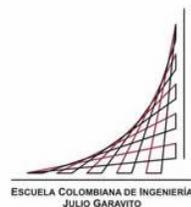


Maestría en Ingeniería Civil

**Propuesta de un Sistema de Tratamiento para Aguas Residuales
Producto de Actividades Ganaderas**

Jojanna Carolina Luque López

Bogotá, D.C., 09 de diciembre de 2019

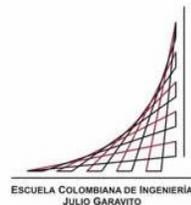


**Propuesta de un Sistema de Tratamiento para Aguas Residuales
Producto de Actividades Ganaderas**

**Trabajo de grado para optar al título de magíster en Ingeniería
Civil, con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente**

**Jairo Alberto Romero Rojas
Director**

Bogotá, D.C., 09 de diciembre de 2019



La tesis de maestría titulada “Propuesta de un Sistema de Tratamiento para Aguas Residuales Producto de Actividades Ganaderas”, presentada por Jojanna Carolina Luque López, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la tesis
Ingeniero Jairo Alberto Romero Rojas

Jurado
Ingeniera Amalia Avendaño Sánchez

Jurado
Ingeniera María Paulina Villegas de Birigard

Bogotá, D.C., 24 de enero de 2020

Agradecimientos

Agradezco a Dios por permitirme culminar este proyecto, a mi madre por su gran apoyo incondicional y ánimo, a mi pareja por su motivación constante, persistente y colaboración incondicional.

Al ingeniero Jairo Romero por su disposición constante para llevar a cabo el proyecto de grado, su guía para orientar las ideas propuestas y la facilidad del conocimiento para el desarrollo de este trabajo de grado.

RESUMEN

La presente investigación tiene por finalidad analizar los parámetros físicos del agua residual resultado de la producción lechera en una finca del Municipio de Uncia, Cundinamarca, que se ha dedicado a las actividades agrícolas y pecuarias por más 70 años, con el objetivo de diseñar un sistema de tratamiento de las aguas residuales y así contribuir a un proceso más sostenible con nuestro Medio Ambiente.

El primer capítulo enmarca la historia de la ganadería en Colombia y la producción lechera a través del tiempo, discriminando la contaminación ambiental que genera la ganadería en el agua, el aire y el suelo; la normativa vigente que regula la contaminación mundial y nacional de la ganadería, la protección de los recursos y los vertimientos puntuales de aguas residuales.

En el segundo capítulo se caracteriza el lugar de estudio, el proceso de ordeño diario y la problemática que motiva el presente estudio. En el capítulo tres se describe la metodología implementada para la caracterización del agua residual de la finca lechera, los ensayos físico-químicos en relación con el pH, la Demanda Química de Oxígeno, la Demanda Bioquímica de Oxígeno, Sólidos Totales, Sólidos Sedimentables, Sólidos Suspendidos Totales, Grasas y Aceites. En el capítulo cuatro se incluye la caracterización físico-química y su análisis.

Por último, en el capítulo quinto se plantea la posible solución, con el diseño conceptual del tanque séptico con filtro anaerobio seguido de un lecho de infiltración como medio de aplicación del agua residual tratada al suelo, como reúso del recurso.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	11
OBJETIVOS	12
METODOLOGÍA.....	12
CAPITULO I: MARCO DE REFERENCIA	13
1. Contexto Histórico de la ganadería.....	13
2. Contaminación ambiental generada por la ganadería	16
3. Marco legal y normativa vigente.....	20
3.1. Regulaciones Mundiales:	20
3.2. Regulaciones Nacionales:.....	21
4. Parámetros de calidad	24
4.1. Aguas residuales tratadas.....	24
4.2. Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas-arnd a cuerpos de aguas superficiales – Resolución 0631 de 2015. MADS.....	25
5. Tecnologías desarrolladas para la mitigación de los daños.....	25
CAPITULO II: LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO	28
1. Área de estudio	28
CAPITULO III: EL PROCESO DE PRODUCCIÓN LECHERA	36
CAPITULO IV: CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL	43
1. Muestreo	43
2. Resultados	43
CAPITULO VI: SISTEMA DE TRATAMIENTO.....	46
1. Parámetros de diseño tanque séptico (RAS, 2017).....	46
2. Ensayo de permeabilidad y lecho de percolación.....	48
RECOMENDACIONES	56
CONCLUSIONES.....	57
BIBLIOGRAFÍA.....	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla No. 1. Producción Lechera Nacional	16
Tabla No. 2. Cargas contaminantes de aguas residuales de la zona de ordeño	20
Tabla No. 3. Especificaciones Resolución 1207 de 2014.....	24
Tabla No. 4. Parámetros Resolución 0631 de 2015.....	25
Tabla No. 5 Fechas de toma de muestras	43
Tabla No. 6 Caracterización del agua residual.....	43
Tabla No. 7 Profundidad útil según volumen útil	46
Tabla No. 8 Resultados del ensayo de permeabilidad	53
Tabla No. 9 Tasa de aplicación de aguas residuales para sistema de infiltración	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No. 1 Ubicación municipio de Une en Cundinamarca. Fuente: https://es.wikipedia.org/	28
Figura No. 2 Mapa hidrográfico de Une-Cundinamarca. Fuente: https://unecundinamarca.micolombiadigital.gov.co/	29
Figura No. 3 Veredas y límites de Une, Cundinamarca. Fuente: https://es.wikipedia.org/	30
Figura No. 4 Pastoreo del ganado. Fuente: Propia	33
Figura No. 5 Corral, dos puestos de ordeño eléctrico. Fuente: Propia.	34
Figura No. 6 Corral de ordeño parte posterior. Fuente: Propia.....	34
Figura No. 7 Corral de ordeño parte delantera. Fuente: Propia.....	35
Figura No. 8 Hato en hora de ordeño. Fuente: Propia.....	36
Figura No. 9 Recolección del estiércol y disposición en zona aledaña al corral. Fuente: Propia	37
Figura No. 10 Barrido del material sólido. Fuente: Propia	37
Figura No. 11 Lavado Corral. Fuente: Propia.....	38
Figura No. 12 Remoción del agua de lavado al sifón de desagüe. Fuente: Propia.....	38
Figura No. 13 Punto de desagüe. Fuente: Propia.	39
Figura No. 14 Diagrama de flujo del proceso de ordeño	40
Figura No. 15 Balance de Caudales. Fuente: Propia	41
Figura No. 16 Esquema tanque séptico. Fuente: Adaptación https://www.academia.edu/29898547	48
Figura No. 17 Hueco 1 con un ancho de 30 cm en promedio. Fuente: Propia	49
Figura No. 18 Hueco 1 con una profundidad de 1 m. Fuente: Propia.....	49
Figura No. 19 Hueco 2 con un ancho de 30 cm en promedio. Fuente: Propia	50
Figura No. 20 Hueco 2 con una profundidad de 1 m. Fuente: Propia.....	50
Figura No. 21 Hueco 3 con un ancho de 30 cm en promedio. Fuente: Propia	51
Figura No. 22 Hueco 3 con una profundidad de 1 m. Fuente: Propia.....	51
Figura No. 23 Se rellena los 3 huecos con material granular. Fuente: Propia	52
Figura No. 24 Relleno con material granular aproximadamente 5 cm. Fuente: Propia	52
Figura No. 25 Medición de la caída del agua cada 30 min. Fuente: Propia.....	53
Figura No. 26 Esquema lecho de infiltración propuesto. Fuente: Propia	55

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Memorias de Calculo

INTRODUCCIÓN

Este documento incluye el análisis de la contaminación generada por la actividad pecuaria en lo referente al uso de agua para limpieza del corral de ordeño, temática que en los pequeños productores prima la utilización de grandes cantidades de agua limpia y mangueras con diámetros amplios e insuficiente presión, paradigma que necesitará varios años y mucho esfuerzo para poder ser modificado.

La presente investigación tiene por finalidad analizar los parámetros físicos del agua residual resultado de la actividad lechera en una finca de Une- Cundinamarca, que se ha dedicado por más 70 años a la producción de ganado doble propósito, con el objetivo de diseñar un sistema de tratamiento de las aguas residuales. Se enmarca la historia de la ganadería en Colombia y la producción lechera a través del tiempo, discriminando la contaminación ambiental que genera la ganadería en el agua, el aire y el suelo; la normativa vigente que enmarca la contaminación mundial de la ganadería, la protección de los recursos y los vertimientos puntuales de aguas residuales. Se procede a caracterizar el lugar de estudio, el proceso de ordeño diario y la problemática que motiva el presente estudio. Se describe la metodología implementada para la caracterización del agua residual de la finca lechera, los ensayos físico-químicos en relación con el pH, la Demanda Química de Oxígeno, la Demanda Bioquímica de Oxígeno, Sólidos Totales, Sólidos Sedimentables, Sólidos Suspendidos Totales, Grasas y Aceites. Se incluye la caracterización físico-química con su respectivo análisis y se plantea la posible solución, con el diseño conceptual del tanque séptica con filtro anaerobio seguido de un lecho de infiltración como medio de aplicación del agua residual tratada al suelo, como medio de reusó del recurso, lo anterior con el firme compromiso desde la academia contribuir con el desarrollo sostenible de nuestro sector industrial en nuestra región.

OBJETIVOS

Objetivo general:

Diseñar conceptualmente un sistema de tratamiento de aguas residuales para una finca lechera en cumplimiento de la Resolución 0631 de 2015.

Objetivos específicos:

- ❖ Analizar las actividades que se llevan a cabo en un hato lechero promedio.
- ❖ Establecer las características físico-químicas del agua producto de las actividades lecheras.
- ❖ Identificar y evaluar posibles sistemas de tratamiento de aguas residuales
- ❖ Definir el sistema de tratamiento acorde a las características del agua residual en cumplimiento de la normativa ambiental.

METODOLOGÍA

La metodología de trabajo consiste en desarrollar actividades de campo orientadas a identificar las condiciones de la zona y realizar la toma de muestras para caracterizar mediante ensayos de laboratorio. Paralelamente se adelantará una revisión bibliográfica que permita formular la propuesta del diseño conceptual de un sistema de tratamiento de aguas residuales, que se ajuste a la normativa vigente.

CAPITULO I: MARCO DE REFERENCIA

1. Contexto Histórico de la ganadería en Colombia

El inicio de la ganadería bovina, se dio con el descubrimiento de América, cuando Cristóbal Colón trajo al continente alrededor de 200 vacas y algunos toros de la isla española hoy denominada República Dominicana, allí se encontraron con un buen hábitat y alimento suficiente para satisfacer sus necesidades, hecho que favoreció su reproducción permitiendo la llegada de estos a Colombia, inicialmente por Santa Marta, conformándose lo que se conoce como la ganadería de la Costa Atlántica. (Loaiza, 2009)

En Colombia existen los sistemas de producción especializado y doble propósito de producción de leche. La población bovina se estima en 23 millones de cabezas, de ellas, 6 millones están dedicadas a la producción de leche, el 89% en sistemas de producción doble propósito que contribuyen con el 55% de la producción nacional a cifras de 1998 (Corpoica, 1998).

