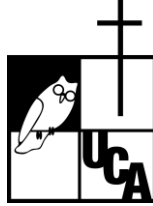


**UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA
JOSÉ SIMEÓN CAÑAS**



**PROPUESTA PARA EL MANEJO DE SEDIMENTOS QUE AFECTAN
LOS POZOS DE ABSORCIÓN UBICADOS EN LA COOPERATIVA
EL ESPINO**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN PREPARADO PARA LA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**PARA OPTAR AL GRADO DE
INGENIERO CIVIL**

POR:

**JORGE ENRIQUE CANALES ACUÑA
JOSÉ GUILLERMO CARBAJAL SUÁREZ
JONATHAN ALEXANDER MENCÍA BARAHONA**

**MAYO 2022
ANTIGUO CUSCATLÁN, EL SALVADOR, C.A.**

RECTOR

ANDREU OLIVA DE LA ESPERANZA, S.J.

SECRETARIA GENERAL

SILVIA ELINOR AZUCENA DE FERNÁNDEZ

DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

CARLOS ERNESTO RIVAS CERNA

DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

SAÚL ERNESTO GRANADA LIZAMA

DIRECTOR DE TRABAJO

JACQUELINE IVETTE CATIVO SANDOVAL

LECTOR

JAIME EDUARDO CONTRERAS LEMUS

DEDICATORIA

Primeramente, agradecido con Dios por darme la fortaleza para culminar esta etapa difícil de mi vida, por bendecirme en este camino al conocer a grandes personas que se convirtieron en mis mejores amigos, y de los que estoy eternamente agradecido por su gran apoyo. Esto lo dedico a mi familia, a mi padre Roger Carbajal, a mis hermanas Vanessa, Jessica y Marcela, y especialmente a mi madre Yolanda Suárez, porque después de Dios es ella quien ha hecho posible este sueño, su lucha, su gran apoyo y sus oraciones puestas en mí y en el proceso han permitido que llegue hasta el final, y de lo que espero llenarla de mucho orgullo porque es una gran madre, y mi mejor maestra. A mis compañeros de tesis y amigos Jonathan Mencía y Jorge Canales, con los que estoy muy agradecido por permitirme formar parte de este grupo y de esta experiencia, y espero Dios les bendiga siempre.

José Guillermo Carbajal Suárez

DEDICATORIA

Para los que ya me esperan y hay que hacer sentir orgullosos, pero en especial, a María de Jesús Meléndez, a quien si tuviera la oportunidad le diría, *gracias por haberme amado*.

Jonathan Alexander Mencía Barahona

RESUMEN

En esta investigación se dan a conocer las intervenciones de control de sedimentos que se diseñaron para uno de los pozos de absorción de agua lluvia construidos en la zona de cultivo permanente de café bajo sombra de la Cooperativa El Espino, ubicada en la falda sureste del volcán de San Salvador, entre los municipios de Santa Tecla y Antigua Cuscatlán, colindante con el área natural protegida El Espino-Bosque Los Pericos. Actualmente, dentro de la finca no se cuenta con barreras vivas o muertas u otros elementos en los alrededores de los pozos que impidan a la escorrentía superficial viajar libremente hasta ellos, depositando sedimentos y otros materiales.

De no manejar el problema, se corre el riesgo de afectar la forma en que operan los pozos de absorción y ocasionar que este tipo de sistemas urbanos de drenaje sostenibles ya no beneficien a la zona. Es así como el objetivo de este trabajo es proponer para uno de los pozos ya construidos, las intervenciones suficientes que le permitan infiltrar agua con una menor afectación de sedimentos para que operen adecuadamente.

Estas intervenciones se planifican considerando el patrón de lluvia registrado y los caudales que genera, a la topografía de la zona y al volumen potencial de arrastre de sólidos según el tipo de suelo del lugar, porque de esta forma, se dimensiona tamaño y capacidad de cada una. Además, estas son económicas porque son diseñadas con materiales de bajo costo y con los que la Cooperativa dispone, fáciles de construir, y potencialmente adaptables a los demás pozos que presentan la misma problemática.

Este documento consta de cinco capítulos en total y en el primero se describe de forma general los sistemas urbanos de drenaje sostenibles y el enfoque con el que se tomó el estudio de estos elementos. Además, se mencionan los antecedentes sobre la erosión, la sedimentación y formas de poder mitigarlos. Para finalizar el capítulo se enumeran los límites y alcances, los objetivos que se alcanzaron y la metodología que se va a seguir.

En el capítulo dos se inicia con todos los conceptos que se toman en cuenta para esta investigación, como los hidrológicos, lo referente al sistema de referencia de coordenadas aplicado, el método RUSLE que sirve para tener una estimación del volumen de sedimentos, la teoría concerniente a los pozos de absorción y los procesos de erosión y sedimentación.

El capítulo tres corresponde a aspectos como: la descripción de la Cooperativa donde se ubican los pozos de absorción, todos los aspectos climatológicos relevantes para el estudio, la geología de la zona y la descripción y ubicación del pozo elegido, con esquemas incluidos.

En el capítulo cuatro se dan a conocer las consideraciones para el proceso de cálculo de la propuesta, la verificación de la capacidad de infiltración en el sitio con una prueba para tener una idea real de la forma en que los pozos infiltran el agua. Luego se comenta sobre el cálculo del volumen de sedimentos producidos por año, se presentan las intervenciones propuestas y su ubicación, y por último el detalle de los materiales empleados y su costo total.

Finalmente, en el capítulo cinco se incorporan las conclusiones de la investigación realizada, y en base a ellas se hacen las respectivas recomendaciones para las intervenciones propuestas y el mantenimiento que se les aconseja realizar.

ÍNDICE

RESUMEN.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS	vii
SIGLAS.....	ix
ABREVIATURAS.....	xi
NOMENCLATURA	xiii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.	2
1.2. Límites y alcances.....	3
1.3. Objetivos.	3
1.3.1. Objetivo General:	3
1.3.2. Objetivos Específicos:.....	3
1.4. Metodología.	3
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Conceptos hidrológicos.....	5
2.2. Sistema de referencia de coordenadas SRC.....	7
2.3. Pozos de absorción.....	7
2.3.1. Operación y mantenimiento.	8
2.4. Procesos de erosión y sedimentación.....	8
2.4.1. Determinación de la carga de sedimentos a través del Método RUSLE.....	9
2.4.2. Sedimentos y propuestas de cómo manejarlos.....	15
CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO Y SUS POZOS DE ABSORCIÓN.....	21
3.1. Ubicación de la Cooperativa El Espino.	21
3.2. Climatología de la Cooperativa El Espino.....	24
3.3. Geología de la Cooperativa El Espino.	25
3.4. Ubicación y descripción del pozo.	28
CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE ALTERNATIVA.....	35
4.1. Consideraciones para el proceso de cálculo de la propuesta.....	36
4.2. Verificación de la capacidad de infiltración, en el pozo 3.....	37
4.3. Cálculo de volumen de sedimentos producidos por año.	40
4.4. Presentación de Propuesta.....	42

4.4.1. Intervenciones a las canaletas.	43
4.4.2. Barreras muertas dentro de las canaletas que van a dar a los pozos.	44
4.4.3. Barrera de geotextil para proteger el acceso del pozo 4.....	46
4.4.4. Cámara de sedimentación.	46
4.5. Costo de materiales empleados.....	48
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	49
5.1. Conclusiones.....	49
5.2. Recomendaciones	49

ANEXOS

ANEXO A. Curvas de intensidad-duración- frecuencia.

ANEXO B. Puntos de delimitación finca el espino.

ANEXO C. Mapa de tipos de suelo y textura.

ANEXO D. Resultados de método RUSLE.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Ejemplo de una cuenca y sus partes.....	5
Figura 2.2. Coeficientes de esorrentía sugeridos.....	6
Figura 2.3. Ejemplo de barrera de sedimentos de geotextil.	15
Figura 2.4. Barrera muerta de piedra.	16
Figura 2.5. Ejemplo de barreras vivas en una ladera.	16
Figura 2.6. Ejemplo de una acequia a nivel.	17
Figura 2.7. Cama disipadora de energía de piedra.	18
Figura 3.1. Zona Cooperativa El Espino.....	21
Figura 3.2. Linderos de Cooperativa El Espino.	22
Figura 3.3. Detalle de los usos de suelos predominantes en la finca El Espino.....	23
Figura 3.4. Calle rural de la Cooperativa El Espino.....	23
Figura 3.5. Zonas climáticas predominantes en Cooperativa El Espino y alrededores.....	24
Figura 3.6. Geología de los alrededores de la zona de estudio.	27
Figura 3.7. Detalle de la zona correspondiente a la Cooperativa El Espino, con la ubicación del pozo de estudio.	28
Figura 3.8. Ubicación de pozo 4, con su altitud y coordenadas geográficas.....	29
Figura 3.9. Acumulación de lodo sobre la superficie del pozo 4 después de una tormenta.....	30
Figura 3.10. Una de las canaletas del pozo 4 cubierta de sedimentos.....	30
Figura 3.11. Uno de los pozos de absorción cubierto por sedimentos.	31
Figura 3.12. Otro ejemplo de pozo de absorción cubierto por sedimentos.	31
Figura 3.13. Vista en planta de pozo 4.....	32
Figura 3.14. Vista frontal de pozo 4.....	32
Figura 3.15. Vista isométrica de pozo 4.....	33
Figura 4.1. Canaletas 1 (azul) y 2 (morada) a los extremos del tramo total de calle junto con el área de taludes considerada.	35
Figura 4.2. La división que se utilizó del tramo de calle para realizar el análisis.....	36
Figura 4.3. Pozo 3, parte de tramo de calle entre curvas y acceso al pozo 4 (detrás del vehículo)...	37
Figura 4.4. Limpieza superficial de pozo 3.....	37
Figura 4.5. Proceso de llenado de pozo 3.....	38
Figura 4.6. Cálculo de caudal con barril de 55 galones de capacidad.....	39
Figura 4.7. Material extraído durante la excavación del pozo 3.	39

Figura 4.8. Acumulación de lodo en pozo 4 después de una tormenta.	40
Figura 4.9. Perfil longitudinal de calle en función de las elevaciones.	40
Figura 4.10. Pendientes en grados de la calle.....	41
Figura 4.11. Ubicación de intervenciones sobre la calle y terreno del pozo.	42
Figura 4.12. Conjunto de barrera de bambú con su cama de disipación de energía.....	44
Figura 4.13. Barreras de bambú para las canaletas que van directas al pozo 4.	45
Figura 4.14. Canaletas que aportan agua directamente al pozo.....	45
Figura 4.15. Barrera de geotextil y tramo de canaleta 1.....	46
Figura 4.16. Cámara de sedimentación con muro de varas de bambú.	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Valores de intensidad de lluvia de la estación meteorológica El Boquerón según periodos de retorno y duración de tormentas.....	7
Tabla 2.2. Valores de erosionabilidad de suelo según su tipo.....	10
Tabla 2.3. Valores de K según tipo de suelo y contenido de materia orgánica.....	11
Tabla 2.4. Valores de exponente m.....	13
Tabla 2.5. Valores de cobertura y manejo de vegetación.....	13
Tabla 2.6. Valores de prácticas de conservación.	14
Tabla 2.7. Distancias entre obras de control de sedimentos.....	18
Tabla 4.1. Cantidad total de intervenciones realizadas en las canaletas 1 y 2 de acuerdo a los tramos.	43
Tabla 4.2. Distribución de las barreras de bambú dentro de las canaletas del pozo 4.	44
Tabla 4.3. Cantidades relacionadas a la barrera de geotextil.	46
Tabla 4.4. Volumen geométrico y neto del pozo 4.	47
Tabla 4.5. Valores de volumen mínimo y propuesto para la cámara de sedimentación del pozo 4..	47
Tabla 4.6. Costo de los materiales empleados para la construcción de las intervenciones propuestas.	48

SIGLAS

AMSS:	Área Metropolitana de San Salvador.
ANDA:	Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados.
CDOT:	Colorado Department of Transportation (Departamento de Transporte de Colorado).
CENTA:	Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y forestal.
COAMSS:	Consejo de alcaldes del Área Metropolitana de San Salvador.
CONAFOR:	Comisión Nacional Forestal.
DEM:	Digital Elevation Modeling (Modelo de Elevación Digital).
EPSG:	European Petroleum Survey Group (Grupo Europeo de Investigación Petrolera).
GPS:	Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global).
IDF:	Intensidad, Duración y Frecuencia.
INIFAP:	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
MARN:	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
NAD-27:	North American Datum of 1927 (Datum Norteamericano de 1927)
OPAMSS:	Oficina de planificación del Área Metropolitana de San Salvador.
PVC:	Polyvinyl Chloride (Policloruro de vinilo).
RUSLE:	Revised Universal Soil Loss Equation (Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo).
SAGARPA:	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
SICTA:	Sistema de Integración Centroamericano de Tecnología Agrícola.
SIG:	Sistemas de Información Geográfica.
SNET:	Servicio Nacional de Estudios Territoriales.
SUDS:	Sistema Urbano de Drenaje Sostenible.
TBJ:	Tierra Blanca Joven.
UGR:	Universidad de Granada.
USLE:	Universal Soil Loss Equation (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo).
VIGEA:	Visualizador de Información Geográfico de Evaluación Ambiental.
WGS:	World Geodetic System (Sistema Geodésico Mundial).

ABREVIATURAS

et al: Y otros.
s.f. Sin fecha.

NOMENCLATURA

A:	Área.
A_w :	Sabana tropical caliente.
C:	Coefficiente de escorrentía.
i:	Intensidad de lluvia.
m:	Relación de erosión entre surcos.
Q_E :	Caudal de escorrentía.
s1:	Miembro de la formación San Salvador.
s2:	Miembro de la formación San Salvador.
s3a:	Miembro de la formación San Salvador.
s4:	Miembro de la formación San Salvador.
s5b:	Miembro de la formación San Salvador.
s5c:	Miembro de la formación San Salvador.
α :	Ángulo de inclinación.
λ :	Longitud de tramo horizontal.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

En San Salvador se han implementado recientemente la política de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenibles (SUDS), como respuesta a la vulnerabilidad a inundaciones, desbordamiento de ríos y deslizamientos de tierra (City Adapt, 2021).

Los SUDS contribuyen a que las ciudades respondan mejor a estos fenómenos, permitiendo retener el agua lluvia durante las tormentas e infiltrándola hacia el subsuelo. Todo esto ayuda a que la escorrentía que viaja desde las zonas altas hacia las ciudades lo haga de forma más controlada, que haya una disminución de agua reduciendo que los ríos y quebradas se desborden, y que tampoco se rebase la capacidad de los alcantarillados.

Una de las alternativas propuestas en los sistemas de drenaje sostenible son los pozos de absorción de agua lluvia, y en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) comenzaron a aplicarse recientemente en la Cooperativa El Espino según City Adapt (2021), y por estar ubicada en la falda sureste del volcán de San Salvador, permitirá reducir la escorrentía superficial que viaja desde esta zona hasta las quebradas que atraviesan el área urbana. En base al grado de impacto que esta ampliación de este proyecto tenga en el futuro que esta fase inicial tenga según el estudio respectivo.

Lo que afecta actualmente a la mayoría de los pozos son los sedimentos que las tormentas arrastran y les deposita, por lo que es necesario diseñar intervenciones que permitan su control. Si bien la ubicación estratégica de cada pozo les permite captar más agua lluvia también esta los hace susceptibles a la depositación de sedimentos, al punto de llenar por completo los alrededores de cada pozo, y en algunos casos provoca estancamientos temporales de lodo en sus partes superiores, dificultando el paso del agua hacia el subsuelo.

Se hace hincapié que la constante acumulación de sedimentos en los pozos y la no intervención adecuada para mitigar el problema, provocará que su operación se vea afectada, ya que estas partículas sólidas anegan los espacios vacíos del relleno de grava y arena gruesa que los componen, hasta llegar al punto de no poder captar e infiltrar agua lluvia.

En este estudio, se proponen distintas intervenciones que permitan controlar los sedimentos que la escorrentía arrastra en cada tormenta, de forma que sean viables según el entorno del pozo,

económicos, fáciles de construir y de mantener, y que a la vez puedan adaptarse a los demás pozos con la misma problemática.

1.1. Antecedentes.

En El Salvador en general se han centrado más en el análisis de la erosión y sedimentación y de cómo cuantificarlos. Además, se han estudiado los efectos en las principales cuencas hidrográficas del país desde las perspectivas hidrológica y el deterioro ecológico, y en menor medida, en cómo intervenir las áreas afectadas para mitigar el problema. En cambio, la documentación internacional consultada se enfoca en ambos factores, recopilando las distintas intervenciones para este tipo de problemas que se han realizado en sectores como la agricultura, la gestión forestal y las obras viales.

Las formas de cómo estimar la erosión generada por el agua lluvia y qué intervenciones diseñar para controlar los sedimentos acarreados son de interés para esta investigación.

- Investigaciones nacionales.

Estudio de los procesos de erosión-sedimentación Playa El Espino, República de El Salvador. (MARN, 2012). Esta investigación se centró en las soluciones al problema de erosión en playa El Espino, y aunque se trate de un entorno diferente al de la Cooperativa El Espino, en esta proponen algunas intervenciones que se consideraron aplicables. en esta investigación.

Erosión y transporte de sedimentos suspendidos en la cuenca del río Grande de San Miguel (Beltrán, 2017). En este documento se analizó el fenómeno de sedimentación a través de dos métodos de cálculo del volumen de sedimentos que la cuenca aporta, uno de ellos es el método RUSLE.

- Investigaciones internacionales.

Riesgo a la erosión hídrica y proyección de acciones de manejo y conservación del suelo en 32 microcuencas de San Luis Potosí (INIFAP, 2007). Este informe recopila las experiencias de campo con el análisis del grado de deterioro por erosión en microcuencas de uso agrícola y gestión forestal ubicadas en esta ciudad mexicana, y plantea las intervenciones a realizar.

