gaspari, F., Senisterra, G., y Marats. R. (2006). Relación precipitación-escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso del suelo. Cuenca modal del sistema serrano de La Ventana, Argentina.
- Hernández, M. (2013). Evaluación del programa de Educación Ambiental Formal “aula al aire libre”, Reserva los Coyotes. Actualidades Investigativas en Educación, 2(10). Recuperado de <http://revista.inie.ucr.ac.cr/ediciones/controlador/Article/accion/show/articulo/evaluacion-del-programa-de-educacion-ambiental-formal-aula-al-aire-libre-reserva-los-coyotes.html>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2012). X Censo Nacional de Población y IV de Vivienda 2011. Resultados Generales. San José. Costa Rica.

- Jarvis, S.C. (2002). Environmental impacts of cattle housing and grazing. En Kaske, M. Scholz. H & M. Höltershinken, M. (eds.). Recent developments and perspectives in bovine medicine (pp. 18-23). Germany
- Jouravlev, A., y Solanes, M. (2006). *Integrando economía, legislación y administración en la gestión del agua y sus servicios en América Latina y el Caribe* (Vol. 101). United Nations Publications.
- Marín, A. Osés, M. (2013). Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales en el proceso de lodos activados. Tomo I. CEA, Jalisco.
- Mara, D. (2003). Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries.
- Mihelcic, J. R. y Zimmerman, J.B. (2011). Ingeniería ambiental: fundamentos, sustentabilidad, diseño. Calidad del agua (309-353). New Jersey. USA.
- Mankin, K. R., Srinivasan, R., & Arnold, J. G. (2010). Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model: Current developments and applications. Trans. ASABE, 53(5), 1423-1431.
- Ministerio de Ambiente y Energía. Decreto Ejecutivo N° 33601- MINAE, Reglamento de vertido y Reuso de Aguas Residuales. Boletín Oficial la Gaceta, lunes 19 de marzo de 2007, núm 55.
- Morel, A., y Diener, S. (2006). Greywater Management in Low and Middle-Income Countries, Review of different treatment systems for households or neighbourhoods. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag). Dübendorf, Switzerland.
- Momparler, S., y Doménech, A. (2008). Los sistemas urbanos de drenaje sostenible: una alternativa a la gestión del agua de lluvia. Revista Técnica de Medio Ambiente. C&M Publicaciones, 124, 92-104.
- Novotny, V. (2003). *Water Quality. Diffuse Pollution and Watershed Management*, John Wiley & Sons, Inc., New York.

- Neitsch, L., Arnold, J., Kiniry, J. y Williams, J. (2005). Herramienta de Evaluación de suelo y Agua. Documentación Teórica.
- Pérez, E. G., Falcón, N. L., Guevara, F. R., Guevara, J. F. E., y Bianco, G. CRITERIOS PARA LA REGULACIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL.
- Pérez, F. (s.f.). La importancia de aprovechar la pequeña hidroenergía. Recuperado de <http://www.solar.cu/Biblioteca/Energia/Energia45/HTML/articulo03.htm>
- Peña, J. (2006). Sistemas de Información Geográfica aplicadas a la gestión del territorio. Geografía Norte Grande, 7-101. Recuperado de http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-34022006000200007&script=sci_arttext
- Perdomo, C. Barbazán, P. (s.f). Nitrógeno. Área de suelos y agua. Catedra de fertilidad. Universidad de la República. Uruguay.
- Plan Nacional de Desarrollo Forestal (PNDF) 2011-2020 Costa Rica. (2011). Ministerio de ambiente, Energía y Telecomunicaciones, MINAET. 1 ed. San José, Costa Rica.
- Ríos, N. (2014). Material del III curso Internacional Uso del Modelo SWAT como una herramienta para Manejo de Cuencas Hidrográficas.
- S, Feoli, comunicación personal, oral, 15 de diciembre de 2014
- Solano, J., Retana, J., y Villalobos, R. (2002). Inundaciones. Gestión de Desarrollo, Instituto Meteorológico Nacional, San José, Costa Rica.
- Solórzano N. (2007). Metodología, Estrategia y aspectos técnicos en el manejo conservacionista de cuencas. Revista Biocenosis, Vol 20 (1-2).
- Spiegel, J., y Maystre, L. Y. (2012). Control de la contaminación ambiental. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. España.

- Segura, B. O. (2013). Agenda ambiental del agua en Costa Rica. MINAE. San José, Costa Rica.
- Torres, E., Mejía, E., Cortés, J., Palacios, E. y Exebio, A. (2005). Adaptación de un modelo de simulación Hidrológica a la cuenca de río Laja, Guanajuato, México.
- USDA. (2006). Claves para la Taxonomía de Suelos. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Campus Montecillo, México.
- Uribe, N. (2010). Conceptos básicos y guía rápida para el usuario: versión SWAT2005. Recuperado de <https://www.google.com/search?q=conceptos+b%C3%A1sicos+y+guia+r%C3%A1pida+para+el+usuario+version+SWAT2005>
- WingChing, R., Cabalceta, G., Alvarado, A. (2009). Impacto del pastoreo con ganado Holstein y Jersey sobre la densidad aparente de un Andisol. Agronomía Mesoamericana, 20(2), 371-379.
- Vente Chow. (1994). Hidráulica de canales abiertos. Mc Graw-Hill, 667 p.
- Zambrano, D.A. (2012). Minimización y prevención como estrategia para el control de la contaminación por aguas residuales municipales en la zona de expansión de Cali. (Tesis de Maestría). Universidad del Valle. Santiago de Cali.

Anexos

Anexo 1

Base de datos de suelo de la microcuenca del río Jaboncillal

OBJECT ID	MUID	SEQN	SNAM	S5ID	CMPPCT	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	SOL_CRK	TEXTURE
1	O	10	TypicHydrudandMO	O	3	4	C	200	0.5	0.5	Faa
2	O	0	TypicHydrudandFO	O	0	3	C	400	0.5	0.5	A

SOL_Z1	SOL_BD1	SOL_AWC1	SOL_K1	SOL_CBN1	CLAY1	SILT1	SAND1	ROCK1	SOL_ALB1	USLE_K1	SOL_EC1
1200	2.68	0.13	12.94	3.77	29.2	20.3	50.5	0	0.04	0.13	0
1200	2.4	0.12	2.44	2.78	44	23	33	0	0.09	0.11	0

SOL_Z2	SOL_BD2	SOL_AWC2	SOL_K2	SOL_CBN2	CLAY2	SILT2	SAND2	ROCK2	SOL_ALB2	USLE_K2	SOL_EC2
600	2.77	0.13	10.62	2.4	28	24.3	47.7	0	0.1	0.12	0
1150	2.7	0.13	2.49	2.1	42	25	33	0	0.14	0.11	0

SOL_Z3	SOL_BD3	SOL_AWC3	SOL_K3	SOL_CBN3	CLAY3	SILT3	SAND3	ROCK3	SOL_ALB3	USLE_K3	SOL_EC3
700	2.7	0.13	0.64	0	51.7	26	22.3	0	0.6	0.15	0
1200	2.5	0.12	0.52	0	49	17	37	0	0.6	0.14	0

SOL_Z4	SOL_BD4	SOL_AWC4	SOL_K4	SOL_CBN4	CLAY4	SILT4	SAND4	ROCK4	SOL_ALB4	USLE_K4	SOL_EC4
1200	1.55	0.13	3.32	0	30.6	29.8	39.6	0	0	0.16	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0