La producción de leche en Colombia ha sido muy dinámica durante los últimos 30 años. En la década de 1970 creció a una tasa anual del 4.7%, presentó un crecimiento excepcional y sostenido de 6.5% durante la década de 1980 y en la década de 1990 creció a una tasa anual del 3.8%, llegando, en 2001, aproximadamente a 5877 millones de litros de leche fluida (Balcázar, 1992). Para el 2013 se presentó una tasa de crecimiento de 11.6% (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018)

Los sistemas especializados de producción de leche se encuentran normalmente en zonas frías de trópico alto y cerca de los centros urbanos. En este sistema, la vaca es ordeñada sin la presencia del ternero y los machos son descartados a los pocos días de nacidos, predominan las razas puras o con un alto porcentaje de genes proveniente de razas europeas *Bos taurus* (por ej., Holstein) que son suplementadas con alimentos concentrados. En este sistema la producción de leche es generalmente alta (Holmann, et al, 2004)

El sistema doble propósito predomina en zonas tropicales bajas en sitios apartados de los centros de consumo. En este sistema, tanto los terneros machos como las hembras son criados con la vaca y después del destete se levantan en la misma finca o son vendidos en el mercado. Las vacas tienen un alto porcentaje de genes *Bos indicus* o cruces con razas *Bos taurus* y basan su alimentación en sistemas extensivos en pasturas de baja calidad que limitan la producción de leche y carne (Arias et al., 1990). No obstante, el sistema tiene algunas ventajas, entre ellas: (1) menor riesgo por variaciones en los precios de leche y carne, (2) menor incidencia de mastitis en las vacas debido a la presencia del ternero al momento del ordeño, (3) menos inversión de capital, y (4) menores requisitos de soporte técnico comparado con los sistemas especializados (Holmann, et al., 2004).

La actividad ganadera como generadora de empleo ha incrementado su importancia dentro del sector agropecuario. En 1999 el subsector generó 1,400,000 empleos, equivalentes al 38.1% de la fuerza de trabajo del sector rural y el 8.3% del empleo total del país (Martínez et al., 2002). Los productos de la ganadería bovina (carne y leche) tienen una importancia considerable en la demanda agregada de la economía (Holmann, et al., 2004). Para el 2013 se reportan 3,664,000 empleos para el sector agropecuario con un porcentaje de 17% del empleo a nivel nacional (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

Entre los departamentos de Arauca, Casanare, Meta, Atlántico, Guajira, Magdalena, Cesar, Bolívar, Córdoba, Quindío, Norte del Valle del Cauca, Caldas, Risaralda, Altiplano de Antioquia, Cundinamarca y Boyacá, se produce más del 80% de la leche en el país (Holmann, et al., 2004). En Colombia se ha demostrado que la rentabilidad y la competitividad de los sistemas de producción lechera son bastante complejos y están asociados a la tecnificación de los procesos y los adecuados sistemas de manejo del ganado.

Con frecuencia, las fincas pequeñas cuentan con sistemas mixtos donde por un lado está la actividad ganadera doble propósito y por el otro cuentan con uno o más cultivos agrícolas, distribuyendo su tiempo entre las diferentes actividades. Es muy probable que en estas fincas pequeñas la actividad ganadera exista para obtener flujo de efectivo, como fuente de ahorro, para diversificar riesgo o por seguridad alimentaria (Holmann, et al., 2004).

Por tanto, el sector lechero colombiano en su conjunto se ha vuelto más competitivo. Esto fue debido, también, al incremento de la carga animal, al aumento de la inversión en infraestructura y equipo tales como pasturas de mejor calidad, picadoras de pasto, equipo de riego e instalaciones para ordeño. En consecuencia, la productividad incrementó en 258% en los sistemas doble propósito y en 37% en los sistemas especializados (Holmann, et al., 2004).

De la misma manera, las plantas procesadoras de leche en Colombia también obtuvieron beneficios de este diferencial creciente entre el precio de la leche al productor y al consumidor, para modernizar el sector industrial como parte de su estrategia de mercadeo a mediano plazo. Así, el incremento en la capacidad instalada de estas empresas durante las tres últimas décadas ha sido el mismo, un aumento de 2.5 millones de litros de leche por día en cada década; sin embargo, durante la última década este incremento se dio principalmente en nuevos equipos y plantas para pulverizar leche o para envasarla en empaques de larga vida 'Tetrapak'. Siguiendo esta estrategia, Colanta instaló tres modernas plantas de pulverización en los últimos cuatro años, Nestlé en 1996 duplicó su capacidad de producción de leche en polvo y Parmalat en 1998 triplicó su capacidad para la producción y procesamiento de leche de larga vida. Incolácteos y Coolechera en 1998 y 2001 también invirtieron en nuevas plantas para el procesamiento de leche larga vida. Estas tecnologías son mucho más costosas, pero permiten una vida útil del producto en estantería más larga que los productos tradicionales que requieren refrigeración (Holmann, et al., 2004).

En la actualidad el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) entrega un boletín técnico anual con una encuesta nacional agropecuaria, permitiendo cifras específicas por regiones, como que en el 2017 el total de cabezas de ganado vacuno en el país fue de 24.328.158. La región que mayor participación registró corresponde a la Andina en la cual el departamento de Antioquia reportó un mayor número de cabezas (2.716.286). La región Caribe participó con el 30,1% destacándose el departamento de Córdoba con 2.140.102 cabezas. El total de área en actividad pecuaria fue de 40.872.884 ha, en la cual la mayor participación se registró en la región de Orinoquia con 36,1% y 14.764.688 ha, seguida de la región Andina con 12.207.787 ha y una participación del 29,9% (DANE, 2017)

En 2017 la producción de leche a nivel nacional fue de 19.744.522 litros, con una producción promedio nacional de vaca por día de 6,0 litros. La región con mayor cantidad de leche registrada corresponde a la Andina con 12.458.756 litros con un total de vacas en ordeño de 1.454.553 cabezas. Como se muestra en la siguiente tabla: (DANE, 2017)

Tabla No. 1. Producción Lechera Nacional

Región	Cabezas	Participación (%)	Litros	Participación (%)	Litro vaca/día
Total Nacional	3.290.596	100,0	19.744.522	100,0	6,0
Total Región Andina	1.454.553	44,2	12.458.756	63,1	8,6
Total Región Caribe	1.216.880	37,0	3.984.056	20,2	3,3
Total Región Pacífica	219.215	6,7	1.808.116	9,2	8,2
Total Orinoquia	191.468	5,8	647.161	3,3	3,4
Total Amazona	208.480	6,3	846.434	4,3	4,1

Fuente: DANE, 2017

2. Contaminación ambiental generada por la ganadería

El sistema ganadero contribuye por medio de dos vías a la contaminación de los recursos hídricos: como fuentes puntuales, considerándose en este caso las aguas de los establos y como fuentes no puntuales o difusas por el arrastre de estiércol dejado en los campos, lo que trae consigo malos olores, proliferación de moscas, efectos estéticos y la alteración de las propiedades del agua (Escobar, 2002). El agua residual generada en la ganadería se caracteriza por contener altas concentraciones de materia orgánica, sólidos suspendidos, nitrógeno y fósforo, de igual manera presenta una demanda química de oxígeno considerable (Loaiza, 2009). La caracterización de la contaminación hídrica es determinada mediante parámetros como: temperatura, oxígeno disuelto, pH, turbiedad, nitrógeno amoniacal, fósforo total, sólidos totales, sólidos suspendidos, sólidos disueltos, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), alcalinidad total, coliformes totales y coliformes fecales (Murgueitio, 2003).

El sector ganadero es uno de los sectores que ocupan los primeros renglones de la economía nacional, esto de alguna forma hace que se enfoque su producción hacia el crecimiento económico y productivo tendientes al bienestar económico de los productores, sin tener en cuenta que se puede competir en el mercado con un manejo más sostenible de los recursos naturales, principalmente el agua, mejorando así las condiciones ambientales de las zonas en las que se implementa la ganadería (Loaiza, 2009).

Más específicamente las causas de contaminación ambiental en la ganadería especializada y doble propósito de producción de leche, inician por el incremento en la producción de leche para aumentar la rentabilidad, a costa de la deforestación irresponsable para el uso de grandes extensiones de tierra y extracción incesante de recursos naturales; poniendo en riesgo la sustentabilidad de los ecosistemas (Holmann, et al., 2004). En general se estima que en las fincas con sistema doble propósito el área en pasturas es aproximadamente de 80%; mientras que en las fincas con sistema especializado de producción de leche es de 90%, con un nivel inferior al 10% en áreas de bosques.

Estudios han demostrado que los volúmenes promedio de estiércol fresco generados cada día son 22 kg/ bovino de engorde, 38 kg/vaca seca y 68 kg/vaca lactante (Pinos et al.,2012) Produciendo un impacto ambiental en el aire con la generación de gases de efecto invernadero, en el agua con la eutrofización de los cuerpos de agua y en el suelo con sobrecarga de nutrientes que a veces varía en aumento según la especie pecuaria, el sistema de alimentación y el manejo del estiércol en las fincas.

En el aire, la digestión anaeróbica del estiércol produce gases que en su mayoría son metano (60 %), bióxido de carbono (39 %), y trazas (0.2 %) de óxido nitroso. El metano es un gas no tóxico, pero es un biogás que contribuye significativamente al efecto invernadero y es 23 veces más potente que el CO₂, y el estiércol contribuye con 16 % de las emisiones globales. El metano emitido por el estiércol proviene del metano de la fermentación entérica capturado en las heces, y de la digestión anaeróbica de la materia orgánica del estiércol. El estiércol contribuye con 50 % del total de emisiones de amoníaco hacia la atmósfera, porque su tasa de volatilización es mayor a 23 % (Pinos et al.,2012).

El óxido nitroso es 296 veces más potente que el CO₂. El estiércol aporta cerca del 25 % de las emisiones antropogénicas de óxido nitroso, el cual se genera durante los procesos de nitrificación (oxidación biológica de amonio a nitrito y nitrato) y desnitrificación (reducción de nitrato a nitrógeno gaseoso), donde el intermediario es el óxido nitroso (Pinos et al.,2012).

En el agua, la contaminación por excretas ganaderas directamente a través de escurrimientos, infiltraciones y percolación profunda en las granjas, e indirectamente por escorrentías y flujos superficiales desde zonas de pastoreo y tierras de cultivo. El nitrógeno es abundante en el estiércol, y está relacionado con la contaminación de aguas subterráneas por la lixiviación de nitrato a través del suelo, mientras que el fósforo del estiércol está relacionado con la contaminación de aguas superficiales (Pinos et al.,2012).