Control de la erosión en desmontes originados por obras de infraestructura viaria: Aplicación al entorno de Palencia capital (Hevia, 2002). Es una propuesta española que expone una amplia gama de métodos de control de erosión hídrica y manejo de escorrentía que se pueden implementar en la infraestructura vial de la ciudad de Palencia, enfatizando las zonas donde se removió la vegetación existente y no se intervino adecuadamente para evitar su rápido deterioro.

1.2.Límites y alcances.

La selección del tramo de calle a analizar, este se escogió pensando en el tiempo que se tenía disponible, su accesibilidad y considerando los problemas de sedimentos observados en los pozos de absorción.

Sobre las intervenciones de la solución propuesta, estas se definieron para las condiciones específicas de uno de los pozos de la cooperativa, sin embargo, también se consideró el hecho de que estas pudieran ser adaptadas e implementadas en todos los demás.

Para las intervenciones de manejo y control de sedimentos producidos en la Cooperativa El Espino, se realizó una propuesta que incluyera elementos de bajo costo y que aprovechara los recursos naturales de la zona.

1.3.Objetivos.

1.3.1.Objetivo General:

Proponer las intervenciones necesarias para manejo de escorrentía y sedimentos que ayuden a mantener la eficiencia y la vida útil de los pozos de absorción de la Cooperativa El Espino.

1.3.2.Objetivos Específicos:

- Diseñar soluciones que sean adaptables a todos los pozos de la cooperativa.
- Sugerir alternativas de manejo de sedimentos de fácil implementación que permitan la acumulación de estos con el fin de retardar la colmatación total del pozo.

1.4.Metodología.

Se utilizó la metodología RUSLE para estimar el volumen potencial total que la cuenca delimitada produce, y a partir de este análisis se determinará el volumen de arrastre de sedimentos.

Se utilizó el método racional para la evaluación del caudal y el hidrograma triangular para el cálculo de volumen.

Las extensiones de área se delimitaron de acuerdo al grado de afectación que se observa debido al comportamiento del terreno, algunos rasgos visibles buscados para realizar esta actividad son los siguientes: cambios de pendientes, rastros de direcciones que toma el flujo en época de lluvia y depósitos de sedimentos.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.

2.1. Conceptos hidrológicos.

En este apartado se mencionan los conceptos que intervienen en el desempeño de los pozos de absorción, las condiciones de lluvia a las que se exponen y sus características a analizar.

La cuenca es un área de terreno en donde las gotas de lluvia que caen tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida. Existen dos tipos de cuencas, la superficial, y la subterránea que va ligada a la primera y también cuenta con ramificaciones que representan los flujos de agua sobre la zona de Figura 2.1.

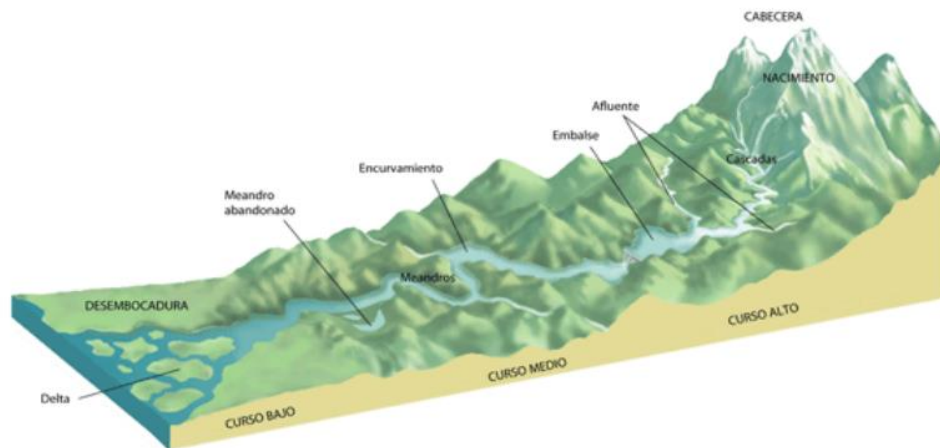


Figura 2.1. Ejemplo de una cuenca y sus partes. Tomado de Global Water Partnership (GWP, s.f.).

La escorrentía superficial o escurrimiento es el exceso de precipitación que ocurre después de una lluvia intensa que no se logró infiltrar al suelo, y por lo tanto se mueve libremente por la superficie del terreno hasta la salida de una cuenca. La forma de considerar este flujo que se traslada de un punto a otro es a través de un coeficiente, el cual se ha calculado en base a experimentar con las particularidades de toda clase de terrenos, y de allí que a cada uno de ellos se le asigna un valor representativo que es de mucha utilidad para la estimación del caudal que una tormenta genera.

Generalmente su valor teórico es tomado de tablas y a continuación se presentan los sugeridos en Chow *et al.* (1994) se muestran en la Figura 2.2.

Coefficientes de escorrentía para ser usados en el método racional

Característica de la superficie	Periodo de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
Áreas desarrolladas							
Asfáltico	0.73	0.77	0.81	0.86	0.90	0.95	1.00
Concreto/techo	0.75	0.80	0.83	0.88	0.92	0.97	1.00
Zonas verdes (jardines, parques, etc.)							
<i>Condición pobre</i> (cubierta de pasto menor del 50% del área)							
Plano, 0-2%	0.32	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.58
Promedio, 2-7%	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.53	0.61
Pendiente, superior a 7%	0.40	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55	0.62
<i>Condición promedio</i> (cubierta de pasto del 50 al 75% del área)							
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente, superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
<i>Condición buena</i> (cubierta de pasto mayor del 75% del área)							
Plano, 0-2%	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36	0.49
Promedio, 2-7%	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46	0.56
Pendiente, superior a 7%	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.51	0.58
Áreas no desarrolladas							
Área de cultivos							
Plano, 0-2%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.57
Promedio, 2-7%	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.60
Pendiente, superior a 7%	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54	0.61
Pastizales							
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente, superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
Bosques							
Plano, 0-2%	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.48
Promedio, 2-7%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.56
Pendiente, superior a 7%	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	0.58

Nota: Los valores de la tabla son los estándares utilizados en la ciudad de Austin, Texas. Utilizada con autorización.

Figura 2.2. Coeficientes de escorrentía sugeridos. Tomado de (Chow *et al.*, 1994).

En algunas ocasiones hay dos o más tipos de superficies que están mezcladas o resulta más conveniente verlas como una sola, y los valores de la Figura 2.2 se utilizan para calcular uno de tipo ponderado como se indica en la ecuación 2.1.

$$C_{ponderado} = \left(\frac{(C_1 * A_1) + (C_2 * A_2) \dots + (C_n * A_n)}{(A_1 + A_2 \dots + A_n)} \right) \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Una fuente de información importante en el análisis de tormenta son las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) que son parte de una relación matemática entre la intensidad de la precipitación, la duración y la frecuencia con la que se presenta la tormenta (Tabla 2.1).

Tabla 2.1: Valores de intensidad de lluvia de la estación meteorológica El Boquerón según periodos de retorno y duración de tormentas.

Periodo de retorno (años)	Duración (minutos)												
	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180	240	360
2	3.11	2.28	1.88	1.70	1.37	1.04	0.85	0.61	0.48	0.39	0.34	0.25	0.19
5	3.69	2.63	2.13	1.97	1.57	1.17	0.96	0.70	0.56	0.47	0.41	0.31	0.25
10	3.99	2.81	2.25	2.11	1.68	1.24	1.02	0.74	0.60	0.51	0.44	0.35	0.28
15	4.14	2.90	2.32	2.18	1.73	1.27	1.05	0.76	0.62	0.53	0.46	0.37	0.29
20	4.24	2.96	2.36	2.23	1.77	1.29	1.07	0.77	0.63	0.54	0.48	0.39	0.30
25	4.31	3.01	2.39	2.26	1.79	1.31	1.08	0.78	0.64	0.56	0.48	0.40	0.31
50	4.52	3.13	2.48	2.36	1.87	1.35	1.12	0.81	0.67	0.58	0.51	0.44	0.33
100	4.71	3.25	2.56	2.45	1.93	1.39	1.16	0.84	0.69	0.61	0.53	0.48	0.34

Fuente: Tomado de (SNET, 2008).

Se parte del estudio de estas curvas (Anexo A) para determinar una intensidad promedio base anual. En la Tabla 2.1 se muestran los datos de lluvias registrados por la estación meteorológica El Boquerón y esta está hecha respecto a dos periodos de tiempo, que son de 1967 a 1993 y de 2004 a 2007. Esto se realizó así debido a que se depuró los datos considerando este último periodo (SNET, 2008).

2.2. Sistema de referencia de coordenadas SRC.

La elección de una proyección cartográfica debe cumplir con las necesidades y circunstancias a las que se estén aplicando, pues cada una se adapta de mejor forma a cada lugar del planeta. En El Salvador se utiliza el NAD-27 (North American Datum 1927) una proyección cónica conforme de Lambert y datum NAD-27, ya que representa de forma más precisa los objetos georreferenciados que se quieren colocar sobre un mapa.

2.3. Pozos de absorción.

Se debe esclarecer un poco la terminología relacionada con el tema y de aquí en adelante se tomarán en cuenta las siguientes definiciones.

- Un pozo de absorción es lo mismo que un pozo de infiltración siempre y cuando este último se quede en estratos de suelo no saturados, o sea, arriba del nivel freático.
- Un pozo de absorción no es lo mismo que un pozo de inyección. Este último alcanza estratos saturados de suelo a profundidades considerables, lo que le permite atravesar el nivel freático o algún acuífero. Es por eso que según (OPAMSS, 2018), en la normativa de Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), se le conoce como pozo profundo.

Cabe mencionar que en Oficina de planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS, 2018), se encuentra información bajo el nombre de pozos de infiltración.

2.3.1. Operación y mantenimiento.

La colmatación en un pozo de absorción según Fernández *et al.* (2017), es el sellamiento progresivo de los poros en su relleno por parte de las partículas sólidas finas arrastradas por la escorrentía superficial que se van acomodando y depositando mientras lo atraviesan, reduciendo sustancialmente su permeabilidad. Debido a esto es importante verificar el funcionamiento real del pozo y sus elementos considerados. Según Fernández y López (2017), esto puede lograrse vertiendo un volumen controlado de agua y verificando simultáneamente la capacidad de almacenamiento y vaciamiento entre dos marcas preestablecidas del tubo piezométrico.

Para el mantenimiento es importante considerar que se recomienda realizar al menos uno de tipo preventivo al inicio de la época de lluvias, haciendo una limpieza de los elementos o superficie por donde pasará la escorrentía que le llegue al pozo. Pero también es importante tener en cuenta que la frecuencia del mantenimiento dependerá de la calidad de las aguas lluvias recogidas.

Otro aspecto importante es que si se llega a considerar necesaria una cámara de sedimentación, se recomienda limpiarla cuando por inspección visual se verifique que su volumen ha sido ocupado en un 25% por sedimentos (OPAMSS, 2018).

2.4. Procesos de erosión y sedimentación.

La erosión del suelo que provoca la escorrentía durante las tormentas se conoce como hídrica y ocurre cuando de este se desprenden partículas minerales y orgánicas que luego son arrastradas por el agua

lluvia, siendo más evidente este fenómeno en superficies con pendientes considerables y con poca o nula vegetación, ya que estas condiciones le permiten a la escorrentía viajar libremente y a mayor velocidad, logrando desprender así una mayor cantidad de partículas.

La erosión y la escorrentía superficial dan paso a la sedimentación, que es el proceso donde todas estas partículas que viajan suspendidas en flujos de agua se depositan en el fondo de algún punto del trayecto, especialmente en depresiones de superficies o en lechos, debido a que son más densas y por acción de la gravedad se separan. (UGR, 2020).

2.4.1. Determinación de la carga de sedimentos a través del Método RUSLE.

El método RUSLE según Beltrán (2017) sirve para determinar el volumen potencial de sedimentos a largo plazo que una cuenca aporta por la erosión hídrica, significa Revised Universal Soil Loss Equation (Ecuación universal revisada de pérdida de suelo), y para su desarrollo se basa en parcelas de longitud base con las que se generan una serie de fórmulas que establecen los volúmenes de suelo que se erosionan por medio de la escorrentía superficial, aplicable sobre todo para terrenos de cultivo con pendientes y praderas bajo gestión de suelo específico, aunque también este método empírico es capaz de estimar la eficiencia del manejo de suelos y sus medidas de conservación, ya sean en terrenos agrícolas, o donde su tipo de uso implicó la modificación original de este.

La ecuación RUSLE, que se deriva de la conocida como USLE (Universal Soil Loss Equation) o ecuación universal de pérdida de suelos, determina la tasa de pérdida de suelo por erosión hídrica A y se define mediante la ecuación 2.2.

$$A = R * K * LS * C * P \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde:

A : Pérdida del suelo en Ton/ha/año.

R : Factor de erosividad de la lluvia en [(MJ.mm)/(ha.h.año)].

K : Factor de erosionabilidad del suelo en [(Mg.ha.h)/(ha.MJ.mm)].

L : Factor longitud del terreno (adimensional).

S : Factor pendiente del terreno (adimensional).

C : Factor cobertura y manejo de la vegetación (adimensional).

P : Factor de prácticas de conservación (adimensional).

Como se observa la ecuación RUSLE depende de dos factores que se determinan a través de otros parámetros por medio de ecuaciones, más cuatro factores que son adimensionales y para los que hay tablas de valores según condiciones respectivas. A continuación, se define cada uno de estos de manera que el cálculo se pueda realizar de manera manual.

- Determinación del factor R.

El factor de erosión de lluvia se determina a través de la ecuación 2.3 que es aplicable para la región mesoamericana de acuerdo a Beltrán (2017).

$$R = 3786.6 + 1.5679P - 1.9809E \quad (\text{Ec. 2.3})$$

P: precipitación anual promedio (mm/año).

E: elevación en metros.

En Beltrán (2017) se hace énfasis que la ecuación 2.3 se obtuvo a través de correlaciones del factor R en función de elevación y precipitaciones calibradas para Costa Rica, y ha sido aplicada en otros estudios para El Salvador, validándose para la región del arrecife mesoamericano por la Universidad A & M de Texas, información obtenida y aplicada en Escalante (2010).

- Determinación del factor K.

El factor de erosionabilidad del suelo estima la susceptibilidad de este a sufrir pérdidas por erosión en función de factores como su textura, estructura y pedregosidad superficial. Como en el país no se cuenta con un registro detallado de estos valores para las características edáficas mencionadas anteriormente, hay hasta tres investigaciones al respecto donde se proponen valores concretos, y una de estas es la investigación de Escalante (2010), ver Tabla 2.2, que muestra los rangos de valores por tipo de suelo presente en El Salvador.

Tabla 2.2. Valores de erosionabilidad de suelo según su tipo.

Tipo de suelos factor K	
Aluviales	0.055-0.036
Latisoles	0.02
Andisoles	0.06

Tipo de suelos factor K	
Grumosoles	0.02-0.07
Regosoles	0.043-0.023

Fuente: Tomado de (Escalante, 2010).

Existe otra propuesta de valores de erosionabilidad para más tipos de suelo, pero esta incluye una división según el contenido de materia orgánica. En Beltrán (2017) proponen los valores de erosionabilidad K (Tabla 2.3).

Tabla 2.3. Valores de K según tipo de suelo y contenido de materia orgánica.

Clase de textura	Contenido de materia orgánica		
	0.5%	2%	4%
Arena	0.05	0.03	0.02
Arena fina	0.16	0.14	0.10
Arena muy fina	0.42	0.36	0.28
Arena franca	0.12	0.10	0.08
Arena fina franca	0.24	0.2	0.16
Arena muy fina franca	0.44	0.38	0.30
Franco arenoso	0.27	0.24	0.19
Franco arenoso fino	0.35	0.30	0.24
Franco arenoso muy fino	0.47	0.41	0.33
Franco	0.38	0.34	0.29
Franco limoso	0.48	0.42	0.33
Limo	0.60	0.52	0.42
Franco arcillo arenoso	0.27	0.25	0.21
Franco arcilloso	0.28	0.25	0.21
Franco arcilloso limoso	0.37	0.32	0.26
Arcilla arenosa	0.14	0.13	0.12
Arcilla limosa	0.25	0.23	0.19
Arcilla		0.13-0.29	

Fuente: Tomado de (Beltrán, 2017).

- Determinación de los factores topográficos L y S (Longitud y pendiente del terreno).

Ambos parámetros adimensionales son los que exponen el relieve de la cuenca a estudiar y permiten considerar la forma en que circula el agua, a qué velocidad lo hace y en función de ello se evalúa su capacidad de disgregar el suelo y el transporte de sedimentos.

El factor L es la distancia desde donde se origina la escorrentía superficial hasta el punto donde esta se concentra o pasa a formar parte de un curso de agua, asumiendo siempre que en el trayecto el agua lluvia pasa sobre laderas y hubo erosión hídrica en el proceso (Beltrán, 2017).

El factor de pendiente S representa la variación de energía potencial por unidad de longitud, es decir, a mayor pendiente mayor velocidad de escorrentía, y esto provoca mayor capacidad erosiva y de transporte de sedimentos.

Físicamente el factor LS es la medida de la capacidad que tiene la escorrentía superficial de transportar sedimentos, y la base para definir las ecuaciones que el método RUSLE propone, es que este representa la tasa de pérdida de suelo para una longitud e inclinación de una pendiente dada versus la tasa de pérdida de suelo que corresponde a una parcela de 22.13 m de longitud, y pendiente del 9%, asumiendo condiciones climáticas y de uso de suelo constante.

Entonces, para pendientes de terreno menores o mayores a 9%, el método RUSLE propone las ecuaciones 2.4 y 2.5.

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m (10.8 \sin\alpha + 0.03) \quad \text{Si } \tan\alpha < 0.09 \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m (16.8 \sin\alpha - 0.5) \quad \text{Si } \tan\alpha \geq 0.09 \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde λ es longitud de tramo horizontal en metros, y α el ángulo de la pendiente en radianes.

El exponente m es una variable calculada a partir de la relación de la erosión en surcos, y según se explica en Mancilla (2008), depende de la pendiente del terreno como se presenta en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Valores de exponente m.

Valor de pendiente	Valor de m
Pendiente menor a 1%	0.2
Pendiente entre 1% y 3%	0.3
Pendiente entre 3.5% y 4.5%	0.4
Pendiente mayor a 5%	0.5

Fuente: Tomado de (Mancilla, 2008).

- Determinación de factor C.

El factor de cobertura y manejo de la vegetación de una cuenca es el parámetro más variable de la ecuación RUSLE, ya que por lo general los suelos están en constante cambio en torno a este parámetro. Es la relación entre la pérdida de suelo de una superficie sin cobertura natural, $C=1$, versus la pérdida de suelo que posea su cobertura natural, $C=0$. Mancilla (2008) agrega que en cada factor C (Tabla 2.5) están considerados los efectos del porcentaje de cubrimiento de la vegetación, el efecto protector de los residuos vegetales como la hojarasca y la acción de agregación de las raíces en el suelo.

Tabla 2.5. Valores de cobertura y manejo de vegetación.

Uso de suelo	Valor de C
Agricultura	0.630
Agricultura abierta	0.630
Agricultura con vegetación	0.630
Agricultura con fondo expuesto	0.630
Acuacultura/arroz	0.000
Roca desnuda	0.000
Terreno desnudo	0.090
Terreno desnudo/ Barra de arena	0.000
Fondo expuesto/agua	0.000
Orilla del campo	0.090
Bosque escaso	0.090
Bosque	0.003

Uso de suelo	Valor de <i>C</i>
Bosque/cafetal	0.003
Bosque/carretera	0.003
Lava	0.000
Lava/agua	0.000
Manglares	0.000
Carretera/abierta/urbana	0.090
Carretera/bosque	0.003
Ladera orientada al oeste	0.003
Jacinto de agua	0.000
Agua/lava	0.000
Salineras	0.000

Fuente: Tomado de (Beltrán, 2017).

- Determinación del factor *P*.

El factor de prácticas de conservación *P*, describe el efecto de las prácticas conservacionistas de los suelos en las que se pudieran modificar la topografía de este, como son los cultivos en franjas y curvas de nivel, y las terrazas. Para el caso de investigación hecho en Beltrán (2017) se aclara que no se contó con información detallada al respecto, por lo que se optó por la alternativa de considerar como variable principal la pendiente del terreno, y en ese caso sería la más desfavorable para asignar un factor *P* como los que exponen en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Valores de prácticas de conservación.

Pendiente (%)	Valor de <i>P</i>
1-3	0.4
3-8	0.5
8-12	0.6
12-16	0.7
16-20	0.8
>20	0.9

Fuente: Tomado de (Beltrán, 2017).

Con todos estos parámetros ya definidos, se puede obtener la pérdida del suelo A , o también conocido como el volumen potencial total de sedimentos que la cuenca de análisis aporta. Las unidades de A reflejan el peso en toneladas que una hectárea de la cuenca pierde por erosión hídrica al año. A partir de esto se puede obtener otros parámetros como el volumen de arrastre de sedimentos en metro cúbico por año.

2.4.2. Sedimentos y propuestas de cómo manejarlos.

Se cuenta con distintas soluciones para el control de los sedimentos y entre ellas están las barreras de sedimentos de tela o geotextil, que impiden su paso de un punto a otro en superficies ya que actúan como elementos filtrantes (Figura 2.3). Su diseño y puesta en funcionamiento dependerá sobre todo de las condiciones del entorno y de los parámetros fundamentales que se pueden cuantificar, como son:

- Caudal de escorrentía que se maneja en la zona: porque de la magnitud de este se establecerá si la obra necesita un reforzamiento para evitar su colapso.
- Pendientes del terreno: para determinar según el entorno, la cantidad de barreras que se necesitan y la ubicación idónea para cada una.



Figura 2.3. Ejemplo de barrera de sedimentos de geotextil. Tomado de (CDOT, 2019).

Para que esta solución funcione en condiciones óptimas se debe de realizar una distribución de la separación entre postes según la longitud total que tendrá y del caudal que manejará. También es necesario implementar en su entorno obras complementarias que sirven como mitigadores de erosión hídrica de la superficie, como la siembra de vegetación temporal y permanente en las áreas más afectadas por la erosión.

Para su mantenimiento es necesario inspeccionarla periódicamente en busca de posibles daños, en los que también es recomendable retirar los sedimentos acumulados al pie de esta.

Este elemento que se explicó anteriormente entra en la categoría de barreras muertas, que también pueden ser hechas de piedras (Figura 2.4) ramas, postes o bultos de tierra. Mientras que las barreras vivas son las compuestas por vegetación, como la que aparece en la Figura 2.5, pero ambos tipos sirven para control de escorrentía y retención de sedimentos, como exponen en Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2007).



Figura 2.4. Barrera muerta de piedra. Tomado de (CONAFOR, 2007).



Figura 2.5. Ejemplo de barreras vivas en una ladera. Tomado de (CONAFOR, 2007).

Debido a esto, y como van perpendiculares a la trayectoria de la escorrentía superficial, se recomienda estimar el caudal que se manejará en la zona y así establecer las dimensiones idóneas de las barreras muertas que permitan cumplir ambos objetivos sin colapsar, aunque en la mayoría de casos este parámetro es necesario cuando se va a intervenir grandes longitudes de terreno, o donde las pendientes son fuertes o muy pronunciadas, como se detalla en la Tabla 2.7.

Otros elementos para control de sedimentos y escorrentía son las acequias a nivel o desnivel, que son zanjadas cavadas de forma perpendicular a la ladera y compuestas de barreras de suelo a cada cierta distancia, con el fin de crear celdas dentro de la canaleta para almacenamiento de agua en cada una para infiltrarla en el suelo, además de retener los sedimentos que la escorrentía arrastró y depositó en cada uno (Figura 2.6). Este elemento es el más idóneo para controlar los caudales de agua lluvia excesivos durante las tormentas intensas de corta duración en laderas con pendientes fuertes, porque atrapan volúmenes considerables de agua en el proceso, y el excedente ya no tiene el mismo nivel de erosividad en tierras abajo ni el mismo poder de destrucción de la vegetación y cultivos presentes ahí.



Figura 2.6. Ejemplo de una acequia a nivel. Tomado de (CONAFOR, 2007).

La cama disipadora de energía hidráulica es un tipo de elemento importante para el control de velocidad del agua lluvia que ayuda a reducir la erosión en los suelos (Villamarín, 2013). Se conforma de hileras o gaviones de piedra que se colocan de forma perpendicular al desplazamiento de la escorrentía, y por la dificultad que el agua encuentra al atravesarlo, parte de los sedimentos que acarrea se quedan atrapados en su interior, por lo que también es un elemento auxiliar de retención de sedimentos (Figura 2.7).



Figura 2.7. Cama disipadora de energía de piedra. Tomado de (Villamarín, 2013).

De manera general distintas fuentes ya han analizado y calculado las separaciones entre las obras de conservación de suelos según la pendiente del terreno y la velocidad de la escorrentía. En estas se proponen distancias con el objetivo de controlar el flujo de agua lluvia para que así erosione en menor medida el suelo, se protejan más los cultivos presentes, y también para que el agua choque contra las barreras de forma ordenada y segura para evitar su destrucción o colapso. En el documento Sistema de Integración Centroamericano de Tecnología Agrícola (SICTA, s.f.) se presentan unas distancias según la pendiente del terreno para cada una de las cuatro obras de control que proponen, como se muestra en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Distancias entre obras de control de sedimentos.

Obras de conservación de suelo según la pendiente	Pendiente suave hasta 15% (8.6°)	Pendiente moderada 15% -30% (8.6°-17.1°)	Pendiente fuerte 30% -50% (17.1°-28.6°)
Barreras vivas	15-30 metros	10-15 metros	4-10 metros
Barreras muertas	10-20 metros	6-10 metros	4-6 metros
Acequias	10-20 metros	8-10 metros	6-8 metros
Diques de 1 metro	4-12 metros	2-4 metros	1.3-2 metros

Fuente: Tomado de (SICTA, s.f.).

En algunos casos particulares se puede necesitar la combinación de estas soluciones para mejorar la intervención planificada y lograr que funcionen como mecanismos de retención e infiltración de agua y elementos conservadores del suelo.

Debido a que la mayor dificultad de un pozo de absorción es garantizar, sin poder ver el interior de este, que la susceptibilidad a colmatación total sea baja, conviene entonces construirlo en áreas libres de erosión hídrica donde se pueda tener una mínima carga de sedimentos.

En caso de no poder garantizar un agua libre de materiales en suspensión, es necesario removerlos colocando una forma de cámara de sedimentación. Se puede considerar que el volumen de este elemento depende de dos factores: la composición granulométrica de los materiales en suspensión y la proporción que se necesite remover de ellos. No obstante, en el mismo documento se recomienda como primera aproximación adoptar el criterio (Ec. 2.6) de estimar el volumen del sedimentador como la mitad del volumen de almacenamiento neto del pozo, en otras palabras, la mitad del volumen de vacíos que aplica para suelos altamente permeables (Fernández y López, 2017).

$$V_{cámara} = 0.5 * V_{neto} \quad (Ec. 2.6)$$

CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO Y SUS POZOS DE ABSORCIÓN.

3.1. Ubicación de la Cooperativa El Espino.

La Cooperativa El Espino está ubicada en el departamento de La Libertad entre los municipios de Santa Tecla y de Antiguo Cuscatlán, con la mayor extensión territorial en este último, en la considerada falda sureste del volcán de San Salvador.

La cooperativa se divide en dos zonas: la zona permanente de cultivo de café bajo sombra, que es donde se encuentran todos los pozos de absorción hasta ahora construidos y el Ecoparque El Espino, que es un atractivo turístico (Figura 3.1).

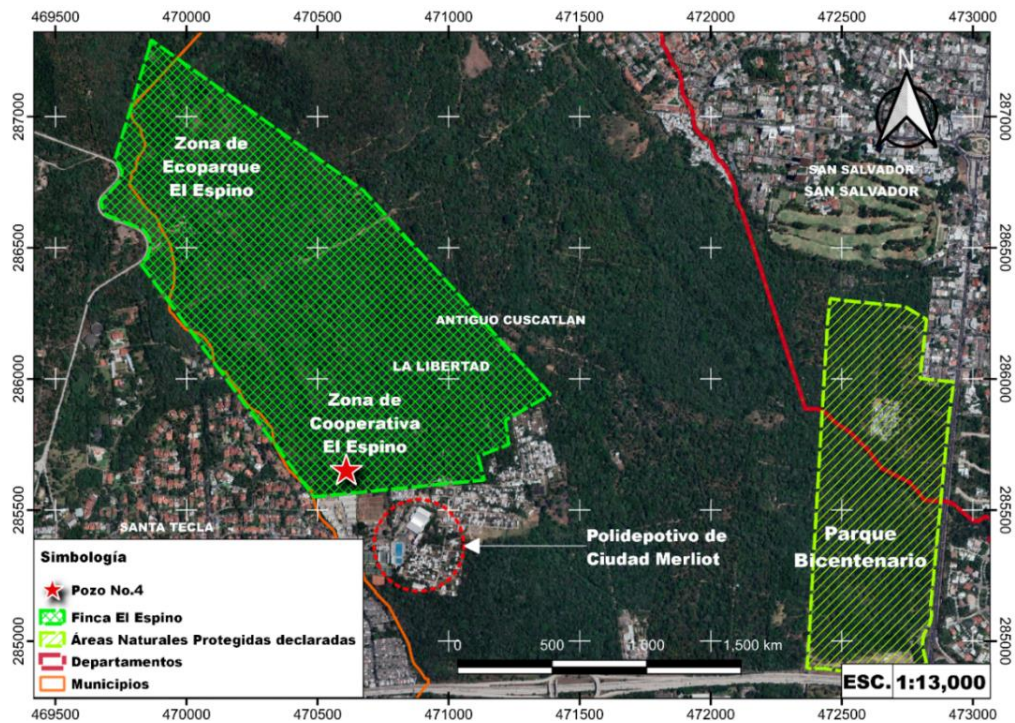


Figura 3.1. Zona Cooperativa El Espino. [Elaboración propia].

Su acceso principal es por la parte norte de las instalaciones del Polideportivo Ciudad Merliot, y tiene un área de terreno total de 650 manzanas, de las cuales 600 son de la zona boscosa y cafetalera, y 50 corresponden al ecoparque. Ambos terrenos pertenecen y son administrados desde 1980 por Cooperativa El Espino Sociedad Anónima. Su extensión y perímetro aproximados se muestran en la Figura 3.2, a través de una serie de puntos que delimitan toda la zona perteneciente a la cooperativa, obtenidos con la ayuda de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Los atributos de los puntos mostrados en el Anexo B se calcularon desde un modelo de elevación digital con una resolución de 30 m, proporcionada por un sistema de información abierta llamado Earth DATA, perteneciente a la National Aeronautics Space Agency (NASA).

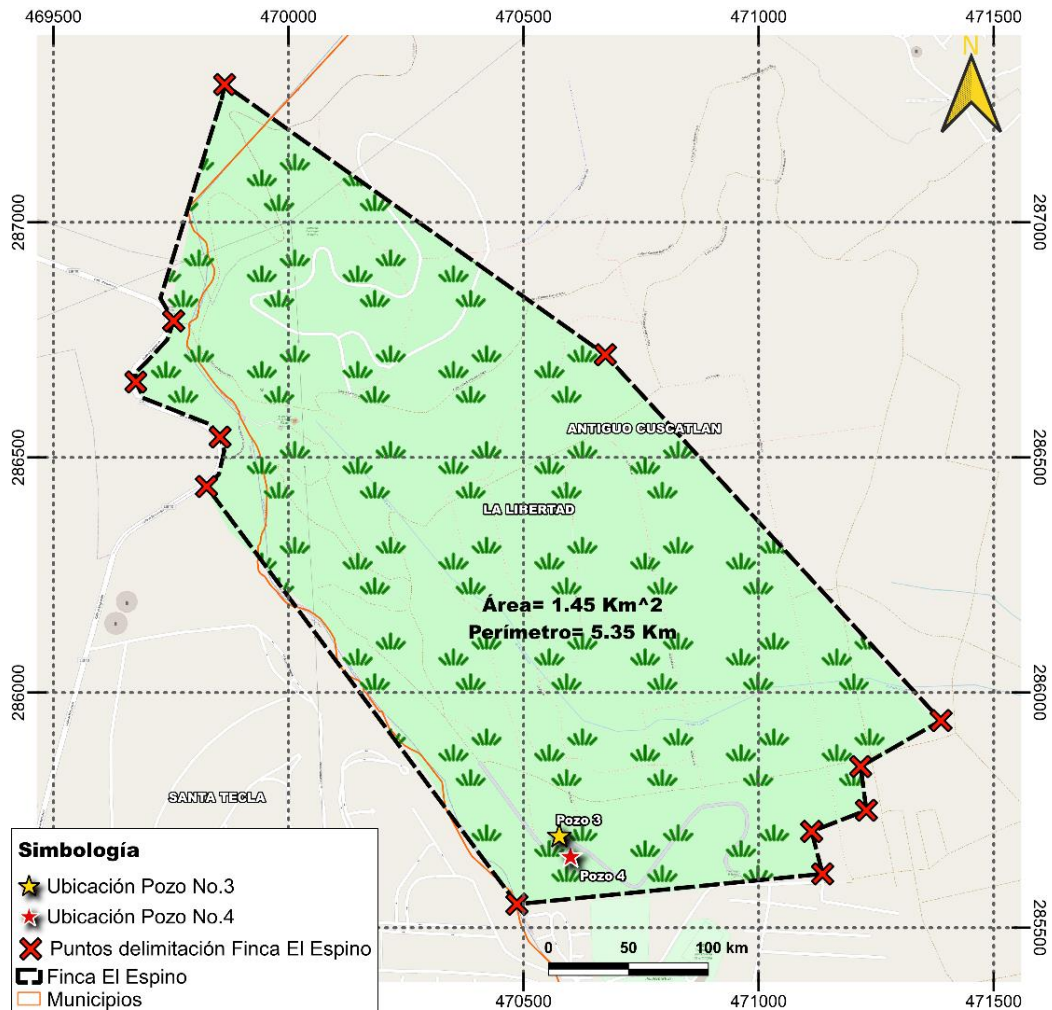


Figura 3.2. Linderos de Cooperativa El Espino. [Elaboración propia].

Según exponen en Salvanatura (2011), los tipos de ecosistemas presentes corresponden mayormente a zonas de sistema agropecuario y de cultivo permanente de café bajo sombra (73.11%), además de áreas urbanas y de bosque tropical deciduo latifoliado (26.89%) como se muestra en la Figura 3.3. Además, el tipo de suelo predominante es de tipo franco arenoso, como lo establece el mapa de texturas de tipos de suelo que publica el Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria CENTA mostrado en Anexo C.

En cuanto a la flora y fauna presente, hay 313 especies de árboles, de las cuales 291 especies son nativas y 22 son exóticas; mientras que el registro que se tiene de fauna, hay 18 especies de anfibios, 49 especies de reptiles, 198 de aves y 41 de mamíferos.