Debido a que el fósforo en el agua no se considera directamente tóxico, no se han establecido niveles estándares en el agua potable. Sin embargo, el fósforo tiene un impacto ambiental importante en los recursos hídricos porque vertido directamente en las corrientes o aplicado en dosis excesivas en el suelo, estimula el proceso de eutrofización el cual aumenta las plantas acuáticas, disminuye el oxígeno disuelto y varía el pH, afectando así la calidad del agua. Aunque no se ha reportado la concentración de nitrógeno y fósforo en los distintos cuerpos de agua, la cantidad de ellos lixiviados o arrastrados a mantos acuíferos depende de la precipitación (duración), la percolación (los suelos arenosos presentan altas tasas de percolación) y la pendiente del suelo por donde se desplazan las escorrentías (Pinos et al.,2012).

El suelo, puede ser seriamente afectado por el estiércol si contiene concentraciones altas de nutrientes (nitrógeno, fósforo), microorganismos patógenos (*E. coli*), antibióticos, y compuestos que interactúen con el sistema endócrino (hormonas esteroidales, fitoestrógenos, plaguicidas y herbicidas). En países donde las regulaciones ambientales son laxas o no existen, el estiércol se aplica al suelo continuamente, excediendo la capacidad de captación de nutrientes por los cultivos (Pinos et al.,2012).

Según el plan de acción sectorial de mitigación de gases de efecto invernadero agropecuario de Colombia de 2012, el sector agropecuario es la principal fuente de emisión

de GEI, de acuerdo con el inventario nacional de fuentes y sumideros de GEI 2000-2004, el sector aporta 38,1% de las emisiones de GEI nacional, para el año 2004, que son cuantificadas en unidades de dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_2 \text{ eq}$); siendo los GEI metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) los principales contribuyentes del sector agropecuario (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

La fermentación entérica (CH_4), suelos agrícolas (N_2O) y cultivos de arroz (CH_4), aportan el 48,5%, 47,5% y 2%, respectivamente, del total de las emisiones del sector. Adicionalmente, el 45,48% de 48,5% de los aportes en la categoría de fermentación entérica, corresponden a la ganadería, específicamente el 44,14% y el 1,34% pertenecen al ganado bovino no lechero y al ganado bovino lechero. Básicamente, las emisiones de GEI para la categoría de fermentación entérica está en términos generales determinado por el número de cabezas de ganado y por la caracterización de la población ganadera existente en el país. Para la categoría de suelos agrícolas incluye las siguientes fuentes de nitrógeno: aplicación de fertilizantes sintéticos, incorporación de estiércol y residuos agrícolas al suelo como fertilizantes (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

Por otro lado, el agua es indispensable para el ganado bovino y este dependiendo del tipo, consume diferentes cantidades: para vacas de ordeño 90-115 (lt/día), toros 60-80 (lt/día), machos y hembras > 2 años 40-50 (lt/día), machos y hembras < 2 años 35-45 (lt/día), terneros < 1 año 20-30 (lt/día) (FEDEGAN et al, 2008). Lo que genera un consumo desmedido del recurso hídrico y que en paralelo al crecimiento de la ganadería afecta tanto en cantidad como en residuos.

En contribución a la temática del presente trabajo de grado se encontraron estudios realizados por universidades de Colombia y Cuba, donde se determinó que después del proceso de ordeño, se producen aguas residuales y excretas, los cuales se disponen a campo abierto con un 80%, seguido de los vertimientos a fuentes de agua con un 16% y el 4% de los predios utilizan ambos métodos para disponer sus residuos líquidos, hecho que impacta sobre la calidad de este recurso, ya que la disposición final de dichas aguas llega directa o indirectamente a alguna fuente hídrica. La caracterización del líquido residual de fincas ganaderas bovinas resultante del proceso productivo en la zona de ordeño, se relaciona en la siguiente tabla (Loaiza, 2009).

Tabla No. 2. Cargas contaminantes de aguas residuales de la zona de ordeño

Parámetros	Colombia	Cuba
pH	7,59	8
DQO (mg/l)	3368	4825
P total (mg/l)	24	27
NTK(mg/l)	99	316
SST (mg/l)	2686	2219
DBO (mg/l)	1022

Fuente: Loaiza, 2009

3. Marco legal y normativa vigente

Las regulaciones o normas para el manejo de estiércol generado por el ganado en confinamiento varían mucho entre países y regiones, y su propósito es disminuir el impacto negativo en el ambiente. Las regulaciones de la calidad del agua y del suelo son por lo general de ámbito local y nacional, mientras que en materia atmosférica los tratados son del ámbito transfronterizo e incluso transoceánico, pues las emisiones locales pueden tener repercusiones globales (Pinos et al., 2012)

3.1. Regulaciones Mundiales:

El Protocolo de Kyoto de 1997, Anexo A, especifica que el manejo del estiércol está considerado como una de las fuentes de emisiones de gases efecto invernadero GEI en el sector agrícola, con el Metano (CH₄) como uno de los seis gases del efecto invernadero que se propuso disminuir un 5% entre las partes con respecto a los niveles del 1990 para el periodo de 2008 y 2012.

La normativa de esta índole en Argentina, Chile, Colombia y México aún carece de estímulos por las buenas prácticas en el manejo de excretas ganaderas; por tanto, los gobiernos deben responsabilizarse de la monitorización periódica en los sistemas ganaderos para controlar las descargas excedentes de contaminantes al ambiente y a los

recursos naturales, y además deben promover las compensaciones por bonos de carbono (Pinos et al., 2012).

3.2. Regulaciones Nacionales:

En Colombia, la reglamentación nacional no se refiere específicamente al manejo del estiércol en operaciones ganaderas, se encuentra normativa en función de la preservación de los recursos hídricos.

-Decreto Ley 2811 de 1974. Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. En su Título VI- Del uso, conservación y preservación de las aguas - Capítulo II se refiere al control y la prevención de la contaminación del agua, incluyendo las actividades rurales y la eliminación de excretas.

-Decreto 4728 de 23 de diciembre de 2010 Nivel Nacional. Modifica parcialmente el Decreto 3930 de 2010, en lo que hace relación a los vertimientos de residuos en aguas superficiales, subterráneas, interiores y marinas en el territorio nacional, ordena al Ministerio de Ambiente fijar los parámetros y los límites máximos permisibles de los vertimientos a las aguas superficiales, marinas, a los sistemas de alcantarillado público y al suelo. Así mismo expedirá el protocolo para el monitoreo de los vertimientos.

-Resolución 2733 de 29 de diciembre de 2010. Por la cual se adoptan los requisitos y evidencias de contribución al desarrollo sostenible del país, se establece el procedimiento para la aprobación nacional de programas de actividades (PoA- por sus siglas en inglés) bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y se reglamenta la autorización de las entidades coordinadoras.

-Resolución 1207 de 25 de julio de 2014 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Establece las disposiciones relacionadas con el uso del agua residual tratada y no aplica para su empleo como fertilizante o acondicionador de suelos. Señala las definiciones; normas sobre vertimientos, balance de materia o masa, usos del agua residual tratada,

criterios de calidad, distancias mínimas de retiro para el desarrollo de la reutilización; obras, prevención, monitoreo, seguimiento, situaciones contingentes y régimen de transición.

-Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Se especifica los valores permisibles de los parámetros de calidad del agua para vertimientos producto de actividades de ganadería de cría y beneficio.

-Decreto Único Reglamentario 1076 de 26 de mayo de 2015 Nivel Nacional. Compila las disposiciones reglamentarias del Sector Ambiente. Señala la obligatoriedad del permiso de vertimiento para el proceso de aprovechamiento de aguas en cualquiera de los usos previstos en el artículo 2.2.3.2.7.1 del Decreto 1076 de 2015. (Artículo 2.2.3.2.20.2). Igualmente, se prohíbe verter sin tratamiento, residuos sólidos, líquidos o gaseosos que puedan contaminar las aguas, causar daño o poner en peligro la salud humana o el normal desarrollo de la flora o fauna, o impedir u obstaculizar su empleo para otros usos. (Artículo 2.2.3.2.20.5). Establecer los requerimientos de la obtención de los permisos y los planes de cumplimiento (Artículo 2.2.3.3.5.1).

-Decreto 050 de 16 de enero de 2018 Nivel Nacional. Modifica parcialmente el Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible en relación con el permiso, los requisitos y el estudio de la solicitud de vertimiento, así como su evaluación ambiental. Así mismo, establece no se admitirán vertimientos: 11. Al suelo que contengan contaminantes orgánicos persistentes de los que trata el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes. 12. Al suelo, en zonas de extrema a alta vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos, determinada a partir de la información disponible y con el uso de metodologías referenciadas. y 13. Al suelo, en zonas de recarga alta de acuíferos que hayan sido identificadas por la autoridad ambiental competente con base en la metodología que para el efecto expida el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

-Ley 1931 del 27 de julio de 2018. La presente ley tiene por objeto establecer las directrices para la gestión del cambio climático en las decisiones de las personal públicas y privadas,

la concurrencia de la Nación, Departamentos, Municipios, Distritos, Áreas Metropolitanas y Autoridades Ambientales principalmente en las acciones de adaptación al cambio climático, así como en mitigación de gases efecto invernadero, con el objetivo de reducir la vulnerabilidad de la población y de los ecosistemas del país frente a los efectos del mismos y promover la transición hacia una económica competitiva, sustentable y un desarrollo bajo en carbono.(19) Se precisa en la mitigación de gases de efecto invernadero producto de actividades humanas como actividades industriales, de transporte, de producción agropecuaria, de deforestación, de disposición de residuos sólidos y líquidos, de conversión de páramos y humedales a tierras de cultivos o por actividades de minería, entre otras que producen o liberan este tipo de gases.

Entre el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) sector Dirección de Cambio Climático, el Departamento Nacional de Planeación (DNP) y los Ministerios Sectoriales de Colombia, desarrollaron un programa denominada la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC), que busca disminuir el crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del crecimiento económico nacional a través de medidas sectoriales de mitigación que contribuyan al desarrollo económico y competitividad de los sectores. Se han generado diferentes planes de acción sectorial, en especial el Plan de acción sectorial (PAS) de mitigación de gases efecto invernadero (GEI) agropecuario, el cual presenta una selección técnica de opciones de mitigación de GEI.

Mediante la Ley 164 de 1994, el Congreso de la República de Colombia aprobó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, cuyo objetivo es la estabilización de concentraciones de gases efecto invernadero – GEI en la atmósfera, a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático. En desarrollo de este objetivo, el Protocolo de Kyoto, aprobado por el Congreso de la República de Colombia mediante la Ley 629 de 2000, fija obligaciones cuantificadas de reducción de emisiones de gases efecto invernadero – GEI para países desarrollados que figuran en su Anexo “B”. El Protocolo establece que estas reducciones deberán ser reales y alcanzadas dentro del primer periodo de compromiso comprendido entre los años 2008 al 2012. El Protocolo también prevé mecanismos de flexibilidad que servirán, de manera complementaria, para el logro de las reducciones fijadas, los cuales permiten el intercambio de cuotas permisibles de emisión de los países Anexo I entre sí; el desarrollo de proyectos

de implementación conjunta entre los países del Anexo I; y el Mecanismo de Desarrollo Limpio – MDL, que contempla la realización de proyectos de reducción o de captura de gases efecto invernadero en las Partes No Anexo, es decir, países en desarrollo como Colombia (Resolución 2733 de 2010).