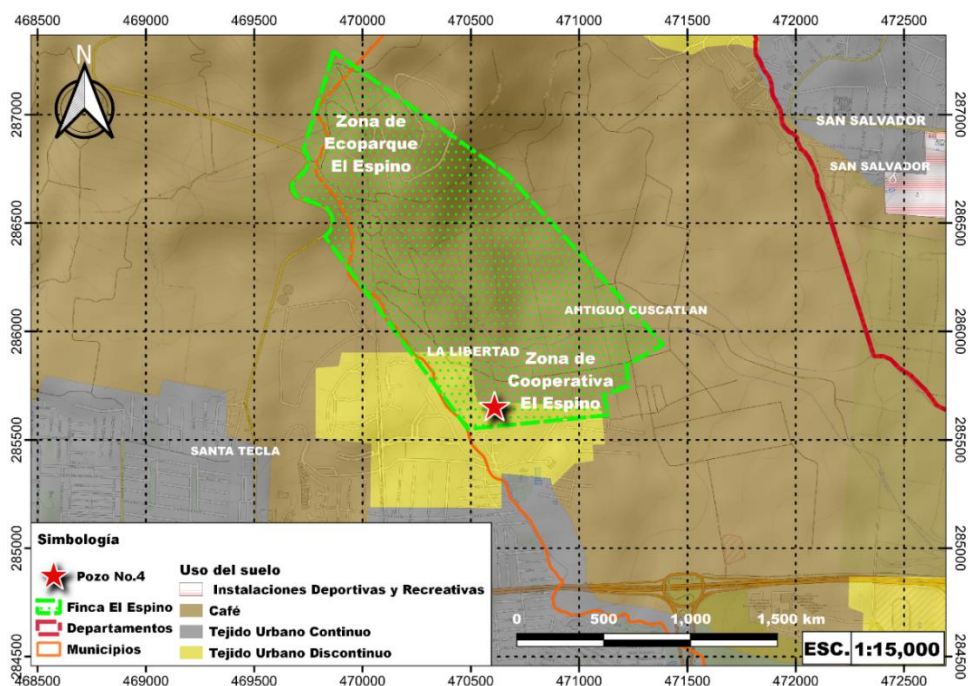


Figura 3.3. Detalle de los usos de suelos predominantes en la finca El Espino. [Elaboración propia].

Se observó que la mayor fuente de sedimentos es la calle de tipo rural que tiene irregularidades y baches considerables (Figura 3.4).

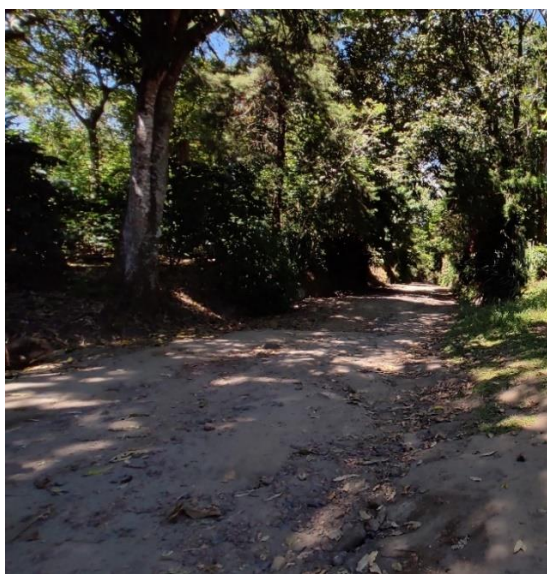


Figura 3.4. Calle rural de la Cooperativa El Espino.

3.2. Climatología de la Cooperativa El Espino.

Los diversos parámetros que definen a las condiciones climatológicas predominantes en la zona del ecoparque y que se describirán a continuación, se basan en los datos registrados en el año 2011 que fueron expuestos en dos investigaciones realizadas sobre la zona, que son Salvanatura (2011) y en Salvanatura (2012).

Para definir el tipo de clima, se basó en la clasificación climática de Koppen, de acuerdo a Salvanatura (2011) la climatología se define como: Sabana tropical caliente (Aw). Explicando la simbología anterior, la letra A se refiere a que la zona pertenece al Grupo A de climas tropicales, porque es una zona que es cálida todo el año y posee estación seca; luego la subdivisión w hace referencia a un entorno tipo sabana, y para esto se basa en el régimen de las precipitaciones que imperan en la región, en la que por lo menos debe haber un mes con precipitaciones menores a los 60 mm, y para este caso existen cuatro meses con 0 (cero) mm de lluvia registrados.

De acuerdo al mapa Visualizador de Información Geográfica de Evaluación Ambiental VIGEA (s.f.), y se detalla dicha información en la Figura 3.5.

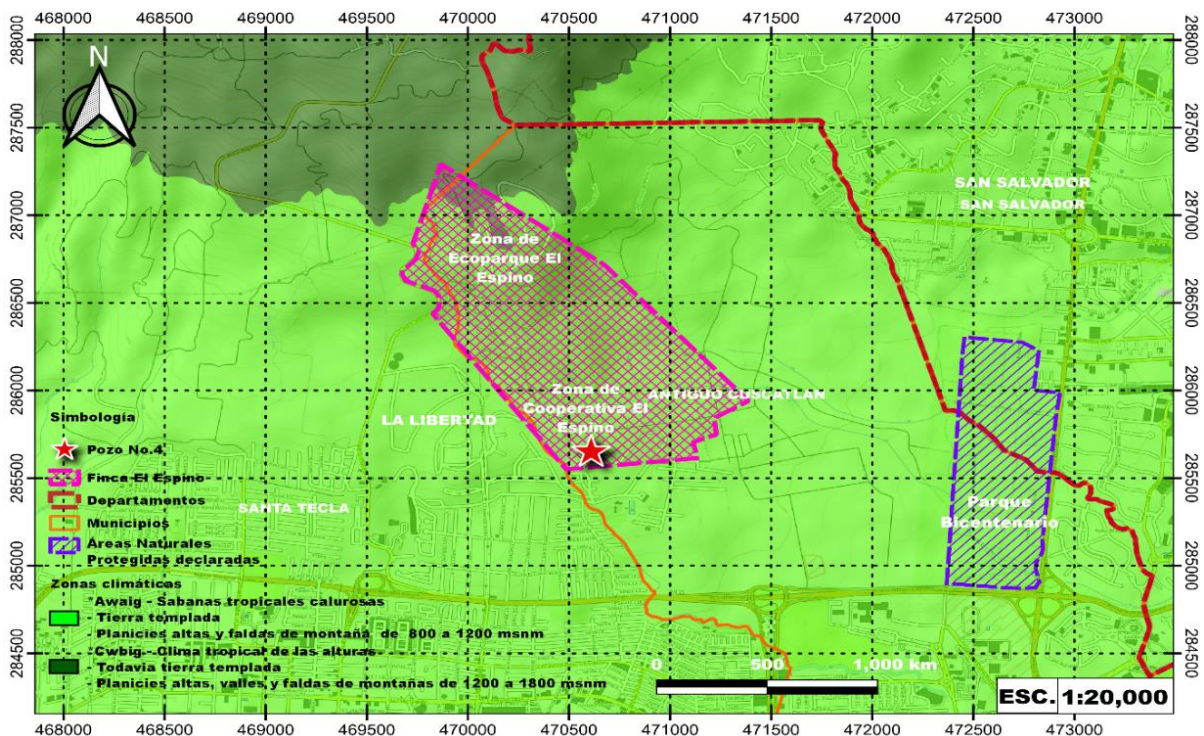


Figura 3.5. Zonas climáticas predominantes en Cooperativa El Espino y alrededores. [Elaboración propia].

Según los datos recabados por la estación meteorológica de El Boquerón, que es la estación más representativa para el área natural protegida El Espino, la precipitación anual de lluvia para el año 2011 fue de 361 mm, el promedio mensual varió en el rango de 3 a 352 mm, y los meses con los mayores valores fueron desde junio hasta septiembre. Los meses secos, es decir de los que no se tuvo registro de precipitaciones en el año 2011 fueron: enero, febrero, marzo, y diciembre.

Los rangos que de temperaturas que se registraron entre enero y mayo fueron de entre 19.5°C a 21.7°C, y para la época de invierno estos descienden desde junio a diciembre entre 21.5°C a 19.5°C. Estas temperaturas son características para la zona, que se encuentra en elevaciones desde 855 metros sobre el nivel del mar, hasta elevaciones de 1650 msnm en las partes más altas de las áreas de El Espino y bosque Los Pericos, variando notablemente a las temperaturas registradas para el resto del AMSS, es decir, las partes bajas. La humedad relativa promedio anual fue de 78.92%, y su variación en los meses de febrero a septiembre fue entre 71% y 86%.

Para la estación meteorológica de Ilopango, como exponen en SNET (2020) la velocidad promedio anual del viento para el departamento de San Salvador fue de 8 kilómetros por hora, y el rumbo fue predominante del Norte tanto para la estación seca como la lluviosa, y las brisas marinas del Sur y Sureste ocurrieron después del mediodía. De acuerdo a Salvanatura (2011) los rangos en que varía la velocidad del viento dentro de la escala de Beaufort van desde 1.40 registrado en el mes de junio hasta los 2.20 registrados en noviembre.

El nivel de nubosidad o de radiación solar emitida sobre la zona, presentó un promedio anual de 5.63 décimos de la bóveda celeste, con variaciones respecto a los meses entre 3.6 y 8.10 décimos de la bóveda celeste, entre enero y septiembre.

3.3. Geología de la Cooperativa El Espino.

La zona de estudio está ubicada en un espacio identificado como perteneciente al miembro s4, en este apartado solo se brindará una síntesis breve para la formación correspondiente, o sea la San Salvador. En la Figura 3.6 se muestra la geología de la parte sureste del volcán.

De acuerdo a UGR (2020), una formación es una unidad litoestratigráfica fundamental establecida en la guía estratigráfica internacional y la de San Salvador está compuesta por cenizas volcánicas o tierra blanca que, debido a su granulometría, se considera fue arrojada a la superficie por una serie de

violentas erupciones de la caldera de Ilopango hace alrededor de 2000 años. Es de gran importancia tener en cuenta que los materiales de esta formación, debido a que es la más reciente geológicamente, son sedimentos inestables de escasa consolidación, en los que al definir el espesor de sus estratos se observa una disminución a medida que crece la distancia con el centro de efusión.

En Salvanatura (2012) se menciona que los tipos de rocas que pueden encontrarse en esta formación son: efusivas básicas, andesitas y basaltos, que los estratos de pómez también pertenecen a esta y que el basamento de las cercanías del Volcán de San Salvador está compuesto por rocas efusivas que forman varias corrientes de lavas andesíticas y basálticas de grano fino a medio.

Se debe recordar que la formación cuenta con varios miembros como: s1, s2, s3a, s4, s5c, etc., y notar que todos ellos se identifican con la letra “s” por la inicial del nombre de la formación San Salvador. El miembro s4 es el más importante para la zona del estudio en cuestión, y en síntesis, está formado por lo que se conoce como tierra blanca. Los espesores de este varían entre 3 y 4 m en la ciudad de San Salvador hasta los 50 m encontrados cerca del Lago de Ilopango (Salvanatura, 2012).

Cabe recalcar que los materiales que geológicamente se engloban como tierra blanca, ingenierilmente en geotecnia, son clasificados como arenas limosas o limo arenosos no plásticos.

También que de acuerdo a Hernández (2019), durante el sondeo que se realizó en el parque bicentenario se encontró agua subterránea hasta una profundidad de 123 m.

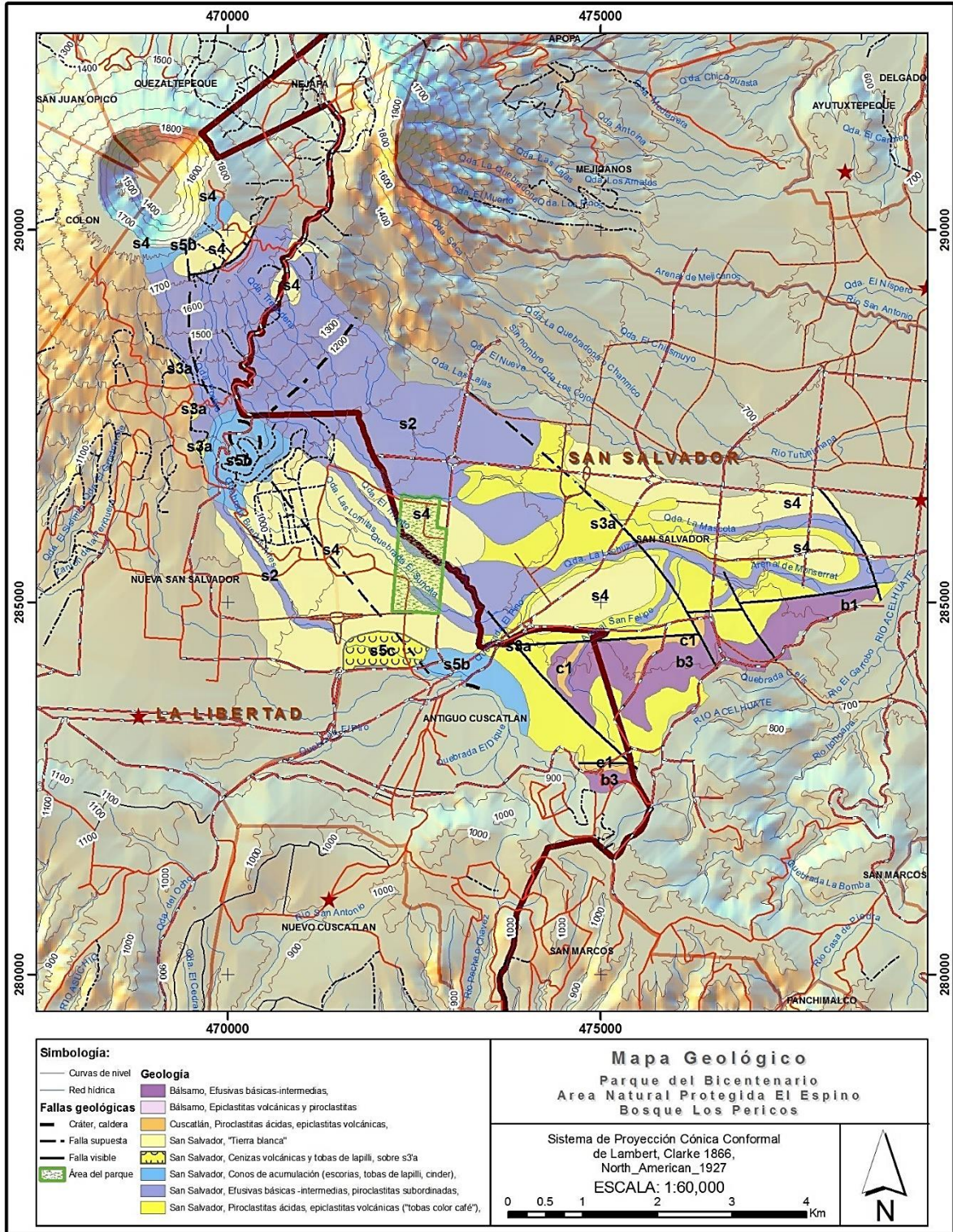


Figura 3.6. Geología de los alrededores de la zona de estudio. Tomado de (Salvanatura, 2012).

3.4. Ubicación y descripción del pozo.

Los pozos de absorción que hasta ahora se han construido se componen de dos canaletas con sección transversal rectangular que trasladan el agua lluvia que recogen desde su zona respectiva dentro de su mini cuenca hasta las tuberías de entrada de PVC de 4 pulgadas de diámetro, que poseen mallas metálicas para impedir el paso de basura, piedras, hojas y ramas al interior del pozo.

Cabe aclarar que la numeración que se utilizará de aquí en adelante en la investigación para hacer referencia a los dos pozos que se mencionan en ella, pozo 3 y pozo 4, no necesariamente corresponde a la numeración con la que son conocidos por el personal de la cooperativa. Se ubican uno frente a otro, separados por aproximadamente 50 m y la pendiente del terreno desciende en dirección al pozo 4.

El pozo que fue estudiado y que sirvió de referencia para el diseño de los mecanismos de control de sedimentos se ha nombrado pozo 4, y su ubicación dentro de la zona cafetalera de la Cooperativa El Espino es la que se observa en la Figura 3.7.

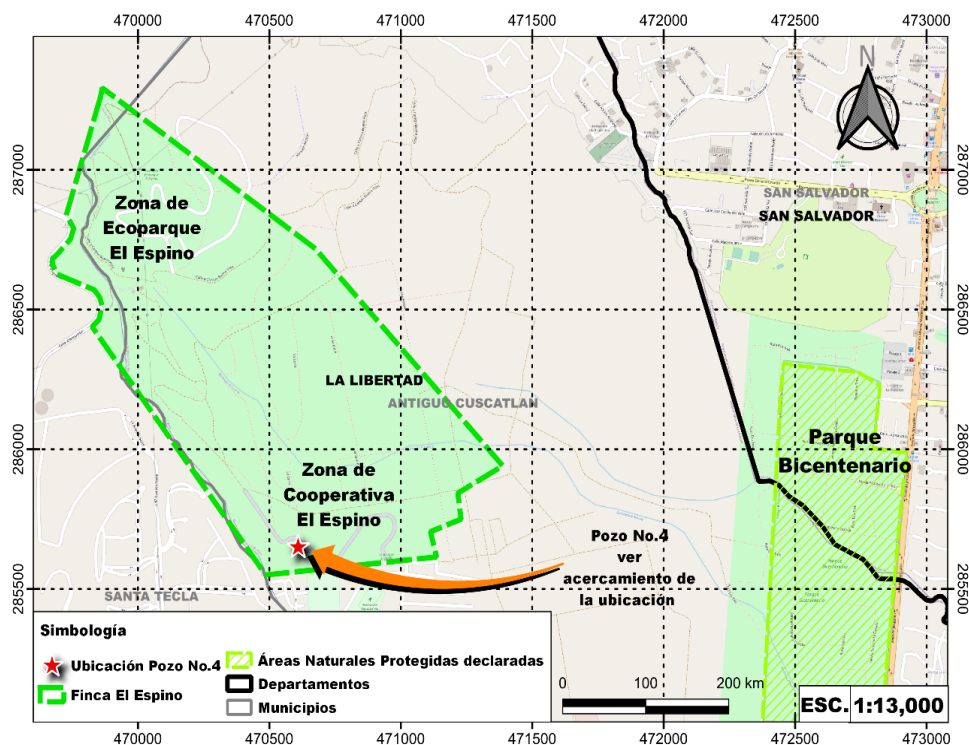


Figura 3.7. Detalle de la zona correspondiente a la Cooperativa El Espino, con la ubicación del pozo de estudio. [Elaboración propia].

Se escogió por ser uno de los más accesibles en el terreno, ya que se encuentra cercano al acceso de la cooperativa y al único camino al interior de la finca como se muestra en la Figura 3.8.

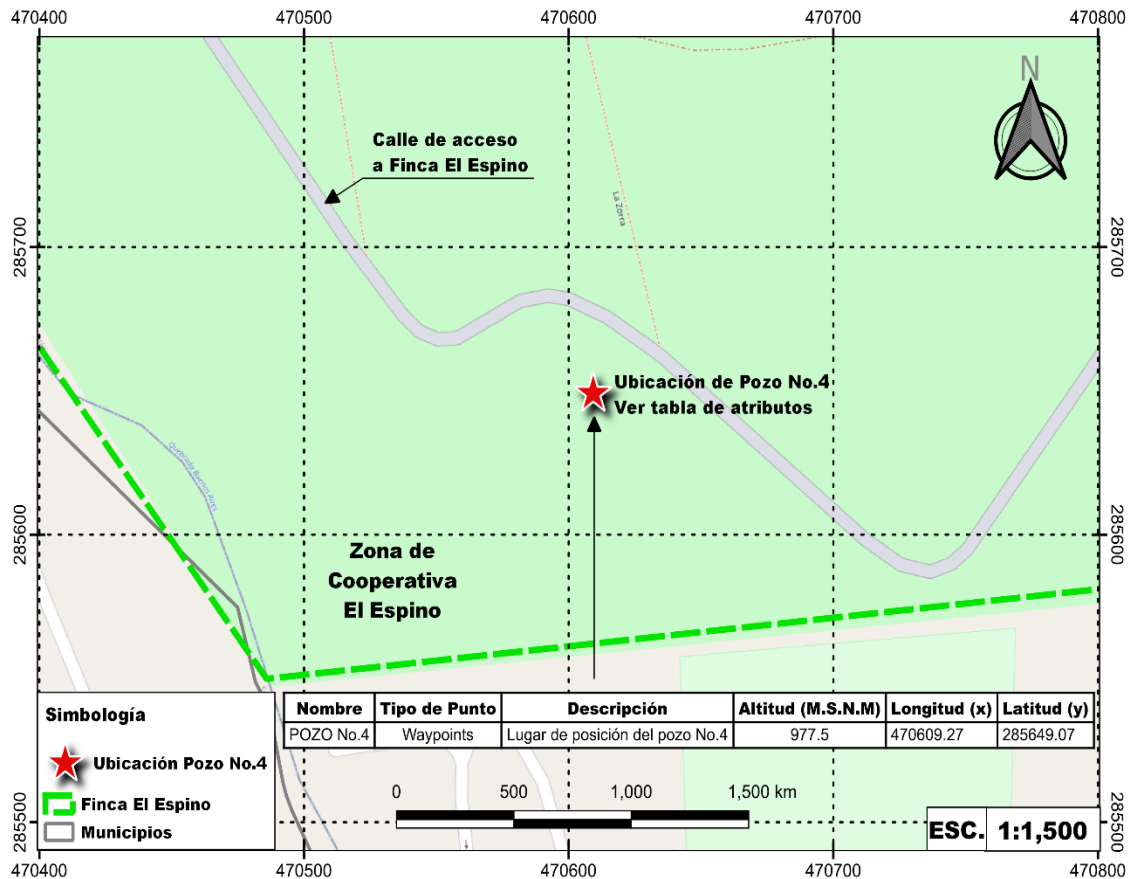


Figura 3.8. Ubicación de pozo 4, con su altitud y coordenadas geográficas. [Elaboración propia].

También es uno de los más afectados por la gran cantidad de sedimentos que la escorrentía superficial le hace llegar durante las tormentas, al punto que la parte superior de estos y sus canaletas quedan cubiertos de sedimentos, como se muestra desde la Figura 3.9 hasta la Figura 3.12.

El pozo 4 posee un diámetro interior de 2.04 m y una profundidad de 2.70 m desde el fondo hasta la superficie del pozo sin considerar broquel, con tubo de inspección de PVC de 4 pulgadas de diámetro, y diferentes capas de arena y grava #2 como relleno, como se detalla en la Figura 3.13 y Figura 3.15.



Figura 3.9. Acumulación de lodo sobre la superficie del pozo 4 después de una tormenta.



Figura 3.10. Una de las canaletas del pozo 4 cubierta de sedimentos.



Figura 3.11. Uno de los pozos de absorción cubierto por sedimentos.



Figura 3.12. Otro ejemplo de pozo de absorción cubierto por sedimentos.

El broquel de cada pozo fue construido con ladrillo de obra puesto en trinchera y a una profundidad de 0.55 m en su parte externa para delimitación, y poseen un geotextil que separa las paredes de tierra del pozo con el relleno colocado al interior, conforme a lo presentado en la Figura 3.14.

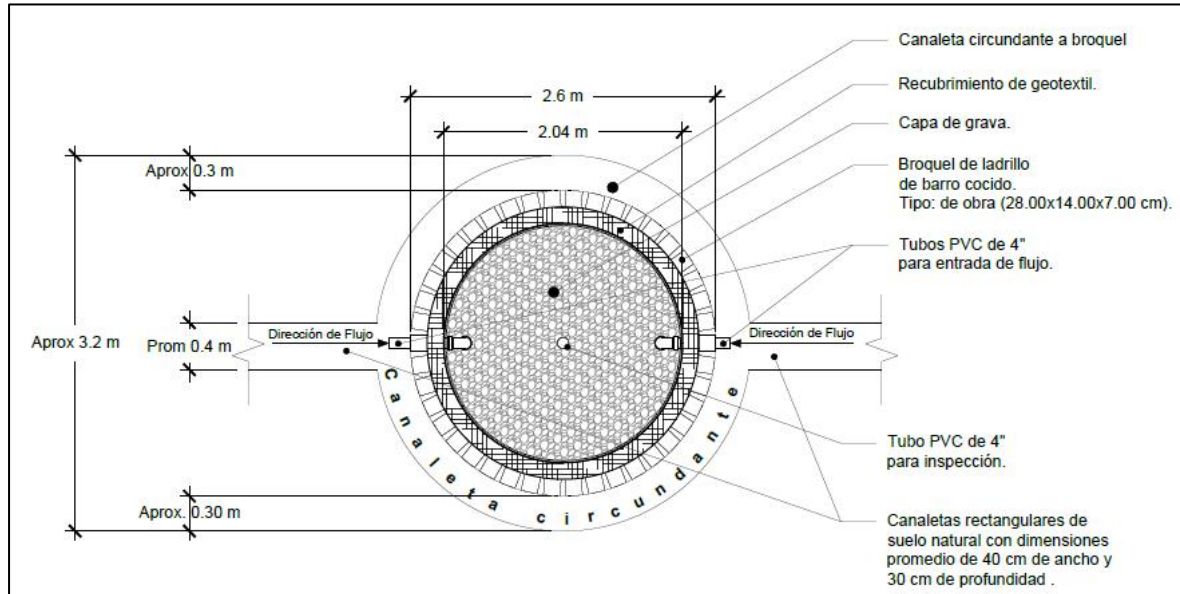


Figura 3.13. Vista en planta de pozo 4. [Elaboración propia].

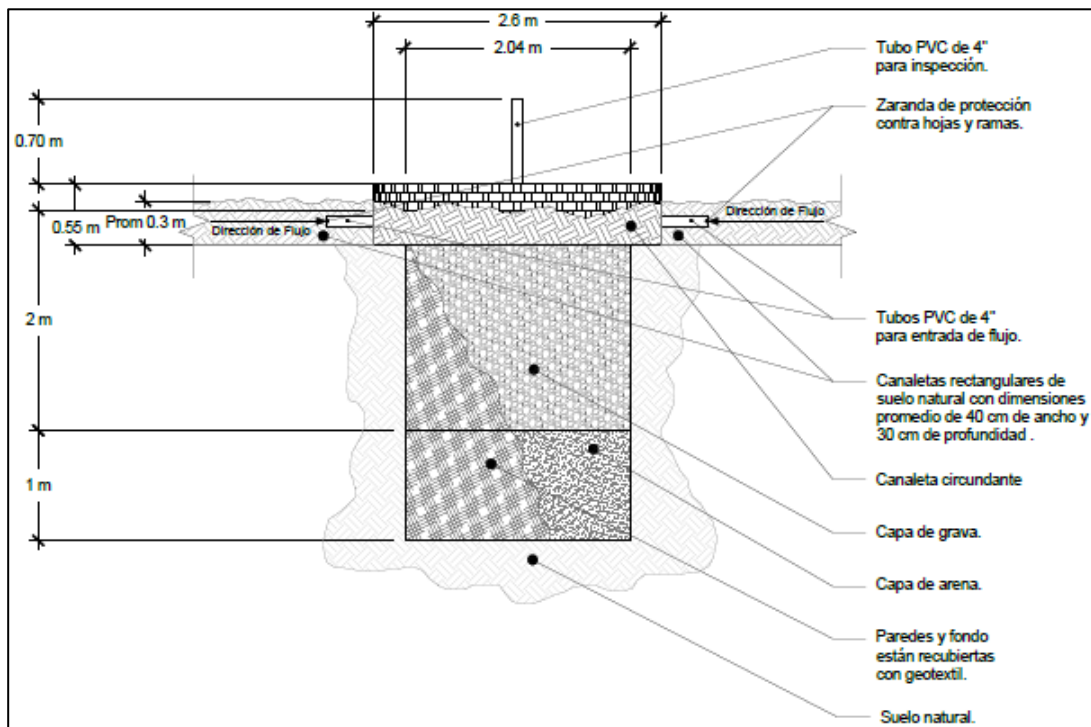


Figura 3.14. Vista frontal de pozo 4. [Elaboración propia].

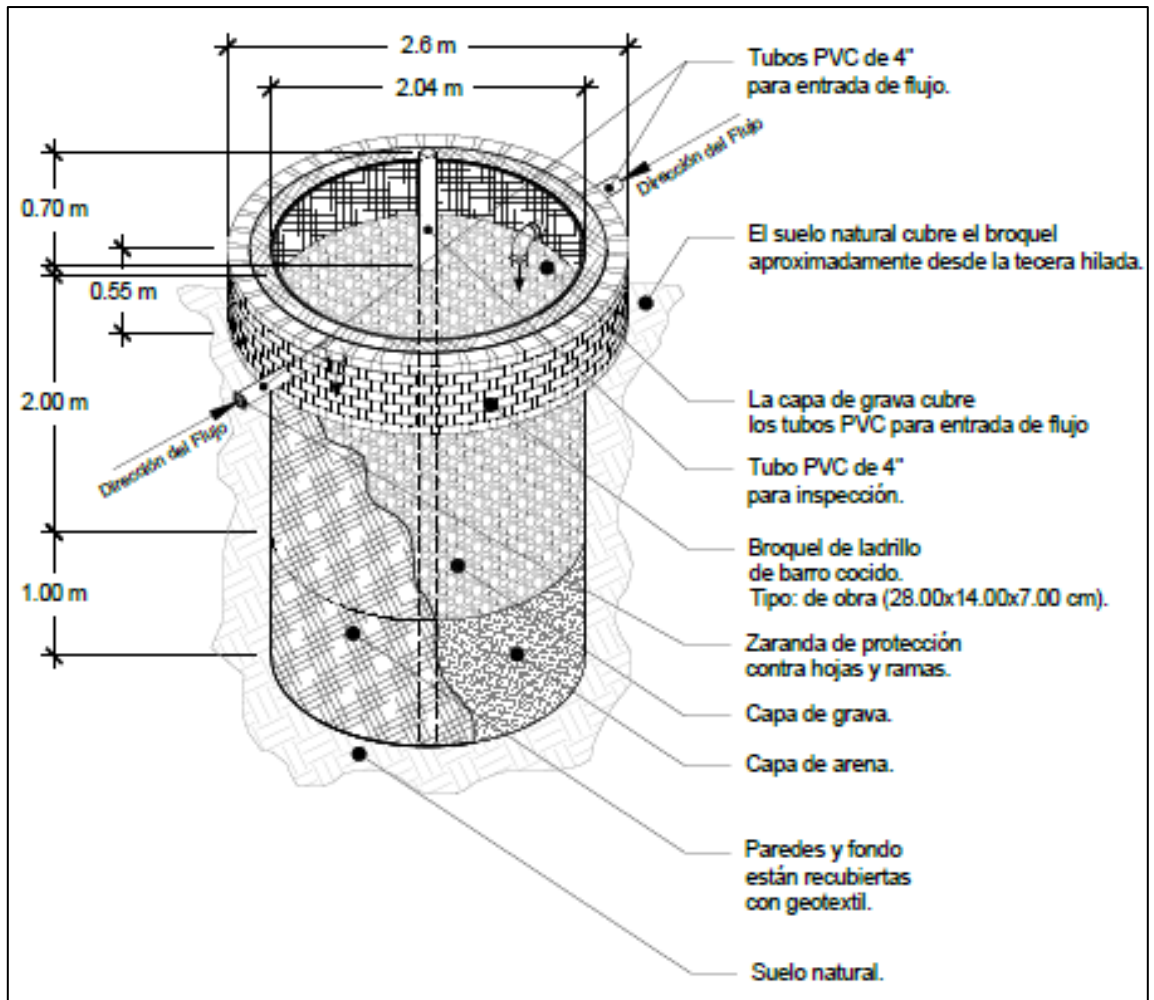


Figura 3.15. Vista isométrica de pozo 4. [Elaboración propia]

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE ALTERNATIVA.

El objetivo de la propuesta es evitar que la escorrentía con sedimentos llegue al área verde del pozo para que esta no colmate su superficie. Para manejarla se propondrán dos canaletas (se utilizarán los números 1 y 2 para reconocerlas) a los extremos de la calle, con obras dentro y al costado de estas, para disminuir la velocidad del flujo y reducir los sedimentos que viajan en él (Figura 4.1). Las obras serán barreras muertas, camas de disipación de energía antes de estas (alternadas) y una cámara de sedimentación.

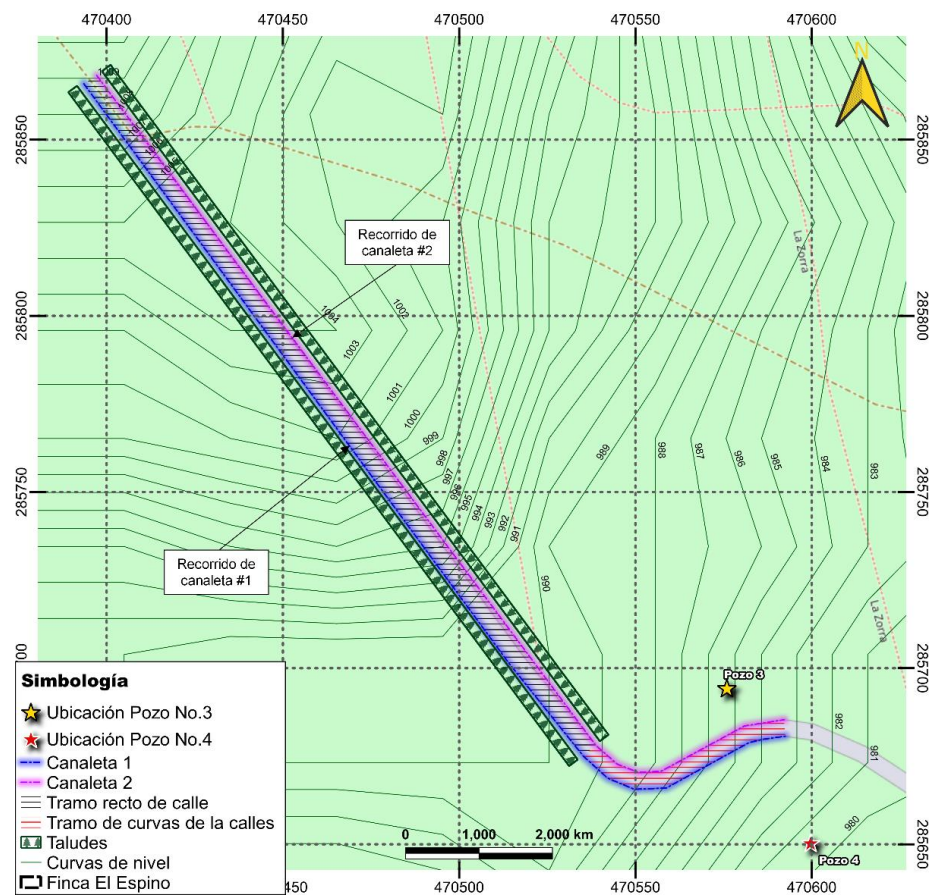


Figura 4.1. Canaletas 1 (azul) y 2 (morada) a los extremos del tramo total de calle junto con el área de taludes considerada. [Elaboración propia]

Dentro del área de escurrimiento del pozo 4 se mantendrán e intervendrán las canaletas ya existentes (se usarán las letras *A* y *B* para distinguirlas) para manejar los sedimentos y la escorrentía que se generen dentro de ella. Para completar las intervenciones y asegurar el aislamiento del área se colocará distanciada de la canaleta, en el acceso al pozo, una barrera de geotextil.

4.1. Consideraciones para el proceso de cálculo de la propuesta.

En su totalidad el tramo de calle rural que comprenderá toda la propuesta tiene 300 m de longitud. Este se dividirá en dos partes para considerar las áreas de escurrimiento, primera, 240 m de tramo recto de calle más el área de taludes considerada a su costado, y la segunda, 60 m de tramo de calle entre curvas (Figura 4.2). En estas dos partes las áreas de drenaje que se considerarán representan dos tipos de uso de suelo: una calle rural y zona de cultivo con sombra (café).

Tomando en cuenta la capacidad de infiltración observada en el pozo 3, se considerará que su área verde no escurre hacia el tramo de calle entre curvas (segunda parte). Y el área de drenaje del pozo 4, debido a la pendiente del terreno, no participará en el cálculo porque no le aporta agua a la calle (Figura 4.3).