4. Parámetros de calidad

4.1. Aguas residuales tratadas

En la Resolución 1207 del 25 de julio de 2014, se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas y se establecen los criterios de calidad para el uso agrícola. Dentro de los criterios de calidad físicos solo se regula con un valor límite máximo permisible el pH entre 6,0 a 9,0 y la Conductividad con 1.500, 00 $\mu\text{S/cm}$.

Además de cumplir con los criterios de calidad para el reúso, se debe cumplir con las siguientes distancias mínimas de retiro al momento de efectuar la actividad de reúso:

Tabla No. 3. Especificaciones Resolución 1207 de 2014

USO	DISTANCIA MÍNIMA (metros)
AGRÍCOLA	
Cultivos de pastos y forrajes para consumo animal.	*90 metros medidos desde la línea de mareas máximas o la del cauce permanente de todo cuerpo de agua superficial hasta el perímetro de las áreas de aplicación.
Cultivos no alimenticios para humanos o animales.	
Cultivos de fibras celulósicas y derivados.	
Cultivos para la obtención de biocombustibles (biodiesel y alcohol carburante) incluidos lubricantes.	*90 metros de radio medidos desde los pozos y aljibes de agua subterránea hasta el perímetro de las áreas de aplicación.
Cultivos forestales de madera, fibras y otros no comestibles.	*30 metros de radio medidos desde cada punto de aplicación en aquellas áreas con acceso de personal, si el riego es realizado por aspersión durante el lapso de tiempo que dure esta actividad.
Cultivos alimenticios que no son de consumo directo para humanos o animales, y que han sido sometidos a procesos físicos o químicos.	

Fuente: Resolución 1207 de 2014

4.2. Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas-arnd a cuerpos de aguas superficiales – Resolución 0631 de 2015. MADS

SECTOR: ACTIVIDADES PRODUCTIVAS DE AGROINDUSTRIA Y GANADERÍA
GANADERIA DE BOVINO, BUFALINO, EQUINO, OVINO Y/O CAPRINO (CRÍA), que incluye: Cría de ganado bovino, bufalino, equino y/o caprino de forma estabulada y se contempla las actividades conexas como: reproducción, engorde y producción de semen.

Tabla No. 4. Parámetros Resolución 0631 de 2015

PARÁMETRO	UNIDADES	GANADERIA DE BOVINO, BUFALINO, EQUINO, OVINO Y/O CAPRINO CRÍA
Generales		
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	500,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)	mg/L O ₂	250,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	150,00
Solidos Sedimentables (SSED)	mL/L	5,00
Grasas y Aceites	mg/L	20,00

Fuente: Resolución 0631 de 2015

5. Tecnologías desarrolladas para la mitigación de los daños

- El Instituto Tecnológico de Costa Rica, Coepelecheros, el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas y Dos Pinos, en fincas de productores de leche de San Carlos y Sarapiquí, demostraron que es posible producir leche de excelente calidad utilizando modelos de limpieza para las salas de ordeño y corrales de espera, con solo 10 o 20 por ciento del agua que tradicionalmente gastaban. Incluso se demostró, que se puede producir leche de calidad, con cero lavados. La adopción de nuevas técnicas de limpieza de las salas de ordeño y corrales, llevó a

una reducción de prácticamente un 90 %, ya que se pasó de gastar 10.385 L/día de agua a solo 1.090 L/día (Paniagua, 2006).

- Para el sub-sector ganadero, los sistemas silvopastoriles han sido seleccionados como la principal opción de mitigación, estos sistemas están siendo implementados en varios lugares del mundo, incluso en Colombia a través del proyecto de Ganadería Sostenible co-financiado por el Fondo Global Ambiental. A su vez, se ha priorizado la meta que contempla FEDEGAN en el Plan Estratégico de Ganadería Colombiana, de devolver 10 millones de hectáreas a la naturaleza (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018). Los sistemas silvopastoriles se visualizan como sistemas integrados de manejo que poseen muchas funciones entre ellas el sostenimiento de la producción animal, la diversidad proteínica en la alimentación, el mejoramiento de la calidad de los suelos, la fijación de carbono y la protección de las fuentes hídricas. Estos sistemas se basan en el empleo de gran diversidad de especies de plantas, así como la implementación de cercas vivas y corredores biológicos además de alternativas como la combinación de cosechas y cultivos, el uso eficiente del estiércol y la minimización en el uso de agroquímicos (Loaiza, 2009).
- Se ha evaluado el uso de algunas hectáreas liberadas para la siembra de frutales en función de la aptitud de uso de suelo y de planes y proyecciones departamentales y municipales, con importantes capturas de carbono (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).
- El Glasshouse Research institute de Inglaterra ha desarrollado la Técnica de la Película Nutritiva (TPN), que consiste en un tratamiento de aguas residuales por una formación de una densa matriz de raíces que actúa como filtro para retener sólidos en suspensión y ofrece soporte para el crecimiento de microorganismos aeróbicos, degradadores de residuos presentes en el agua a tratar, y las plantas por absorción radical, remueven nutrientes y metales pesados. La TPN se ha probado en cultivos hortenses (frijol, guisante, tomate, lechuga, rábano), en plantas ornamentales y en aromáticas, en más de 68 países. La técnica es económica, porque, con una

inversión mínima de instalación, mantenimiento y operación (como combustible utiliza la energía solar y el sistema filtrante puede transformarse en forraje o compost), permite mejorar la calidad del agua, convirtiéndose en una alternativa importante de reciclaje y de reutilización de aguas residuales sin recurrir a modernas y costosas instalaciones convencionales para el tratamiento (Chaparro, 1992)

- Otra alternativa es dar un manejo adecuado de los desechos sólidos, con la producción de abono orgánico (compost) a partir de los residuos como el estiércol del ganado, porcínaza, gallinaza, desperdicios de comida, huesos molidos, entre otros que al mezclarse con materiales de origen vegetal como desechos de cosechas agrícolas, restos de cocina, cáscaras, hojas de árboles, pequeños trozos de madera y carbón, se convierten en un abono natural para los pastos, dicha mezcla se debe realizar en lugares protegidos del sol y la lluvia ya sea con un techo o cubierto con un plástico grande. Una de las ventajas de la utilización de estos abonos orgánicos es que favorece el crecimiento de cultivos forrajeros, además de contribuir en la disminución de la contaminación tanto del agua como del suelo que se ocasiona por la aplicación de fertilizantes químicos (Loaiza, 2009).

CAPITULO II: LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

1. Área de estudio

El proyecto lechero analizado se encuentra ubicado en el municipio de Une, Cundinamarca. (Figura No. 1)



Figura No. 1 Ubicación municipio de Une en Cundinamarca. Fuente: <https://es.wikipedia.org/>

El Municipio de Une, Cundinamarca, ocupa aproximadamente el 60% de su extensión en cultivos y actividad pecuaria, su cercanía con la capital lo convierte en una estratégica despensa agrícola, además, de poseer dentro de su territorio ecosistemas estratégicos de recarga hídrica que irrigan el oriente del País. (Plan de Desarrollo, 2016 – 2019)

Une se considera el pulmón de oriente. La cuenca ambiental del río Negro muestra en los mapas de cartografía el potencial hídrico de la región de oriente donde el municipio se

destaca por los ríos y lagunas que se constituyen en su potencial ambiental e hídrico, debido a la abundancia de nacederos y cuerpos de agua los cuales, con el paso del tiempo, han presentado problemas de deforestación y efectos contaminantes principalmente sobre el Río Guativas.

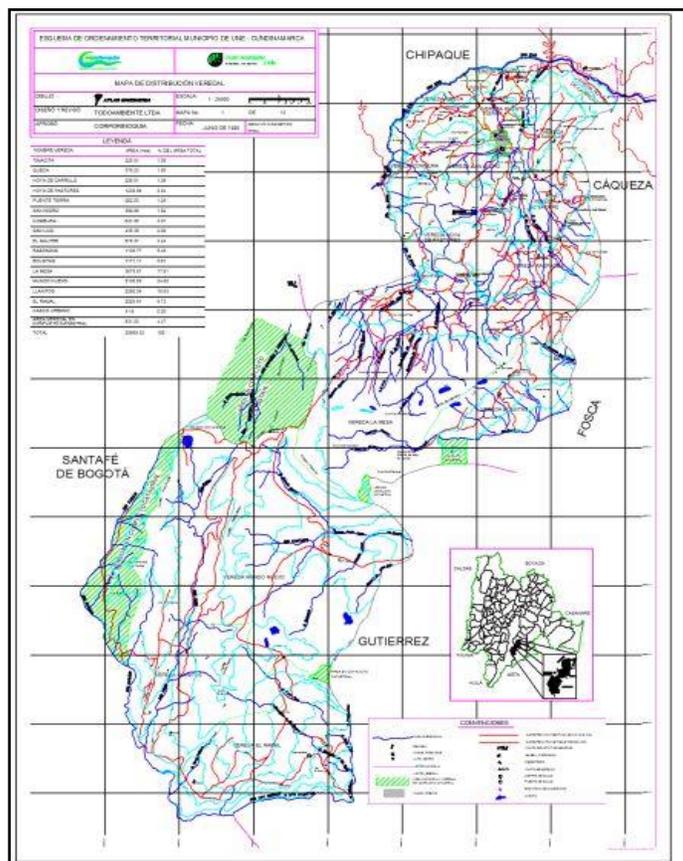


Figura No. 2 Mapa hidrográfico de Une-Cundinamarca. Fuente: <https://unecundinamarca.micolombiadigital.gov.co/>

Une es uno de los 116 Municipios del Departamento de Cundinamarca, se encuentra ubicado en la Región de Oriente, parte Sur del Departamento, en las estribaciones de la Cordillera Oriental, su cabecera está localizada a los 4° 24' de latitud norte, y 74° 02' de longitud al oeste de Greenwich. Su altura sobre el nivel del mar es de 2.376 metros, y posee una temperatura media de 16°C. La distancia de Bogotá D.C, es de 43 Kilómetros y posee una extensión de 211 Km² ocupando un 0.94% del total del Departamento. Con una

extensión urbana de 21 hectáreas y una extensión rural 23315 hectáreas y con una distancia a la autopista al llano de 9 Km. (Alcaldía – Une, Cundinamarca)

El municipio de Une, se encuentra dentro de los siguientes límites geográficos: por el Norte con Chipaque; por el Oriente con Cáqueza; por el sur con Fosca y Gutiérrez y por el Occidente con Bogotá, D.C. Adicionalmente, está conformado por 17 veredas que cuentan con Junta de Acción Comunal reconocida y son las siguientes: Combura, Queca, Bolsitas, San Luis, Mundo Nuevo, Timasita, Puente de Tierra, El Salitre, La Mesa, Raspados, San Isidro, Llanitos, Hoya de Carrillos, Hoya de Pastores, El Pedregal, Mategá y La Inspección del Ramal. (Alcaldía – Une, Cundinamarca)



Figura No. 3 Veredas y límites de Une, Cundinamarca. Fuente: <https://es.wikipedia.org/>