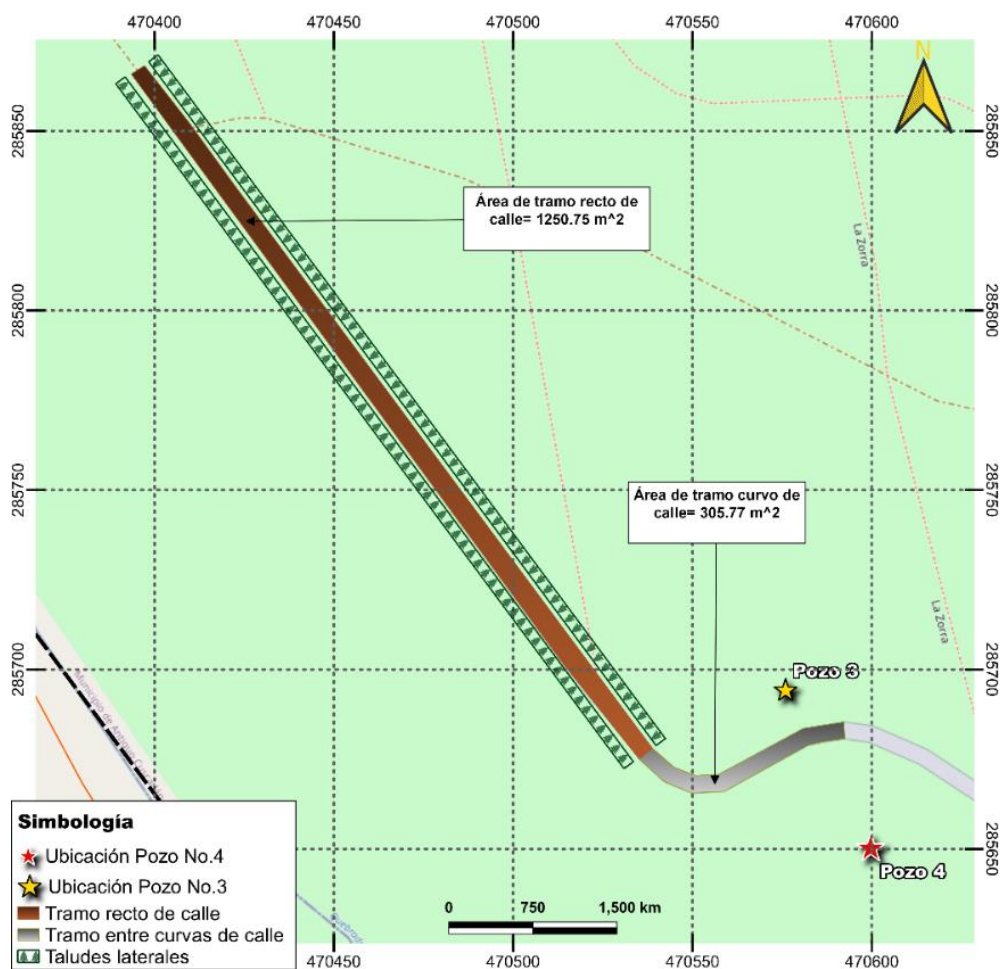


Figura 4.2. La división que se utilizó del tramo de calle para realizar el análisis. [Elaboración propia].



Figura 4.3. Pozo 3, parte de tramo de calle entre curvas y acceso al pozo 4 (detrás del vehículo).

4.2. Verificación de la capacidad de infiltración, en el pozo 3.

A continuación se detallará el proceso y resultado de la prueba realizada al pozo de absorción 3 en el mes de octubre de 2021.

Se comenzó con una limpieza superficial al pozo 3, del que solo se recolectó material orgánico (Figura 4.4).



Figura 4.4. Limpieza superficial de pozo 3.

Luego de la limpieza se extendió la manguera (Figura 4.5) hacia el lugar de la prueba y se procedió a obtener el caudal que la bomba estaba arrojando. Esto se hizo tomando el tiempo en que se llenaba un barril de plástico como el que se muestra en la Figura 4.6. Obtenidas las dimensiones promedio del barril y su tiempo de llenado, se procedió a hacer el cálculo del caudal del flujo que estaba entrando al pozo.

Transcurridos 25 minutos aproximadamente, se observó una leve elevación del nivel de agua, se midió, y se obtuvo una lectura de 60 centímetros en el tubo de inspección, que se infiltró en un tiempo aproximado de 2 minutos. El vaciado del camión cisterna tomó un tiempo total de 27 minutos con 28 segundos.



Figura 4.5. Proceso de llenado de pozo 3.



Figura 4.6. Cálculo de caudal con barril de 55 galones de capacidad.



Figura 4.7. Material extraído durante la excavación del pozo 3.

El material que se observa en la Figura 4.7 fue extraído durante la excavación del pozo, de acuerdo al personal de la cooperativa, y eso muestra el material que conforma el estrato.

La acumulación de material en la superficie de los pozos de absorción es uno de los factores que incide principalmente en el funcionamiento de la mayoría de estos en la cooperativa, algunos incluso se colmatan durante la tormenta por el arrastre de partículas con la escorrentía, como se muestra en la Figura 4.8.



Figura 4.8. Acumulación de lodo en pozo 4 después de una tormenta.

4.3. Cálculo de volumen de sedimentos producidos por año.

Para este cálculo se utilizó la metodología RUSLE, y para implementarlo se consideró un área de cuenca de 4211.3 m², que incluye al área de calle para longitud total de 300 m, el área de microcuenca del pozo 4, y las áreas de taludes que aportan escorrentía al pozo. Además, se estableció calcular el volumen de sedimentos analizando una longitud de 300 m de calle que se dividió en seis tramos de 50 m cada uno, con el fin de llegar a un valor más representativo de volumen potencial total de sedimentos de la cuenca, que tomara en cuenta los valores promedio de las pendientes y elevaciones por cada tramo, como se muestra en la Figura 4.9 y en la Figura 4.10.

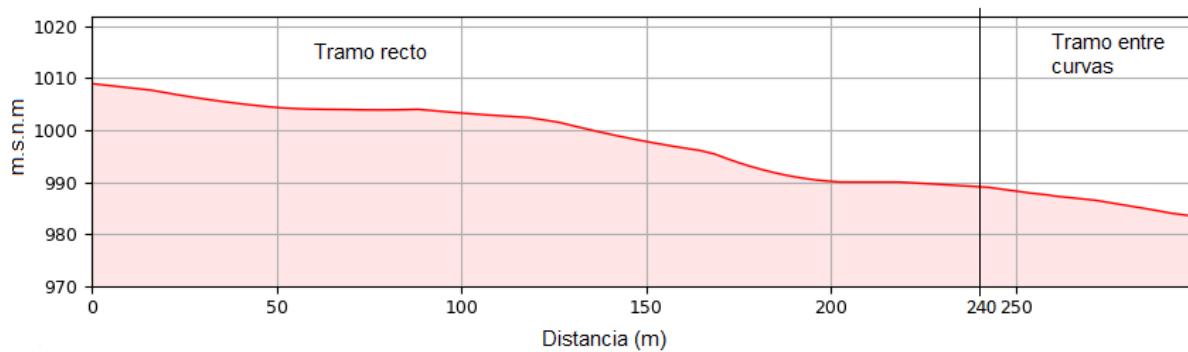


Figura 4.9. Perfil longitudinal de calle en función de las elevaciones. [Elaboración propia]

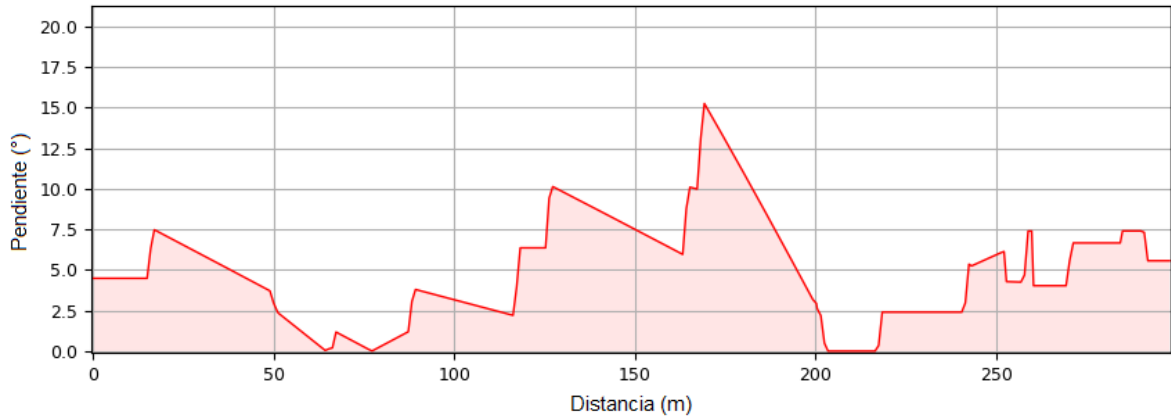


Figura 4.10. Pendientes en grados de la calle. [Elaboración propia]

Para la determinación del volumen potencial total de sedimentos, tres de los cinco factores de la ecuación RUSLE deben tomar en cuenta los tramos de calle establecidos para poder generar un valor promedio de cada uno, y estos son los factores R , LS y P .

Para cada parámetro se generó primero un valor por cada uno de los seis tramos de calle, y del promedio de estos seis cálculos resulta el valor representativo del factor para la cuenca (Anexo D).

El factor de erosividad de lluvia R depende de una precipitación promedio anual constante, que para la Cooperativa El Espino es de 2050 mm según (VIGEA, s.f.) y también depende de las elevaciones promedio por cada tramo, así que de estos valores R anteriores resulta el factor de cuenca R de 5021.88 [(MJ*mm)/(ha*h*año)].

El factor topográfico del terreno LS depende de las pendientes promedio por tramo y sus longitudes, que en este caso son de 50 m, generando un valor global LS de cuenca de 1.50. El factor de prácticas de conservación P también depende de las pendientes promedio del terreno por tramo según Tabla 2.6, y los seis resultados generaron un valor de cuenca P de 0.58.

El factor de erosionabilidad del suelo K solo depende del tipo de suelo y su contenido de materia orgánica para establecer su valor según Tabla 2.3, y para el caso se tiene un suelo franco arenoso con 4% de materia orgánica, que le corresponde un valor K de 0.19.

También está el factor de cobertura y manejo de vegetación C , que para este caso se estableció que el uso de suelo es bosque/cafetal, al que corresponde según Tabla 2.5 un valor C de 0.003.

Con todos estos factores calculados, se obtuvo el volumen potencial total de la cuenca $A = 2.51 \text{ Ton/ha/año}$, y para relacionar este valor con el volumen de agua lluvia que se genera en las canaletas, se obtiene a partir de la carga total de sedimentos el volumen de arrastre de material, que resultó ser de $0.78 \text{ m}^3/\text{año}$.

4.4. Presentación de Propuesta.

A través de la simbología de la Figura 4.11 se puede observar el tipo de intervención que se localizará a lo largo de los 240 m de calle recta, 60 m de tramo entre curvas y el área de escurrimiento del pozo 4. Representando con puntos los tipos de barreras a colocar dentro de las canaletas, con un rombo a la cámara de sedimentación y con una línea seccionada a la barrera de geotextil.

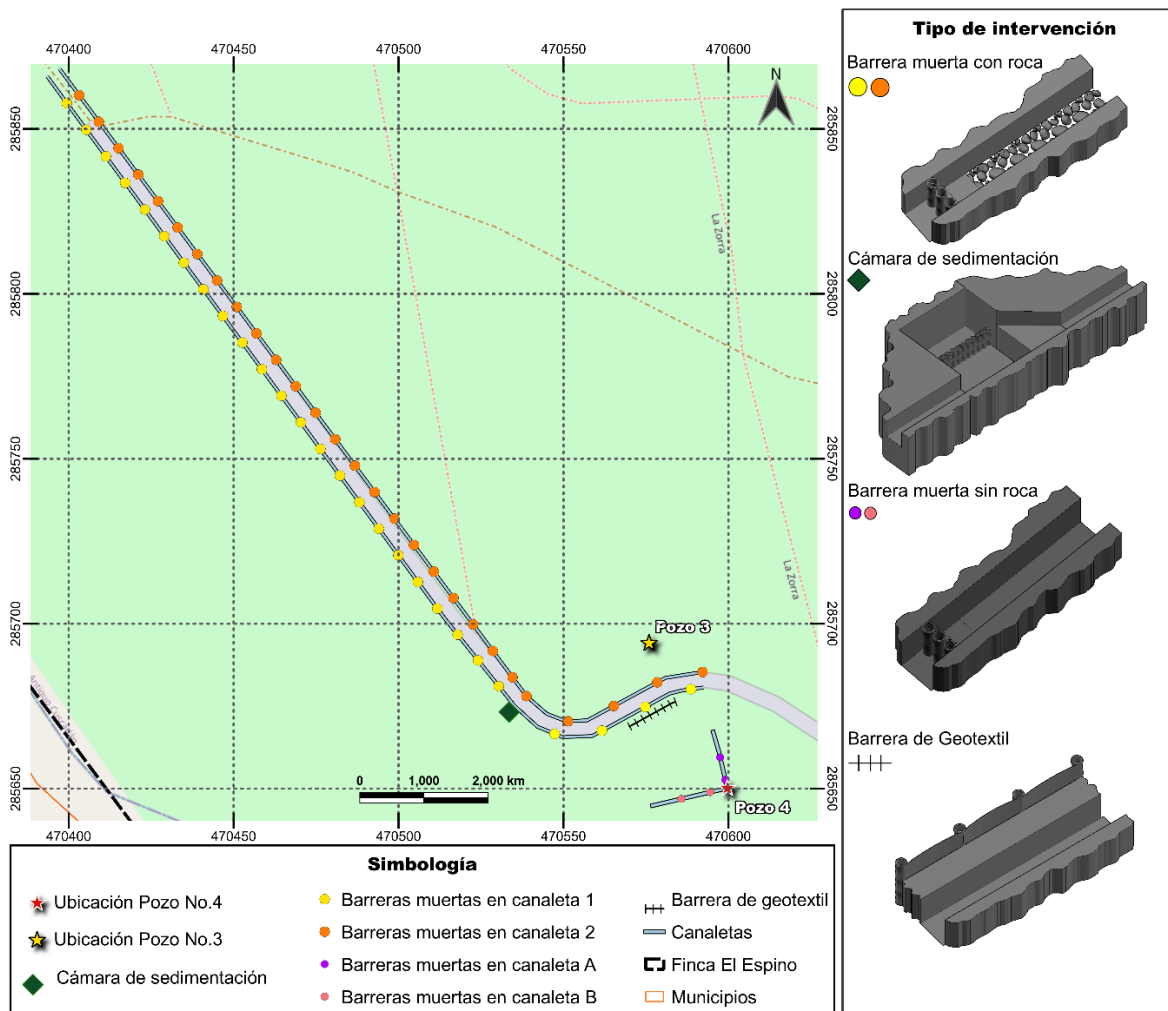


Figura 4.11. Ubicación de intervenciones sobre la calle y terreno del pozo.

4.4.1. Intervenciones a las canaletas.

La cantidad total de elementos y la descripción de la manera en que se proponen estos en el interior de estas se presenta en la Tabla 4.1. Para la canaleta 1 del primer tramo se tienen 24 divisiones porque estas se definieron a cada 10 m, solo en la última no se puso barrera da bambú y las camas de disipación de energía se dispusieron de manera alterna. Para la canaleta 2 se tiene la diferencia que se dispuso un conjunto de barrera de bambú-cama de disipación de energía más. En el segundo tramo se tienen 4 divisiones, cada uno con su conjunto completo de intervenciones.

En la Figura 4.12 se presentan los dos tipos de intervenciones a realizar en el interior de estas.

Tabla 4.1. Cantidad total de intervenciones realizadas en las canaletas 1 y 2 de acuerdo a los tramos.

Nombre de parte de calle	Canaleta	Longitud del tramo (m)	Número de divisiones iguales	Cantidad de barreras de bambú	Cantidad de camas de disipación de energía
Primera	1	240	24	23 a cada 10 m	11 alternadas una barrera sí una barrera no.
Primera	2	240	24	24 a cada 10 m	12 alternadas una barrera sí una barrera no.
Segunda	1 y 2	60	4	4 a cada 15 m	8
TOTAL				55	31

Fuente: Elaboración propia.

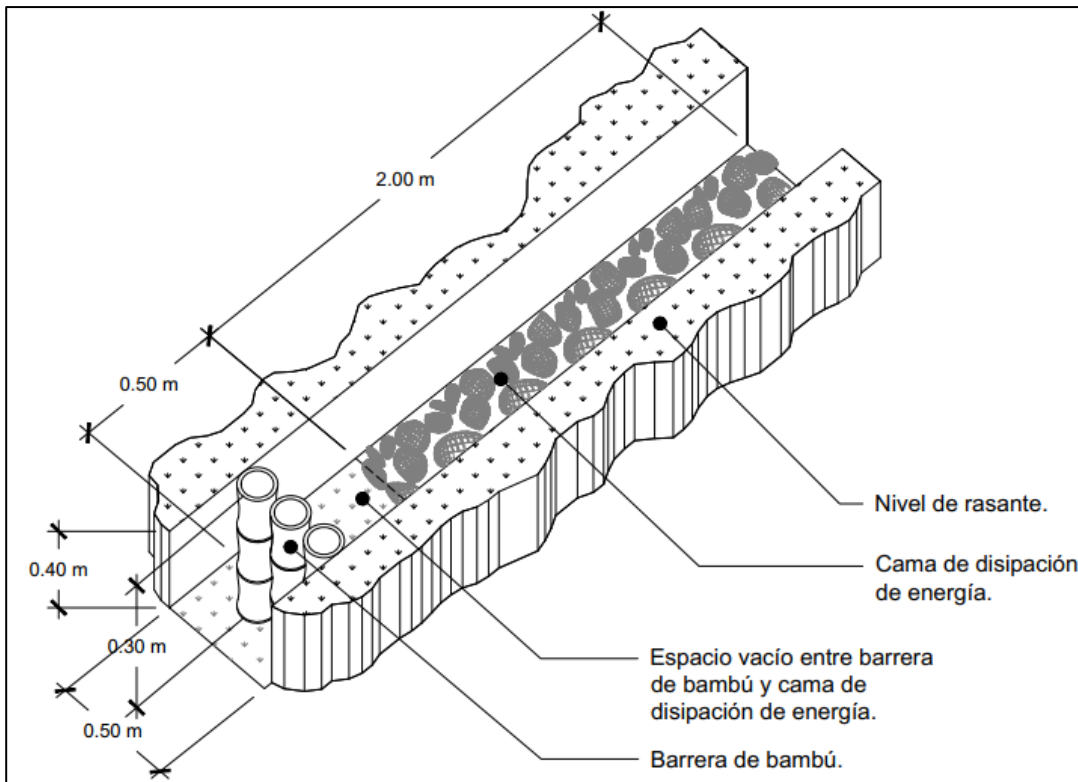


Figura 4.12. Conjunto de barrera de bambú con su cama de disipación de energía. [Elaboración propia]

4.4.2. Barreras muertas dentro de las canaletas que van a dar a los pozos.

Las indicaciones para implementar las barreras de bambú son los mismos en todos los casos, sin embargo, como las canaletas de los pozos ya tienen distancias establecidas, en la Tabla 4.2 se presenta la disposición propuesta para estas. La diferencia a remarcar es que para estas barreras no se consideró necesario utilizar cámaras de disipación de energía (Figura 4.13).

Tabla 4.2. Distribución de las barreras de bambú dentro de las canaletas del pozo 4.

Canaleta	Longitud de canaleta (m)	Distancia de la primera barrera con respecto al extremo de la canaleta más alejado del pozo (m)	Distancia de la segunda barrera con respecto al extremo de la canaleta más alejado del pozo (m)
A	17.6	8	15
B	23.3	9	18

Fuente: Elaboración propia.

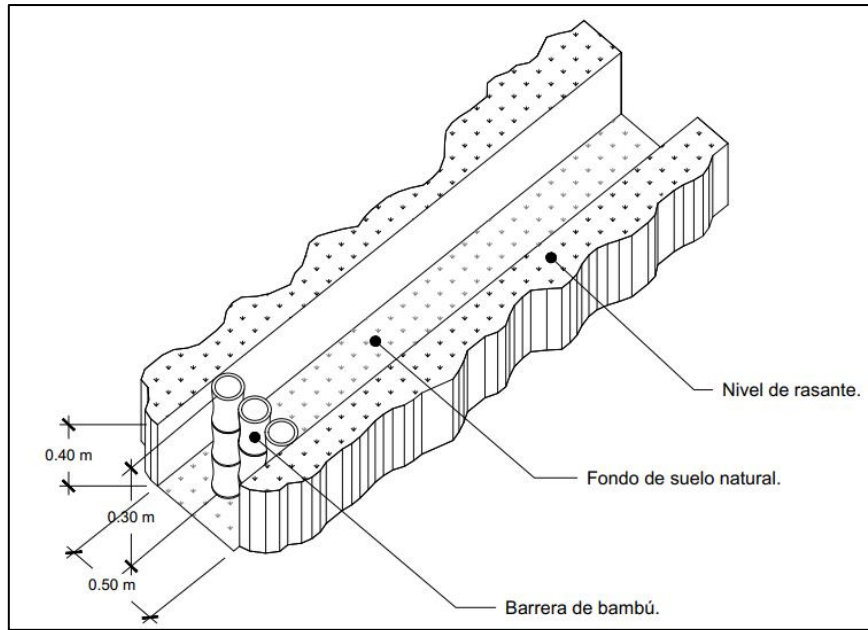


Figura 4.13. Barreras de bambú para las canaletas que van directas al pozo 4.

En la Figura 4.14 se presentan las canaletas A y B que directo al pozo 4.

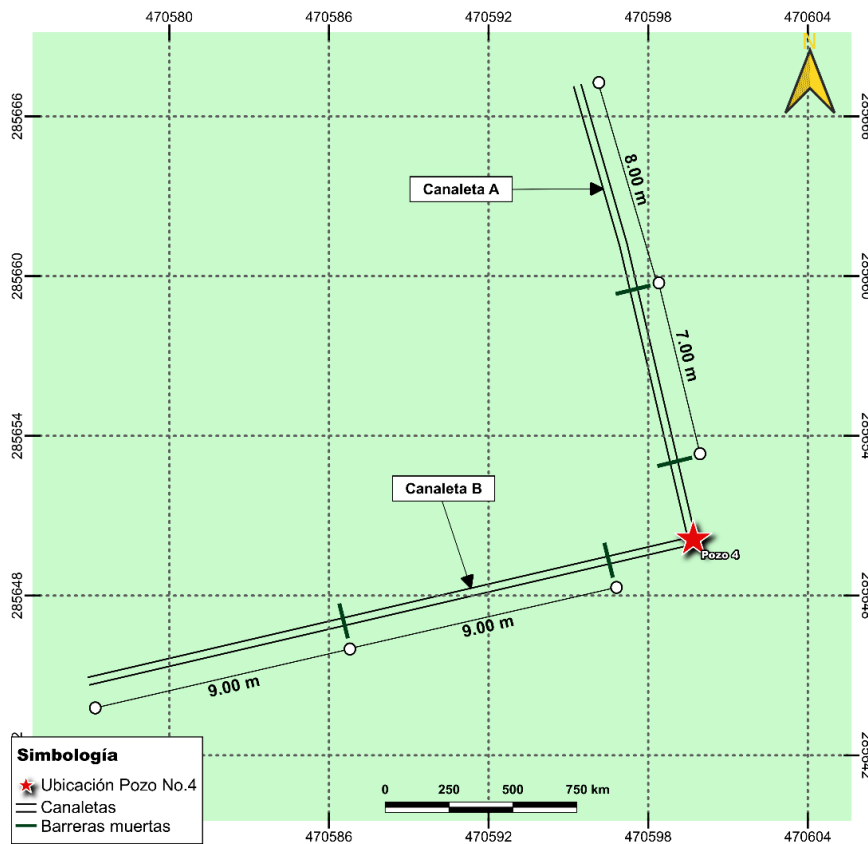


Figura 4.14. Canaletas que aportan agua directamente al pozo.

4.4.3. Barrera de geotextil para proteger el acceso del pozo 4.

Los materiales y sus cantidades para la construcción de la barrera que se dispuso en caso de que ciertos sedimentos rebasen la canaleta se muestran en la Tabla 4.3. Ver Figura 4.15.

Tabla 4.3. Cantidades relacionadas a la barrera de geotextil.

Ubicación	Número de soportes verticales empotrados de bambú	Metros lineales de geotextil (m)
16 m del segundo tramo	17	16

Fuente: Elaboración propia.

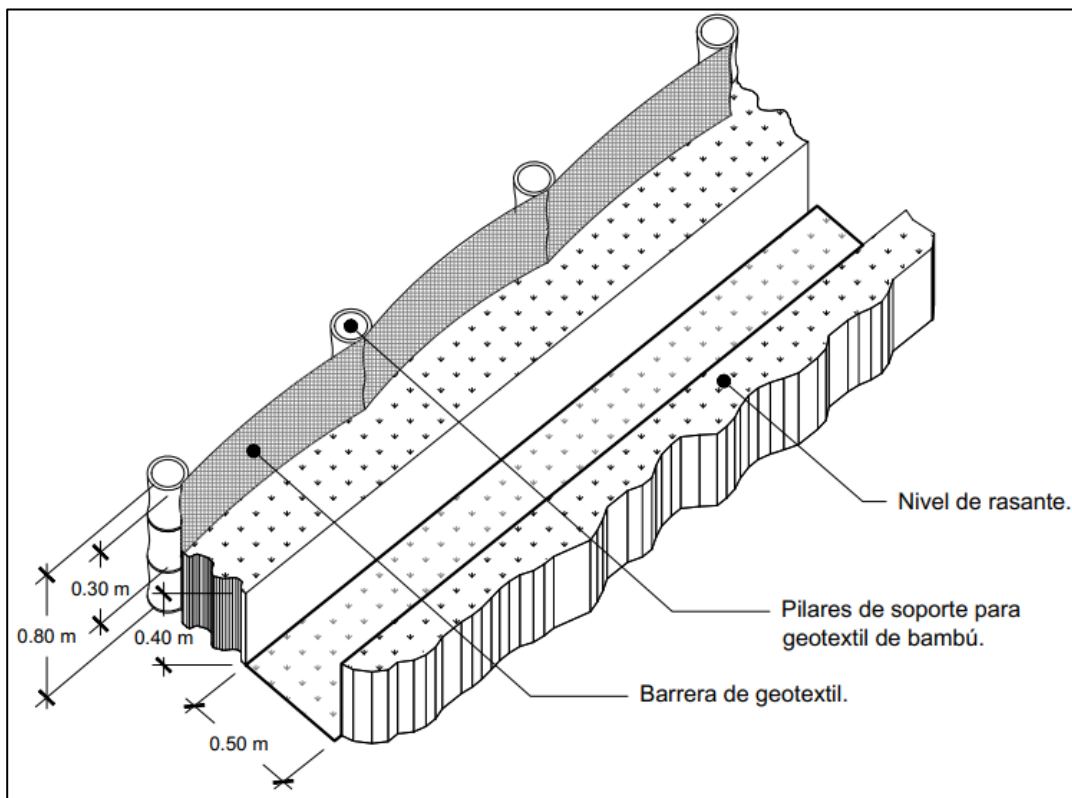


Figura 4.15. Barrera de geotextil y tramo de canaleta 1. [Elaboración propia]

4.4.4. Cámara de sedimentación.

Se necesita de una estimación del volumen neto del pozo para poder definir el de la cámara de sedimentación, esto se presenta en la Tabla 4.4 y en la Tabla 4.5. En esta también se muestran las dimensiones y el volumen propuestos. En la Figura 4.16 se muestra el esquema de la cámara de sedimentación.

Tabla 4.4. Volumen geométrico y neto del pozo 4.

Diámetro (m)	Altura (m)	Volumen geométrico (m ³)	Volumen neto del pozo (m ³)
2.04	3.00	9.80	4.90

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.5. Valores de volumen mínimo y propuesto para la cámara de sedimentación del pozo 4.

Volumen de mínimo de cámara (m ³)	Largo (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)	Volumen propuesto para cámara (m ³)
2.45	2.50	2.00	0.75	3.75

Fuente: Elaboración propia.

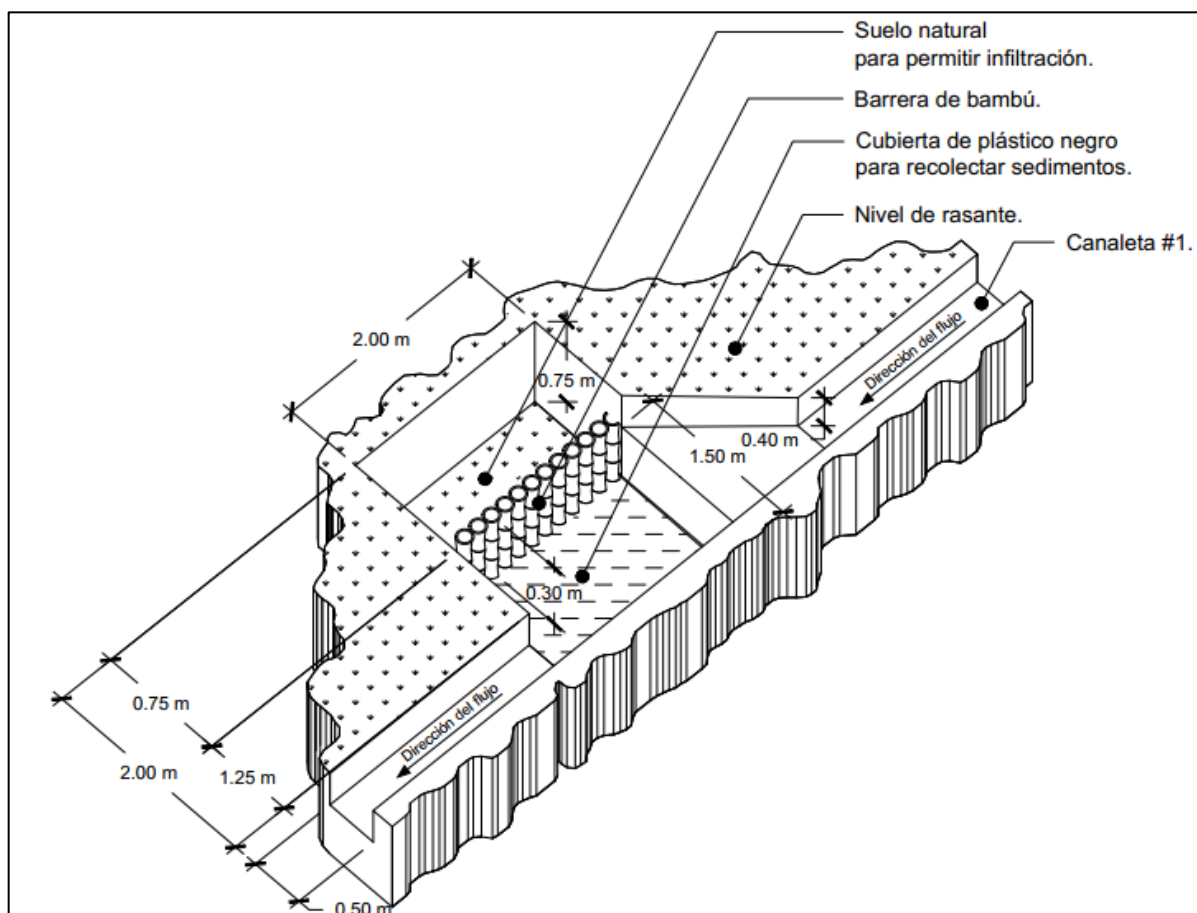


Figura 4.16. Cámara de sedimentación con muro de varas de bambú. [Elaboración propia]

4.5. Costo de materiales empleados.

Se consideró muy importante que las intervenciones fueran económicas, fáciles de construir, y que fueran hechas con materiales que la cooperativa dispone o que sean de bajo costo. En esta estimación no se incluyó el costo de mano de obra, puesto que el personal que construye es de la misma cooperativa. Los costos de materiales fueron consultados en línea.

A continuación, se presenta el detalle de los materiales a utilizar, su cantidad y costo. Para el caso de los que ya posee la cooperativa se presenta solo la cantidad requerida para las intervenciones a realizar (Tabla 4.6).

Tabla 4.6. Costo de los materiales empleados para la construcción de las intervenciones propuestas.

Descripción material	Cantidad	Unidad	Disponibilidad en Cooperativa El Espino	Precio por unidad (\$)	Precio total (\$)
Varas de bambú de 5 pulgadas de diámetro	151.8	m	Sí	-	-
Piedra	2.4	m ³	Sí	-	-
Plástico negro	13	yarda	No	0.99	12.87
Geotextil tipo ECB, para control de erosión	4	pieza	No	6.80	27.2
Postes para barrera de geotextil	17	pieza	Sí	-	-
Clavos para madera con arandela 2 ½ pulgada	3	libra	No	1.75	5.25
TOTAL					45.32

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. Conclusiones

Para mantener el buen funcionamiento de los pozos de absorción es necesario construir obras de control y manejo de escorrentía y sedimentos, debido a la necesidad de limpieza continua de la superficie de estos. Por lo tanto, se concluye que las obras propuestas en esta investigación son necesarias para mejorar y alargar en el tiempo el funcionamiento de los pozos de absorción. La medición para determinar la eficiencia de los pozos debe considerarse para el futuro, a mediano o largo plazo.

Las intervenciones de la solución propuesta en esta investigación favorecerían a manejar el material que se erosiona debido a lluvia y que se deposita en los pozos de absorción, esto lograría alargar la vida útil de los pozos.

Los materiales que se han considerado utilizar en las intervenciones propuesta aprovechan los recursos naturales que existen dentro de la zona de la cooperativa y logran mantener un bajo costo. Los costos en los que se tendría que incurrir son bajos (menos de US \$100) de acuerdo a lo calculado. Por ende, se concluye que las obras son económicas, de fácil implementación y están orientadas a las necesidades de la cooperativa.

5.2. Recomendaciones

En vista de que las intervenciones que se presentan en esta investigación forman parte de una propuesta, la mayoría de las recomendaciones asumirán que estas se construirán en el futuro.

Ya que la mayor parte del tramo de calle que se propone intervenir tiene a sus lados taludes altos llenos de vegetación, se recomienda intervenir las coronas de los taludes con tipos de plantas que disminuyan el proceso erosivo y de arrastre de sedimentos.

Se recomienda que al implementarse las intervenciones, se realice un monitoreo periódico de su estado y funcionamiento para determinar si necesitan limpieza, algún ajuste o mejora.

GLOSARIO

Andesita: roca volcánica intermedia, generalmente porfídica, formada por plagioclasa ácida (oligoclasa o andesina) acompañada por uno o más minerales ferromagnesianos (hornblenda, biotita, ortopiroxeno o clinopiroxeno). Es el equivalente volcánico de la diorita. Se distingue del basalto por la naturaleza de la plagioclasa, que es andesina o menos cálcica.

Basalto: roca volcánica de color oscuro (en ocasiones, negra), con contenido en SiO₂ entre el 45% y el 52%, con textura microcristalina o porfídica, que contiene plagioclasa cálcica y piroxenos, normalmente augita, con o sin olivino. Frecuentemente presenta magnetita o ilmenita accesorias. Se distingue de la andesita por la naturaleza de la plagioclasa, que es labradorita o más cálcica. Su equivalente plutónico es el gabro.

Bosque tropical deciduo latifoliado: son formaciones forestales que están constituidas por diversas especies de árboles que tienen hoja ancha o grande, y son habitados por muchas especies de animales para su hábitat.

Miembro: (geología) unidad litoestratigráfica formal de rango inferior a la formación, y que es siempre una parte de una formación, reconocida por sus características litológicas de las otras partes de la misma formación.

Microcuenca: también conocido como minicuenca, es un área de aguas superficiales que vierten a una red hidrográfica natural con uno o varios cauces naturales, que confluyen a un curso de agua mayor hacia una salida, ya sea un río, lago o el mar.

Plagioclasa: Serie de minerales del grupo de los feldspatos con composiciones comprendidas entre la albita (NaAlSi₃O₈) y la anortita (CaAl₂Si₂O₈) puras. Son ampliamente distribuidos, tanto en rocas ígneas como en metamórficas. Se reconocen fácilmente por presentar casi siempre maclas polisintéticas, visibles en el microscopio petrográfico con luz polarizada.