Topográficamente el Municipio de Une Cundinamarca posee un relieve montañoso en la cordillera oriental en donde las elevaciones oscilan entre 1800 y los 3800 m.s.n.m, en este sentido sobresalen Los Altos de los Reyes, La Cruz, El Gavilán, Palo Gordo, Pedregal, El Raizal, La Hoya, Los Barriales, Buenavista, Alto del Trigo, Cuchillas de San Salvador,

Mundo Nuevo, Los bancos, Boca Grande, El Buque y Cerro del Buque y cuenta con las siguientes pendientes; 7 -12%, 12 – 25%, 25-50%, y mayores al 50 %. (Plan de Desarrollo, 2016 – 2019)

En general los ríos y quebradas son de carácter torrencial, debido a lo estrecho de los cauces y el alta pendiente del terreno, la corta longitud de su recorrido, la baja amortiguación de las aguas antes de llegar a los causes y por la alta deforestación que presenta el municipio. A continuación, se describen las microcuencas abastecedoras del sistema de la cuenca del Río Negro y pertenecen al territorio de Une Cundinamarca (Plan de Desarrollo, 2016 – 2019):

- **Microcuenca Río Guativas:** Laguna de chocolate (abastecedora del casco urbano), una laguna en la cabecera de la quebrada La Ramada.
- **Microcuenca Río La Mesa:** Laguna abastecedora del acueducto de la vereda san isidro y acueducto del casco urbano, en los nacimientos de la quebrada piedra blanca se localizan tres lagunas.
- **Microcuenca Río Sáname:** En cercanías de la cuchilla San Salvador se localizan 2 lagunas
- **Microcuenca Río Pozo:** La laguna El Alar conforma uno de los nacimientos de este río.
- **Microcuenca Río Taguaque:** Existe una laguna en el área de nacimiento de la quebrada Los Comunes y otra laguna en el nacimiento de la quebrada Palos Altos.
- **Microcuenca quebrada el palmar:** En la parte alta de la microcuenca, en cercanías de la cuchilla Mundo nuevo existe una laguna

El Municipio de Une tiene una vocación en su mayoría agrícola por lo cual en la mayor parte de su territorio se facilita la implementación de estrategias para producción, acopio, transformación y comercialización de productos ya establecidos como: papa, cebolla, zanahoria alverja, cilantro y otros. Así como también ganado bovino y porcino. (Alcaldía – Une, Cundinamarca)

Sumado a lo anterior y de acuerdo a las proyecciones demográficas del DANE, el Municipio pasó de 8.014 habitantes en el año 2005 a 9.435 en 2017, presentando un incremento de 1.421 personas, que corresponden al 15.06% de su población total. Hace parte de la provincia de Oriente, la cual concentra el 3.23% de la población del departamento de Cundinamarca. Para el año 2017 el Municipio de Une cuenta con una densidad poblacional de 44.2 habitantes por kilómetro cuadrado. La población total está distribuida en un 50.01% en el área urbana y en un 49.99 % en el área rural. (Plan de Desarrollo, 2016 – 2019)

Finca Trinidad y Santa Helena

El lugar de estudio es un predio rural, ubicado dentro del Municipio de Une Cundinamarca, en la Vereda denominada La Combura y lleva como nombre Finca Trinidad y Santa Elena con una extensión para trabajo agrícola y pecuario de 42 hectáreas. La producción de leche cuenta con un Hato lechero de 22 vacas de ordeño promedio durante el año.

Los potreros poseen entre 5 y 14 cabezas de ganado/ha lo que significa que predomina la ganadería de tipo semi-intensiva, con un sistema de pastoreo extensivo; cuentan con una apropiada cantidad de terreno para esta actividad y se caracteriza por utilizar grandes extensiones de terreno para una baja carga animal (Loaiza, 2009)

El tipo de pasto más utilizado es el pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y en menor proporción otros como puntero (*Hyparrhenia rufa*) y micay (*Axonopus micay*). El período promedio de rotación de los potreros es de 34 días, y ninguno de los predios utiliza riego para el manejo del cultivo.

El excremento es dispuesto en campo abierto directamente, los empaques químicos los queman y en cuanto a mortinatos, placentas, cadáveres entre otros, los entierran.

El cuidado y manejo de la explotación bovina también incluye el suministro de antibióticos, purgantes y vacunas para tratar de enfermedades comunes en el ganado y garrapatas, mediante baños realizados cada 20 días, donde se utiliza un promedio de 4 a 5 litros de agua por cabeza de ganado; el residuo de los baños es arrojado por el desagüe. La vermifugación (desparasitación) se hace en promedio cada 4 meses. El ganado es

vacunado contra la aftosa en el 100% de los predios y contra la Brucelosis, Triple, Carbón Bacterial, Rabia, Estomatitis y Leptospirosis (Loaiza, 2009).

La zona de estudio se caracteriza por poseer gran cantidad de drenajes, quebradas, ríos y nacimientos. Donde los predios cuentan con al menos una fuente de agua, se abastecen exclusivamente de ellas. El principal medio para el abastecimiento de agua es el acueducto, que pertenece a la junta de acción comunal.

Se proporciona agua al ganado en abrevaderos, siendo éste el único medio para el 64% de las fincas, el otro 36% cuenta además de abrevaderos con otras alternativas, como abastecimiento directo de las microcuencas que pasan cerca de los predios ganaderos, las cuales pertenecen a la red hídrica de la Cuenca del río La Mesa. A diferencia del agua proveniente de los acueductos, la de nacimientos y microcuencas no cuenta con ningún sistema de potabilización.



Figura No. 4 Pastoreo del ganado. Fuente: Propia



Figura No. 5 Corral, dos puestos de ordeño eléctrico. Fuente: Propia.



Figura No. 6 Corral de ordeño parte posterior. Fuente: Propia.



Figura No. 7 Corral de ordeño parte delantera. Fuente: Propia.

CAPITULO III: EL PROCESO DE PRODUCCIÓN LECHERA

En el sitio de estudio se maneja un pastoreo con una rotación entre diferentes potreros con cerco permanente y cercas eléctricas portátiles. El ganado es contenido tanto por una cerca delantera como por otra trasera, controlando el suministro de nuevas raciones de alimento cada día. La cerca trasera protege el área recién pastada para que pueda recuperarse para futuros pastoreos (Posada et al., 2010)

Los animales se dividen en diferentes potreros por su edad y propósito, el hato lechero se rota entre los potreros cercanos al corral, la cantidad varía entre 15 a 20 vacas y sus terneros.

Cada día se trasladan las vacas al corral a las 5:30 am, se traen los terneros y se disponen de a parejas en los cubículos dispuestos para el ordeño eléctrico. Mientras se lava la ubre de cada vaca, se acerca el ternero para la estimulación del ordeño por 30 segundos, se retira el ternero y se pone el equipo de ordeño por 2 min aproximadamente. Al culminar el ordeño se trasladan las vacas del hato con sus terneros al potrero y se les suministra una nueva área de pastoreo.



Figura No. 8 Hato en hora de ordeño. Fuente: Propia

En el corral se llenan las cantinas de leche y se disponen para su recolección a las 6:30 am. Al entregar el producto del día se lavan las cantinas en el corral y se lava el corral de la siguiente manera:

- Recolección del estiércol en una zona aledaña al corral.
- Barrido del material sólido, para disminuir el arrastre con el agua.
- Lavado del corral.
- Disposición del agua por un tubo que sale zanja abajo por lo potreros sin ningún control.

A las dos de la tarde se separan los terneros de las vacas, en un corral alejado hasta la nueva mañana del ordeño



Figura No. 9 Recolección del estiércol y disposición en zona aledaña al corral. Fuente: Propia



Figura No. 10 Barrido del material sólido. Fuente: Propia



Figura No. 11 Lavado Corral. Fuente: Propia



Figura No. 12 Remoción del agua de lavado al sifón de desagüe. Fuente: Propia.



Figura No. 13 Punto de desagüe. Fuente: Propia.

En la Figura No. 14 se describe el diagram del flujo del proceso de ordeño

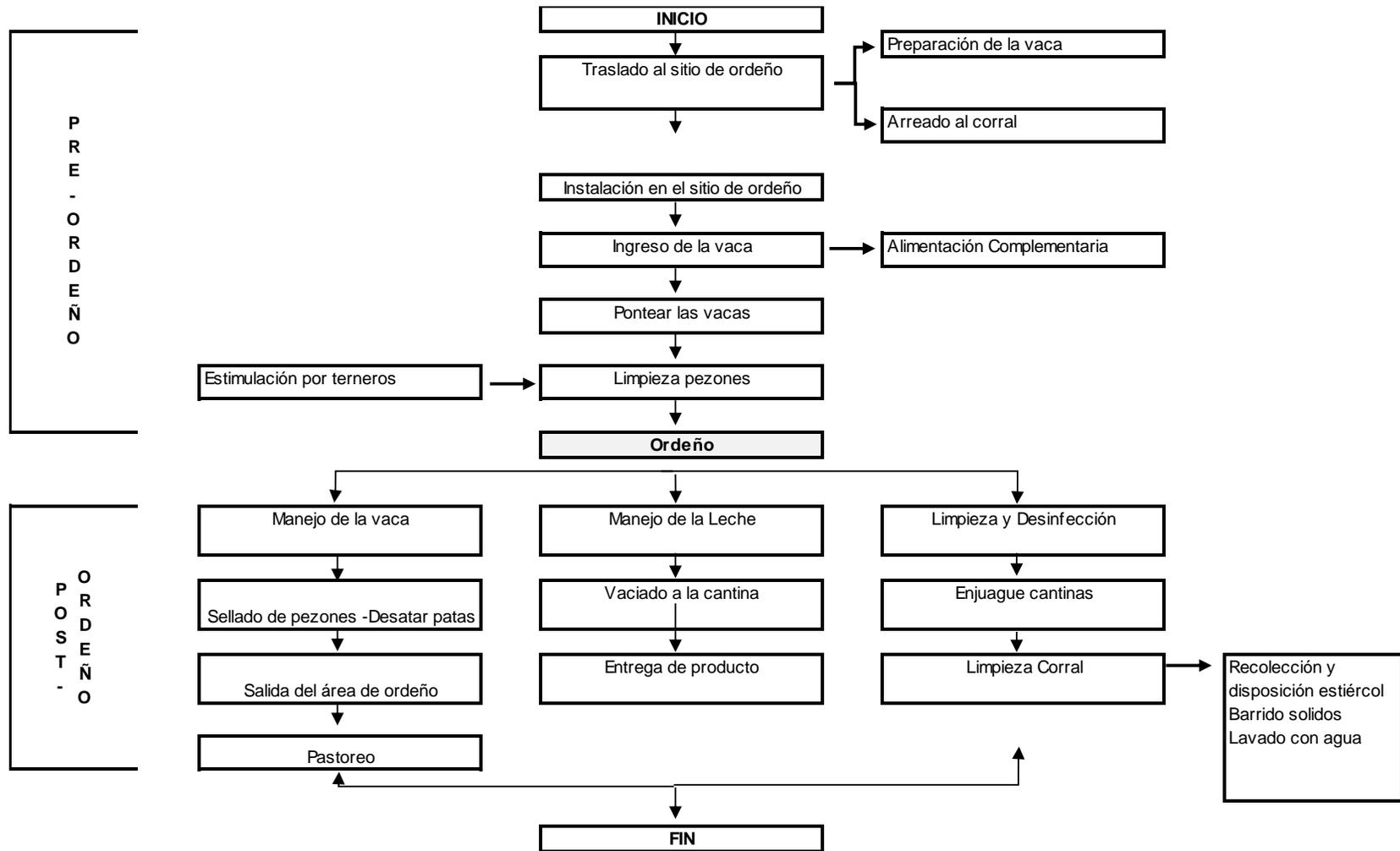


Figura No. 14 Diagrama de flujo del proceso de ordeño

En la Figura No. 15 se presenta el balance de caudales del proceso de ordeño.

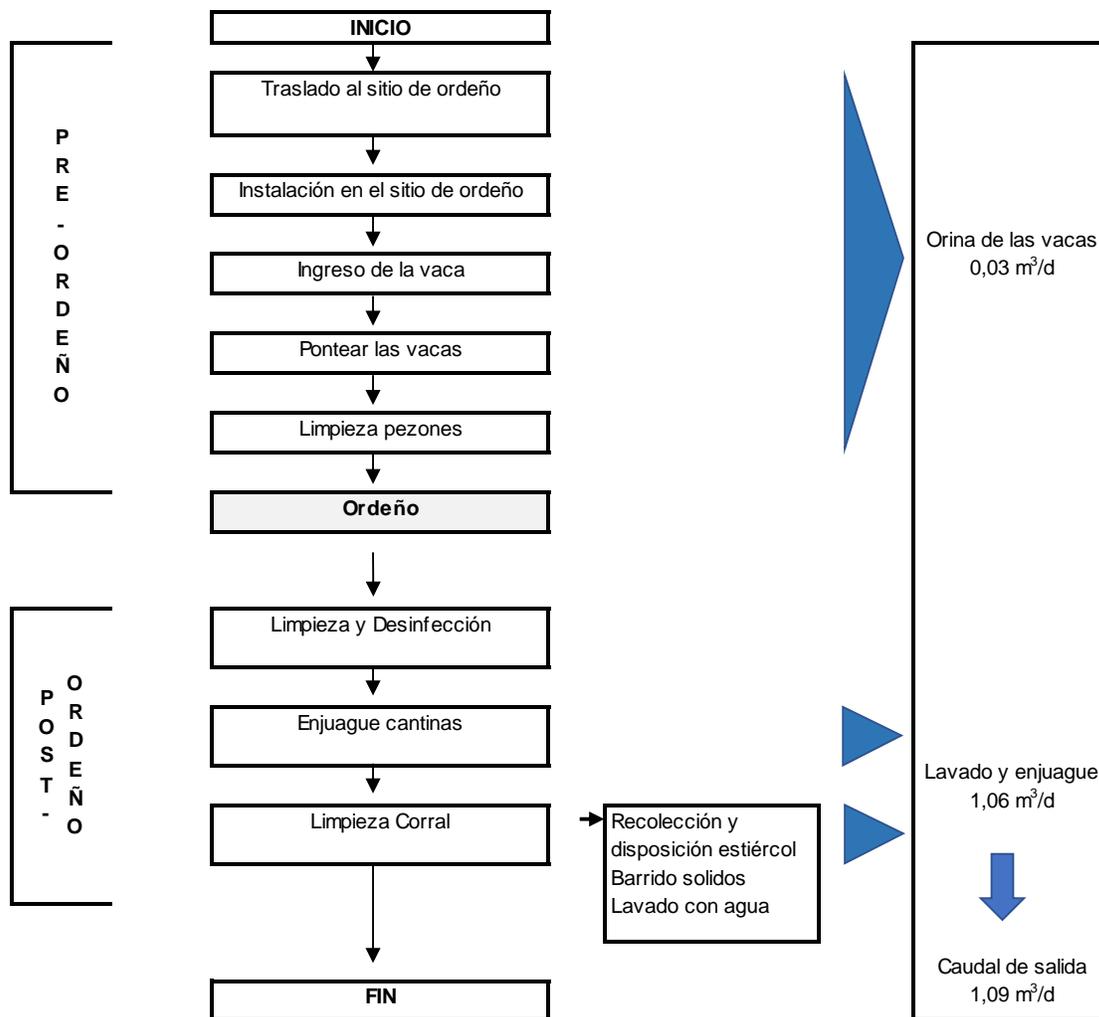


Figura No. 15 Balance de Caudales. Fuente: Propia

El proceso de Pre-Ordeño, Ordeño y Post-Ordeño, producen 1,09 m³ por día, los cuales son vertidos por un sifón que desemboca zanja abajo por un potrero donde se cultiva papa, cilantro, zanahoria o maíz, sin ningún tipo de tratamiento.

A 300 metros del lote se encuentra un lago, actualmente colmatado.

El análisis del diagrama de flujo del proceso (Figura No.14), determino las siguientes medidas de operación:

1. Implementación de ordeño eléctrico, disminuyendo tiempo del hato lechero en el corral.
2. Al culminar el ordeño por grupos, trasladar las vacas a los potreros.
3. Recoger los sólidos y disponerlos para un posible uso de abono.
4. Barrido de sólidos.

CAPITULO IV: CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

1. Muestreo

Se tomaron 5 muestras para análisis, según instructivo para la toma de muestras de aguas residuales del IDEAM, en las siguientes fechas:

Tabla No. 5 Fechas de toma de muestras

No.	Fecha
MUESTRA 1	19/05/2019
MUESTRA 2	22/05/2019
MUESTRA 3	26/05/2019
MUESTRA 4	29/05/2019
MUESTRA 5	2/06/2019

Fuente: Propia

2. Resultados

En la Tabla No. 6 se presentan los resultados de la caracterización del agua residual.

Tabla No. 6 Caracterización del agua residual

Parámetro	Unidades	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	Promedio
pH	Unidades de pH	7,36	8,52	7,05	6,8	6,62	7,27
DQO	mg O ₂ /L	3521	1864	1408	1450	1243	1897
DBO ₅	mg/L	4906	1509	1132	2642	1887	2415
ST	mg/L	7326	5982	3248	2042	3200	4360
STV	mg/L	3700	3608	1574	1554	2582	2604
STF	mg/L	3626	2374	1674	488	618	1756
SSED	mL/L	100	52	15	8	34	42
SST	mg/L	1794	3111	1740	315	664	1525
SSV	mg/L	1044	2044	1370	46	482	997
SSF	mg/L	750	1067	370	269	182	528
GRASAS Y ACEITES	mg/L	1,02	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
ALCALINIDAD	mg/L-CaCO ₃	290	360	300	120	290	272

Fuente: Propia

Como se observa los valores de pH varían en un rango de 6,5 a 9 unidades, el promedio del pH tiene un valor de 7,24, que se encuentra dentro del rango de la Resolución 1207 de 2014.

La DQO promedio es de 1897 mg O₂/L, superando el límite admisible de la Resolución 0631 de 2015.

La DBO₅ promedio es de 2415 mg/L, reflejando concentraciones considerables y alejadas del límite admisible de la Resolución 0631 de 2015. Los valores indican agua residual biodegradable, con valores de DBO superiores a la de DQO.

El valor promedio de ST es de 4360 mg/L, de STV es de 2604 mg/L y de STF es de 1746 mg/L, la normativa no registra un valor límite permisible de estos parámetros. Los valores de los STV son superiores a los STF, demostrando la alta concentración orgánica del agua residual.

Los valores de SSED varían en un rango de 8 a 100 mL/L, con promedio de 42 mL/L sobrepasando la Resolución 0631 de 2015, ya que el límite admisible es de 5 mL/L. Una variación representativa posiblemente al inadecuado proceso de limpieza del corral previo al lavado.

Los valores de SST varían en un rango de 315 a 3111 mg/L, con promedio de 1525 mg/L sobrepasando la Resolución 0631 de 2015, ya que el límite admisible es de 150 mg/L e indicando una cantidad elevada de materia suspendida.

Como se observa los valores de Grasas y Aceites son en promedio de 1,01 mg/L, límite admisible en la Resolución 0631 de 2015, que es de 20 mg/L.

Los resultados de la muestra No.1 presentan una mayor variación con relación a las demás muestras, lo cual puede ser generado por el número de vacas en el hato de ordeño ya que

el día de la muestra No. 1 había 25 vacas y el resto de días se encontraban 22 vacas en promedio.

Los parámetros de referencia para el diseño del tratamiento de las aguas residuales, son la DQO, la DBO₅, los SST y los SSED que superan la norma para vertimiento. Por tanto, la PTAR, en promedio debe proveer remociones del 90% en DBO₅, SST y SSED.

CAPITULO VI: SISTEMA DE TRATAMIENTO

Teniendo en cuenta que no existe alcantarillado sanitario y que el caudal diario es de solamente 1,09 m³/d, se considera como opción de tratamiento un sistema integrado por tanque séptico y disposición final sobre el suelo mediante un lecho de percolación.

1. Parámetros de diseño tanque séptico (RAS, 2017)

Teniendo como base el caudal afluente de 1,09 m³/d y siguiendo los parámetros generales de diseño dispuestos por la normativa:

- Tiempo de retención hidráulica de 24 horas (1 día), dándonos un volumen útil de:

$$\text{Volumen útil (m}^3\text{)} = 1,09 \text{ m}^3/\text{d} * 1 \text{ d} = 1,09 \text{ m}^3$$

- Relación entre largo – ancho del tanque séptico de 3:1
- Dos cámaras
- El volumen de la primera cámara debe ser de 2/3 del total del volumen.
- La profundidad útil según la relación con el volumen útil es de 2m

Tabla No. 7 Profundidad útil según volumen útil

Volumen útil (m ³)	Profundidad útil mínima (m)	Profundidad útil máxima (m)
Hasta 6	1,2	2,2
De 6 a 10	1,5	2,5
Más de 10	1,8	2,8

Fuente: Tabla 25 RAS 2017

Suponiendo una remoción de SS del 60% y lodo con 7% de solidos se tiene:

$$SSR = 1525 * 0,6 * 1,09 * 365 \times 10^{-3} = 364 \text{ kg/año}$$

$$\text{Lodo} = 364 / 0,07 = 5200 \text{ kg/año} \approx 5 \text{ m}^3/\text{año}$$

Por tanto, se adopta un tanque séptico de 3,0 m de longitud, 1,0 m de ancho y 2 m de profundidad con un volumen de 6 m³.

El muro de separación de la primera cámara a 2, 0 m del extremo de la entrada.

El tiempo de retención será de 6 días y el periodo de desenlode de 1 año.

Teniendo en cuenta que se requiere eficiencia de remoción del 90%, se acompaña el tanque séptico de un filtro anaerobio, al final del pozo séptico.

El lecho filtrante estará constituido por un lecho de grava con un volumen de 0,4 m³ por cada 1 m³/d de aguas residuales que va a tratar.