Roca efusiva: es resultante del enfriamiento de una lava volcánica, que tiene textura vítrea, vitroporfídica o vacuolar. Sinónimos: roca extrusiva, roca volcánica.

Roca piroclástica: es formada por los productos fragmentarios arrojados en erupciones volcánicas.

Sondeo: Perforación de pequeño diámetro que se realiza en el suelo del terreno con objeto de localizar yacimientos minerales, de hidrocarburos, niveles freáticos, acuíferos, etc.

REFERENCIAS

BELTRÁN, H. (2017). Erosión y transporte de sedimentos suspendidos del río Grande de San Miguel. San Salvador: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

COLORADO DEPARTMENT OF TRANSPORTATION [CDOT] (2019). Guía de campo para control de erosión y calidad de aguas de escorrentía. Colorado Department of Transportation. Estados Unidos.

CHOW, V., MAIDMENT, R. y MAYS, L. (1994). Hidrología aplicada. Bogotá: McGraw Hill.

COMISIÓN NACIONAL FORESTAL [CONAFOR]. (2007). Protección, restauración y conservación de suelos forestales. (3ra. ed.). México.

Consejo de alcaldes del Área Metropolitana de San Salvador y Oficina de planificación del Área Metropolitana de San Salvador [COAMSS] [OPAMSS]. (2018). El proceso de diseño de SUDS en el AMSS, módulo 3. Coordinación OPAMSS.

ESCALANTE, A. (2010). Evaluación de riesgo de erosión Cuenca Barra de Santiago. Antigua Guatemala: Universidad Centroamericana José Simeón Cañas.

FERNÁNDEZ, D., LÓPEZ, O. y MARTÍNEZ, M. (2017). Pozos de absorción. (1ra ed.). SAGARPA.

FERNÁNDEZ, D. y LÓPEZ, O. (2017). Pozos de absorción. (2da ed.). México: SAGARPA.

HERNÁNDEZ, W. (2019). Informe análisis geológico del sondeo con recuperación de núcleo de perforación del Parque Bicentenario. En consultoría para la elaboración de perfiles geológicos de 8 perforaciones. San Salvador, El Salvador.

HEVIA, J. (2002). Control de erosión en desmontes originados por obras de infraestructura viaria: Aplicación al entorno de Palencia capital. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS [INIFAP]. (2007). Riesgo a la erosión hídrica y proyección de acciones de manejo y conservación del suelo en 32 microcuencas de San Luis Potosí. México.

MANCILLA, G. (2008). Uso y conservación de suelos. Apuntes docentes. Santiago: Universidad de Chile.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES [MARN]. (2012). Estudio de los procesos de erosión-sedimentación playa El Espino. República de El Salvador.

SÁENZ, G. (1999). Hidrología en la ingeniería. Bogotá: Alfaomega.

SALVANATURA. (2011). Propuesta Plan de manejo del Área Natural Protegida El Espino-Bosque Los Pericos. San Salvador. SalvaNATURA.

SALVANATURA. (2012). Estudio hidrogeológico hidrológico del Área Natural Protegida El Espino-Bosque Los Pericos. San Salvador. SalvaNATURA.

SERVICIO NACIONAL DE ESTUDIOS TERRITORIALES [SNET]. (2008). Servicio hidrológico nacional. San Salvador: Servicio Nacional de Estudios Territoriales.

SISTEMA DE INTEGRACIÓN CENTROAMERICANO DE TECNOLOGÍA AGRÍCOLA [SICTA]. Obras de conservación de suelos y agua en laderas.

VILLAMARÍN, S. (2013). Manual básico de diseño de estructuras de disipación de energía hidráulica. Sangolquí. Escuela politécnica del ejército.

FUENTES ELECTRÓNICAS:

CITY ADAPT (2021). Arenal Monserrat, San Salvador: Soluciones basadas en la naturaleza. <https://cityadapt.maps.arcgis.com/apps/Cascade/index.html?appid=18afd2ddea874133881f0c12baa7cfe7> (Consulta: 13/01/2021).

GLOBAL WATER PARTNERSHIP [GWP]. (s.f.). Cuenca hidrológica. https://www.gwp.org/globalassets/global/gwpsam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf (Consulta: 05/01/2022).

SERVICIO NACIONAL DE ESTUDIOS TERRITORIALES [SNET] (2020). Perfil climatológico estación Ilopango. <http://www.snet.gob.sv/meteorologia/Perfiles.pdf> (Consulta: 14/10/2021).

UNIVERSIDAD DE GRANADA [UGR] (2020). Glosario de geología. https://www.ugr.es/~agcasco/personal/rac_geologia/rac.htm#A. (Consulta: 26/10/2021).

VISUALIZADOR DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL [VIGEA]. (s.f.). Red meteorológica. <http://mapas.marn.gob.sv/vigea/nepamap.aspx>. (Consulta: 13/01/2022).

ANEXO A

CURVAS DE INTENSIDAD-DURACIÓN- FRECUENCIA.

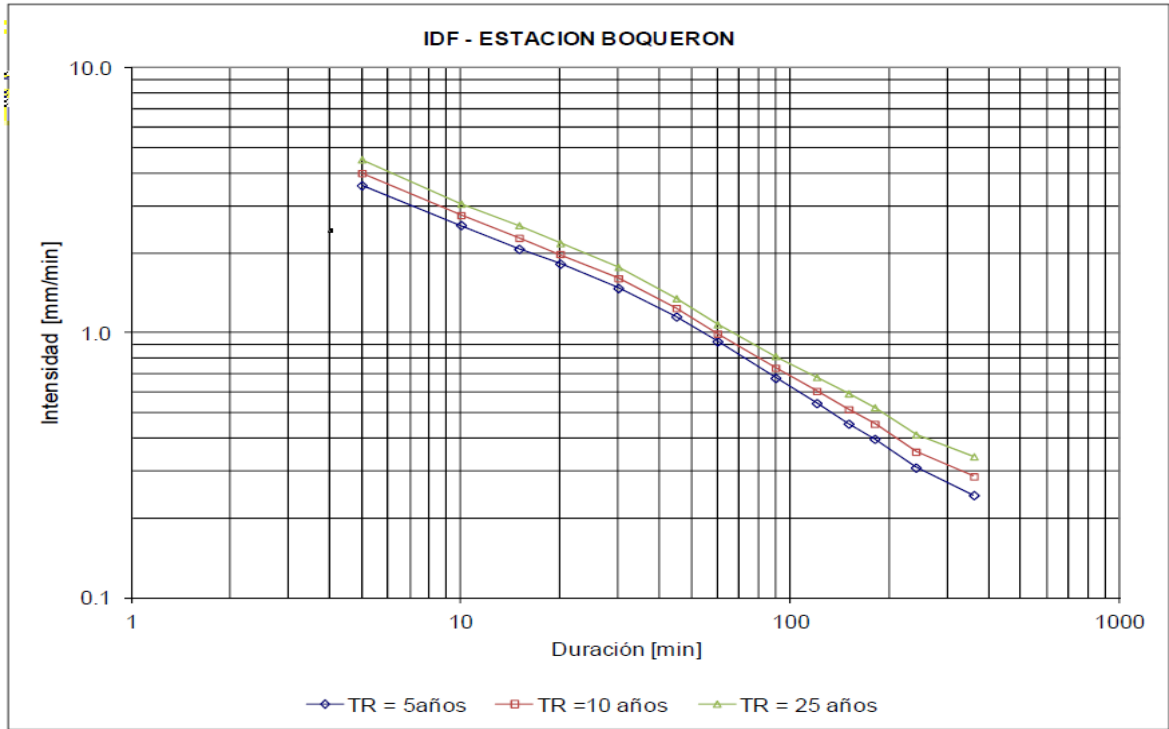


Figura A-1. Ejemplo de curvas IDF de estación meteorológica El Boquerón, con periodos de retorno de 5, 10 y 25 años. Tomado de Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET, 2008).

ANEXO B

PUNTOS DE DELIMITACIÓN FINCA EL ESPINO

Tabla B-1. Atributos de puntos de delimitación Finca El Espino.

No.	Código	X	Y	Z	LON	LAT
1	M1	469863.956	287293.0433	1237	-89.2786139060	13.7061919840
2	M2	470673.856	286718.316910	1036	-89.2711202240	13.7010049970
3	M3	471387.875	285940.300370	920	-89.2645112140	13.6939791460
4	M4	471217.018	285842.616540	931	-89.2660897440	13.6930944090
5	M5	471229.111	285749.528530	925	-89.2659769910	13.6922530420
6	M6	471112.726	285704.559490	934	-89.2670524730	13.6918453690
7	M7	471136.08	285614.337530	927	-89.2668356420	13.6910300230
8	M8	470485.838	285549.818920	985	-89.2728461990	13.6904401980
9	M9	469825.439	286438.144100	1075	-89.2789608350	13.6984635470
10	M10	469854.175	286543.179620	1092	-89.2786963010	13.6994133380
11	M11	469675.122	286660.450730	1125	-89.2803528900	13.7004715530
12	M12	469755.486	286790.373870	1143	-89.2796113280	13.7016468650

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO C

MAPA DE TIPOS DE SUELO Y TEXTURAS

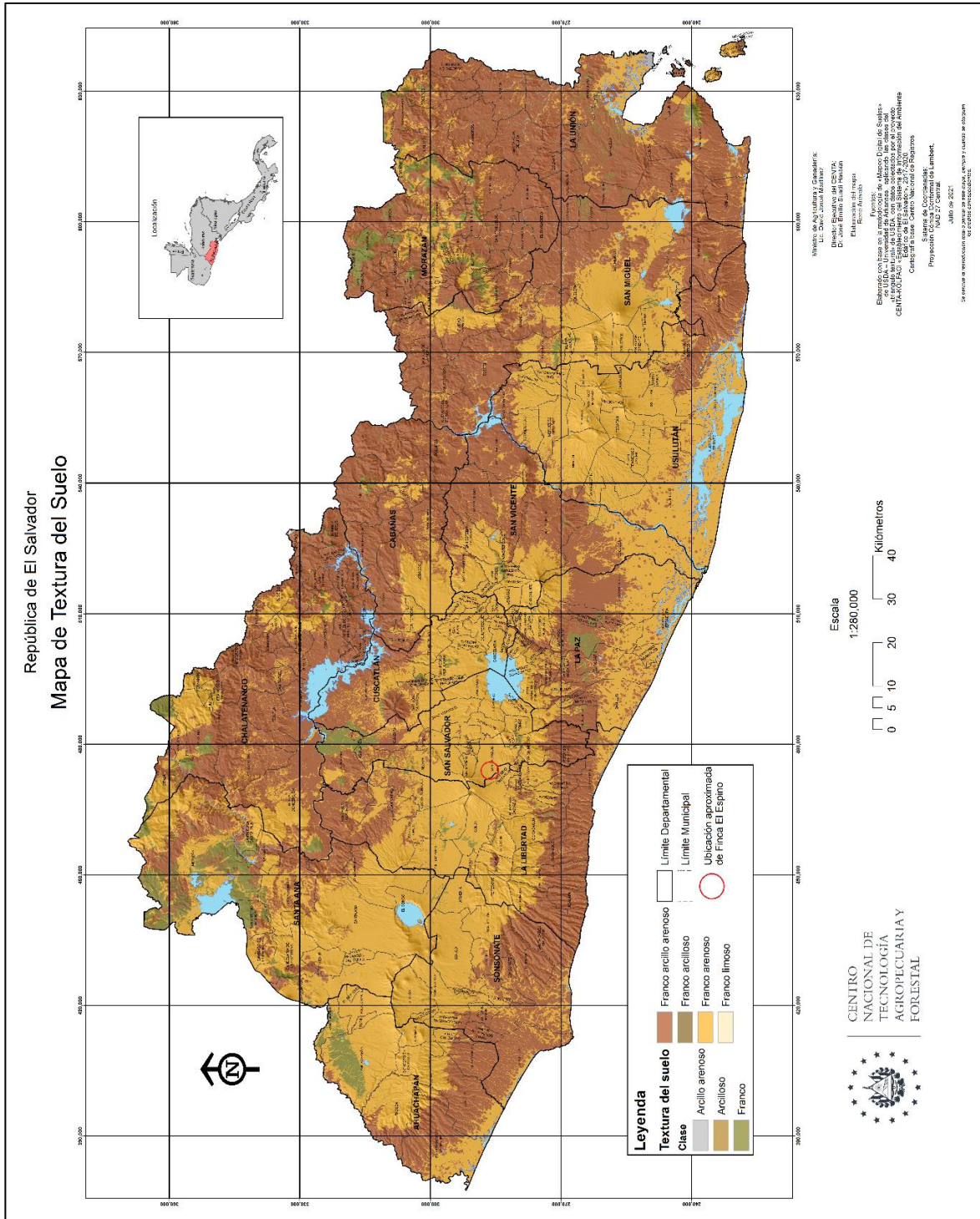


Figura C-1. Mapa de tipos de suelos y texturas del Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal.

ANEXO D
RESULTADOS DE MÉTODO RUSL

Para el área de escurrimiento considerada en los cálculos de volúmenes de agua, se presenta el volumen potencial total de sedimentos producidos por año analizado para una longitud de calle de 300 m y generado a través de valores promedio de sus factores, como se muestra en la Tabla D-1.

Tabla D-1. Resultados de la aplicación del método RUSLE.

Parámetro	Valor obtenido o seleccionado	Unidades
Factor de erosividad de la lluvia (R)	5021.88	(MJ.mm) / (ha.h.año)
Factor de erosionabilidad (K)	0.19	(Mg.ha.h) / (ha.Mj.mm)
Factor topográfico (LS)	1.50	Adimensional
Factor de cobertura y manejo de vegetación (C)	0.003	Adimensional
Factor prácticas de conservación (P)	0.58	Adimensional
Volumen potencial total de sedimentos (A)	2.51	Ton/ha/año
Área de cuenca	4212.05	m ²
Área de cuenca	0.42	ha
Volumen de descarga potencial anual de la cuenca	1.06	Ton/año
Densidad aparente del suelo (franco arenoso)	1350	kg/m ³
Volumen de arrastre de sedimentos	0.78	m ³ /año

Fuente: Elaboración propia.

El resultado de volumen de arrastre de sedimentos (Tabla D-1) es importante para que la solución pueda acercarse más a lo requerido por la realidad, en cuanto a las dimensiones que deben tener las canaletas propuestas. Con este ya es posible tomar en cuenta el volumen de agua que produce la tormenta, y el volumen potencial de sedimentos que produce el área total de escurrimiento considerada. Sin embargo, se debe notar que este valor de materiales de arrastre es para un período de tiempo de un año completo, por lo que las dimensiones propuestas para la canaleta son aún funcionales.

- Cálculo de caudales.

La Tabla D-2 muestra los coeficientes de escorrentía calculados.

Tabla D-2. Coeficientes de escorrentía ponderados obtenidos de acuerdo a los pasos de cálculo realizados.

Nombre de parte de calle	Tipo de superficie	Coeficiente de escorrentía	Área (m ²)	Coeficiente de escorrentía ponderado
Primera	Taludes	0.39	480.00	0.69
	Calle rural	0.80	1250.75	
TOTAL			1730.75	
Segunda	Calle rural	0.80	305.77	0.80
TOTAL			305.77	

Fuente: Elaboración propia.

Considerando las dos agrupaciones de áreas de escurrimiento que se realizaron para el análisis, se obtuvieron mediante la fórmula racional los valores de caudal mostrados en la Tabla D-3

Tabla D-3. Caudales obtenidos por tramos.

Nombre de parte de calle	C	i (mm/min)	A (m ²)	Q (m ³ /s)
Primera	0.69	2.13	1730.75	0.0422
Segunda	0.80	2.13	305.77	0.0087

Fuente: Elaboración propia.

- Volúmenes de agua producidos por la lluvia.

Los volúmenes de agua producidos en cada área de escurrimiento y la sumatoria de estos, son presentados en la Tabla D-4.

Tabla D-4. Volúmenes de agua producidos de acuerdo a los tramos.

Nombre de parte de calle	Q (m ³ /s)	t (min)	Volumen de agua (m ³)
Primera	0.0422	15	37.95
Segunda	0.0087	15	7.82
TOTAL			45.77

Fuente: Elaboración propia.

- Cálculo de caudales.

En la Tabla D-5 se presentan las áreas de los polígonos obtenidos.

Tabla D-5. Resultados obtenidos de todas las geometrías que fueron necesitadas.

Geometría	Área (m ²)
Polígono Pozo N°3	2186.93
Polígono Pozo N°4	2655.53
Polígono Tramo recto de calle	1250.75
Polígono Tramo curvo de calle	305.77

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó por medio del Método Racional y para la intensidad de lluvia se consideró lo mostrado en el apartado 2.1, donde para un tiempo de tormenta de 15 minutos y un periodo de retorno de 5 años, con un valor de 2.13 mm/min.

A los tipos de uso de suelo se les ha asignado valores de C que son 0.39 para zonas verdes y 0.80 para la calle rural (Chow *et al.*, 1994). Se consideraron las dos partes en que se dividió la calle se ponderaron los C 's.

En cuanto a las áreas y coeficientes de escorrentía ponderados, en la primera parte se consideraron las dos áreas de taludes como rectángulos de 1 m de ancho y 240 m de largo. El área de la calle es de un valor 1250.75 m². El coeficiente de escorrentía se obtuvo de manera ponderada considerando los valores según tipo de suelo antes mencionados.

En la segunda parte, debido a que solo se trata de los 60 m del tramo entre curvas el C ponderado es igual a 0.8 y el área total serán los mismos 305.77 m² del tramo.

Para el cálculo de volúmenes de agua producidos por la lluvia, se utilizó una duración de 15 minutos porque las tormentas cortas son las más intensas y también son las más perjudiciales para producir sedimentos. Es así como el tiempo total siempre fue de 900 s, y para obtener los volúmenes solo se multiplicó este por los caudales que se tenían. El volumen total de agua a manejar se logró mediante la suma de los volúmenes individuales que se tuvieron, detallándose en la Tabla D-4.