El volumen del lecho filtrante será:

$$V \text{ lecho filtrante (m}^3\text{)} = 1,09 * 0,4 = 0, 44 \text{ m}^3$$

Teniendo una altura de 0,5 m como mínimo del lecho de grava más 0,2 m de espacio entre la tapa de la cámara y la salida del efluente, se tendrá una cámara con las siguientes dimensiones:

Manteniendo el ancho uniforme de 1,0 m y con un largo de 1,2 m, que permiten la fácil inspección y mantenimiento

$$V \text{ lecho filtrante (m}^3\text{)} = L(\text{m}) * A(\text{m}) * h (\text{m})$$

$$V (m^3) = 1,2 (m) * 1,0 (m) * 0,5 (m)$$

$$V (m^3) = 0,6 m^3$$

El filtro anaerobio cuenta con una eficiencia de remoción de:

DBO₅=DQO= 80%

SST= 70%

En la figura No, 16 se muestra el esquema del sistema de tratamiento propuesto.

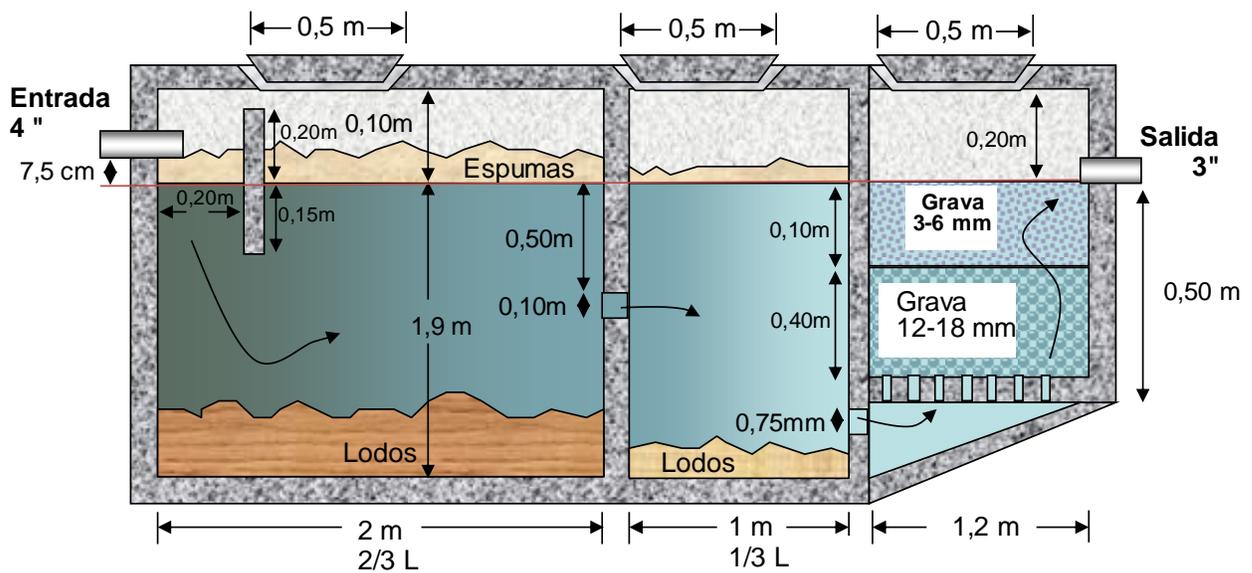


Figura No. 16 Esquema tanque séptico. Fuente: Adaptación <https://www.academia.edu/29898547>

2. Ensayo de permeabilidad y lecho de percolación

1. Se realizaron tres huecos espaciados uniformemente cada 2 metros.
2. Se realizaron con un diámetro de 30 cm y una profundidad de 100 cm.

3. Se colocó en el fondo una capa de 5 cm de grava, como capa de protección para permitir la filtración del agua.
4. Se llenó los tres huecos con agua para obtener 30 cm de altura de agua, durante una noche.
5. Pasada la noche se realizó una medición de la altura del agua a intervalos de 30m min, con los siguientes resultados:



Figura No. 17 Hueco 1 con un ancho de 30 cm en promedio. Fuente: Propia



Figura No. 18 Hueco 1 con una profundidad de 1 m. Fuente: Propia



Figura No. 19 Hueco 2 con un ancho de 30 cm en promedio. Fuente: Propia



Figura No. 20 Hueco 2 con una profundidad de 1 m. Fuente: Propia



Figura No. 21 Hueco 3 con un ancho de 30 cm en promedio. Fuente: Propia



Figura No. 22 Hueco 3 con una profundidad de 1 m. Fuente: Propia

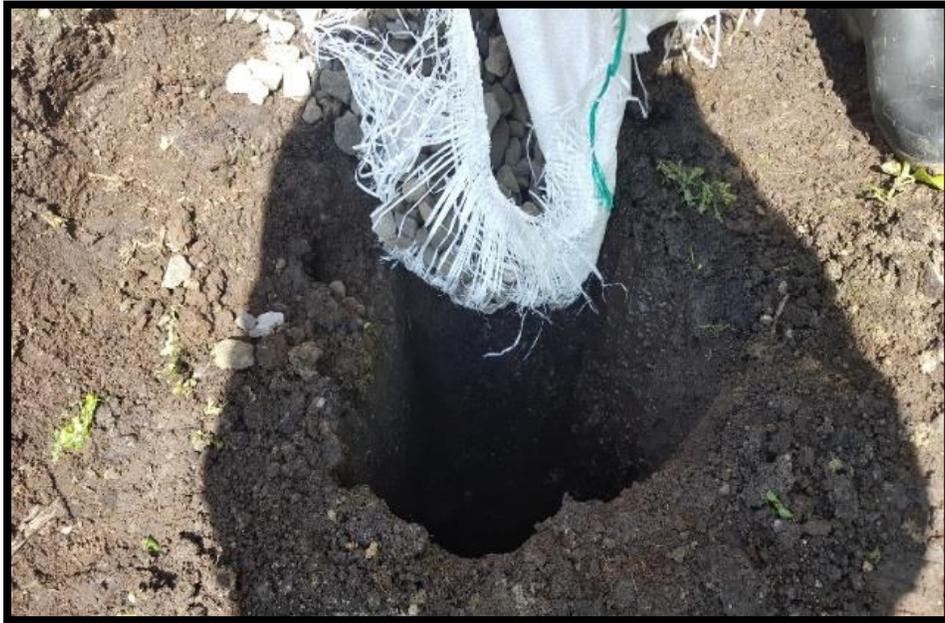


Figura No. 23 Se rellena los 3 huecos con material granular. Fuente: Propia



Figura No. 24 Relleno con material granular aproximadamente 5 cm. Fuente: Propia



Figura No. 25 Medición de la caída del agua cada 30 min. Fuente: Propia

En la Tabla No. 8 se relación los resultados que se tomaron según el procedimiento del ensayo de permeabilidad y los tiempos establecidos.

Tabla No. 8 Resultados del ensayo de permeabilidad

Ensayo	Periodo de percolación	Hueco 1 (cm)	Hueco 2 (cm)	Hueco 3 (cm)
1	30 min	0	0,5	3
2	30 min	0,5	0,9	4
3	30 min	0,6	1,0	4
4	30 min	0,8	1,0	5

Fuente: Propia

Con el ultimo resultado se determinó la tasa de percolación:

Tasa de percolación Hueco 1= 30 min/ 0,8 cm =37,5 min/cm (marga arcillolimosa)

Tasa de percolación Hueco 2= 30 min/ 1,0 cm =30 min/cm (marga arcillolimosa)

Tasa de percolación Hueco 3= 30 min/ 5 cm =6 min/cm (arena fina, arena marga)

Según la tasa de percolación la textura del suelo es del tipo de marga limosa, marga arcillosa limosa y arena fina, arena margosa, de acuerdo con la Tabla No. 9. Teniendo en cuenta el Hueco 3, se toma una tasa de aplicación de 32 L/d m², por ser una zona con pendiente menor del 10% y con mayor permeabilidad.

Tabla No. 9 Tasa de aplicación de aguas residuales para sistema de infiltración

Textura del suelo	Tasa de percolación min/cm	Tasa de aplicación L/m²d
Grava, arena gruesa	<0,40	No recomendado
Arena media a gruesa	0,4-2,0	48
Arena fina, arena margosa	2,1-6,0	32
Marga, marga arenosa	6,1-12,0	24
Marga, marga limosa porosa	12,1-24,0	18
Marga arcillolimosa, marga arcillosa (suelos sin arcillas expansivas)	24,1-48,0	8
Arcillas, arcillas coloidales	>48	No recomendado

Fuente: Romero, 1999

Según están indicación y con un caudal del efluente de

$$Q=1,09 \text{ m}^3/\text{d} = 1090 \text{ L/d}$$

Y con una tasa de aplicación de 32 L/d m² en cumplimiento de la tasa de aplicación menor o igual a 100 L/d m², se requiere un área de aplicación de 34,06 m²

$$\text{Área (m}^2\text{)} = \frac{1090 \text{ L/d}}{32 \frac{\text{L}}{\text{d}} \text{m}^2}$$

$$\text{Área (m}^2\text{)} = 34,06 \text{ m}^2$$

Adoptando 3 líneas de tubería de 0, 10 m de diámetro se diseña un lecho de percolación de 5 m de ancho y 7 m de longitud. (Figura No. 26)

- Pendiente de 0,5 %

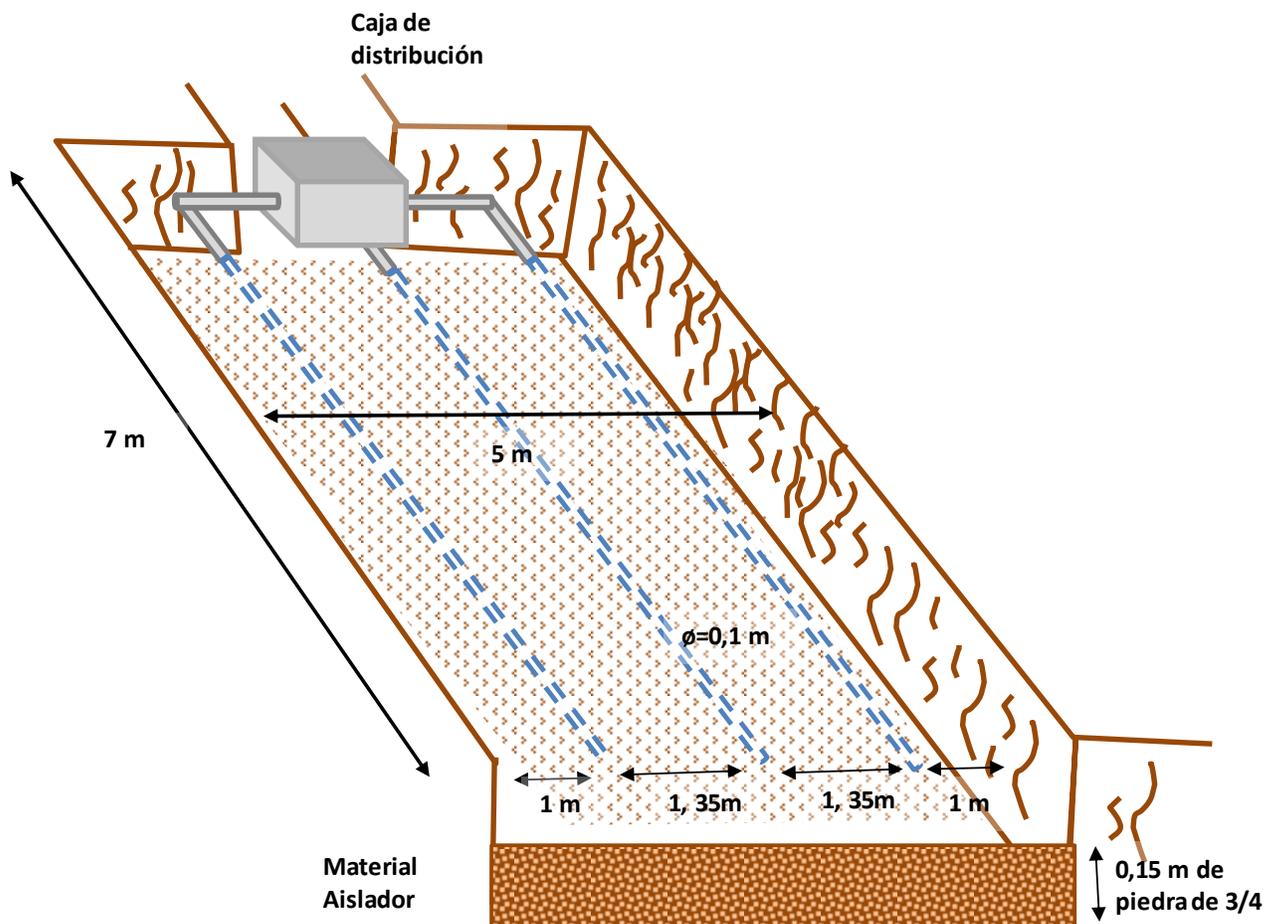


Figura No. 26 Esquema lecho de infiltración propuesto. Fuente: Propia

RECOMENDACIONES

Se recomienda:

- Recoger y disponer en un lugar específico el estiércol en masa, para un compostaje de la materia orgánica.
- Barrer el corral para minimizar la cantidad de sólidos y disponer adecuadamente.
- Lavar el corral con la mínima cantidad de agua posible, garantizando el estado de higiene del mismo.
- Procesar los excrementos de las vacas, con el compostaje para la producción de abonos agrícolas, mejorando la estructura del suelo y proporcionando nutrientes en niveles adecuados a los cultivos.

CONCLUSIONES

La caracterización del agua residual presentó los siguientes valores promedio: pH de 7,2, DQO de 1892 mg O₂/L, DBO₅ de 2415 mg/L, ST de 4360 mg/L, SSED de 42 mL/L, SST de 1525 mg/L y Grasas y aceites de 1,01 mg/L.

Los valores de pH varían en un rango de 6,5 a 9 unidades, promedio de 7,24, que se encuentra dentro del rango de la Resolución 1207 de 2014.

La DQO promedio es de 1897 mg O₂/L, superando el límite admisible de la Resolución 0631 de 2015.

La DBO₅ promedio es de 2415 mg/L, refleja concentraciones considerables, alejadas del límite admisible de la Resolución 0631 de 2015, e indicando agua residual biodegradable, con valores superiores a los de la DQO.

Los valores de SST varían en un rango de 315 a 3111 mg/L, con promedio de 1525 mg/L sobrepasando el límite admisible de 150 mg/L, e indicando una cantidad elevada de materia suspendida.

Los parámetros de referencia para el diseño del tratamiento de las aguas residuales, son la DQO, la DBO₅, los SST y los SSED que superan la norma para vertimiento. Por tanto, la PTAR, en promedio debe proveer remociones del 90% en DBO₅, SST y SSED.

El balance hídrico determinó un caudal de aguas residuales de 1,09 m³/día.

La PTAR propuesta consiste en un tanque séptico con filtro anaerobio seguido de un lecho filtrante como medio de aplicación al suelo del agua residual tratada, cumple la normativa de la resolución 1207 de 2014 y de la resolución 0631 de 2015.

BIBLIOGRAFÍA

1. Arias J., Balcázar A., Hurtado R. (1990). *Sistemas de producción bovina en Colombia*. Coyuntura Agropecuaria, 6(4), pp. 83-119.
2. Balcázar A. (1992). *La ganadería bovina en Colombia, 1970-1991*. Coyuntura Agropecuaria, 9(2).
3. Bolaños, T.M. (2016). Plan de gestión, manejo, tratamiento de vertimientos líquidos y subproductos de la planta de beneficio de ganado municipio de San Francisco-Cundinamarca. (Proyecto de grado tecnólogo). Tecnólogo en gestión ambiental y servicios públicos. Bogotá.
4. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2002). *Sistemas de Aprovechamiento de las Aguas Residuales en la Zona Agropecuaria del Distrito de Villa El Salvador, Lima, Perú*. Recuperado de <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsaar/e/proyecto/proyecto.html> el día 01 de mayo de 2019.
5. Chaparro A., (1992). Alternativas de tratamiento para aguas de uso agrícola. *Revista Agronomía Colombiana*, Volumen 9 - Numero 2, pp. 230-235.
6. Corporación Colombina de Investigación Agropecuaria. (1998). *Principales avances en investigación y desarrollo tecnológico por sistemas de producción pecuaria*. Recuperado de <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/12658> el día 05 de noviembre de 2019.
7. Decreto 1076 de 2015, Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiental y Desarrollo Sostenible. (2015) Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
8. Decreto 2811 de 1974, Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. (1974). Presidencia de la Republica de Colombia.

9. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2017). *Boletín Técnico Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA)*. Recuperado de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/enda/ena/2017/boletin_ena_2017.pdf el 01 de noviembre de 2019.
10. Escobar, J. (2002). Recursos Naturales e Infraestructura: La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar. Santiago de Chile: Naciones Unidas CEPAL ECLAC.
11. Federación de Ganaderos de Colombia. (2002). *La ganadería de leche: La ganadería Bovina en Colombia 2001-2002. Informe Anual*. Recuperado de <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/13046> el día 01 de noviembre de 2019.
12. Federación de Ganaderos de Colombia. (2008). *Medidas Integrales para el Manejo Ambiental de la Ganadería Bovina. Recurso Natural Agua, Cartilla #2*. Recuperado de <https://www.fedegan.org.co/cartilla-2-recurso-natural-agua> el 01 de noviembre de 2019.
13. Federación Nacional de Ganaderos. (2011). *Inventario Bovino Nacional*. Recuperado de <http://www.fedegan.org.co/estadisticas/inventario-bovino-nacional> el día 01 de agosto de 2019.
14. Holmann, F. Rivas, L. Carulla, J. Rivera, B. Giraldo, L. Guzmán, S. Martínez, M. Medina, A. Farrow, A. (2004). Producción de leche y su relación con los mercados: Caso colombiano. Colombia.: Centro International de Agricultura Tropical.
15. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2011). *Buenas prácticas de ordeño*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-bo952s.pdf> el 01 de noviembre de 2019.
16. Ley 1931 de 2018, por la cual se establecen directrices para la gestión del cambio climático. (2018). Congreso de Colombia. Colombia.

17. Loaiza, Y.A. Osorio, A.L. (2009). Gestión del agua en el sector de la ganadería bovina en la cuenca Rio La Vieja departamentos de Quindío y Risaralda. (Tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira.
18. Martínez H., Espinal F., Barrio C. (2002) Comportamiento del empleo generado por las cadenas agropecuarias de Colombia. *Observatorio de Competitividad Agro cadenas Colombia*, Memo Cadena No. 5.
19. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *Plan de Acción Sectorial de Mitigación de Gases Efecto Invernadero Agropecuario*. Recuperado de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=470:plan-tilla-cambio-climatico-26> el 01 de noviembre de 2019.
20. Murgueitio, E. (2003). *Impacto ambiental de la ganadería de leche en Colombia y alternativas de solución*. Livestock Research for Rural Development 15. Recuperado del <http://www.cipav.org.co/lrrd/lrrd15/10/murg1510.htm> el 01 de noviembre de 2019.
21. Paniagua M., W. (2006). Limpieza de la sala para ordeño y corrales de espera en lecherías, con uso racional del agua. *Revista Tecnología en Marcha*, Vol.19-2, pp. 53-58.
22. Pinos R., J., García L., J., Peña A., L., et al. (2012). Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. *Agrociencia*, 46, No.4, pp. 359-370.
23. Plan de desarrollo 2016-2019. Recuperado de https://unecundinamarca.micolombiadigital.gov.co/sites/unecundinamarca/content/files/000041/2037_plan-de-desarrollo-2016-2019.pdf el 01 de octubre de 2019.
24. Posada A., S., Loaiza., E., Restrepo J., et al. (2010). Caracterización del ordeño manual e identificación de puntos críticos de control para la calidad higiénica de la leche en una finca del norte de Antioquia. *Revista Lasallista de Investigación*, Vol 7 No.2, pp. 35-46.

25. Protocolo de Kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre cambio climático. (1998) Naciones Unidas
26. Qing L., Dongliang H., Zepu J., et al. (2013). Estimación de la cantidad de producción de estiércol de ganado y aves de corral y evaluación del impacto ambiental en Guangxi. *Investigación Agrícola Asiática*, 5 (11), pp. 93-96.
27. Recalde, M.P. Araya, J.D. (2006, diciembre). Diseño de tecnologías para la descontaminación de aguas residuales en sistemas agropecuarios. (trabajo de grado pregrado). Universidad EARTH. Costa Rica.
28. Resolución 0330 de 2017, por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico-RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009. (2017). Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.
29. Resolución 0631 de 2015, Por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpo de aguas superficiales ya los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. (2015) Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
30. Resolución 1207 de 2014, por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. (2014). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
31. Resolución 2733 de 2010, por la cual se adoptan los requisitos y evidencias de contribución al desarrollo sostenible del país, se establece el procedimiento para la aprobación nacional de programas de actividades (PoA- por sus siglas en inglés) bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y se reglamenta la autorización de las entidades coordinadoras. (2010). Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Colombia.
32. Romero, J. (1999). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

33. Sánchez L. (1998). Manejo del nitrógeno en praderas a lo largo del año. *Tecnología Agroalimentaria. CIATA. Edición especial.* pp.65-66.
34. Senn, C. (1971). Un estudio de la gestión y utilización de los desechos de las instalaciones de alojamiento de vacas de alta densidad. Los Ángeles. Fundación de Salud Pública del Condado de los Ángeles.
35. Vázquez, Lilia. (2010, enero). Situación del tratamiento de aguas residuales en los establos lecheros de Tijuana y los factores limitantes en su tecnificación (tesis de maestría). Maestría en administración integral del ambiente. El Colegio de la Frontera Norte.