

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO



FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Proyecto de investigación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

TRABAJO DE TITULACIÓN

Título del proyecto:

**“ANÁLISIS DE LA EXPOSICIÓN DE CIMENTACIONES AL ATAQUE
QUÍMICO POR SULFATOS EN EL SUELO DE LA PARROQUIA DE SAN
GERARDO, RIOBAMBA.”**

Autor:

Esteban Francisco Sánchez Mayorga

Tutor:

Ing. Luis Villafuerte Msc.

Año 2022

REVISIÓN

Los miembros del Tribunal de Graduación del proyecto de investigación de título: **“ANÁLISIS DE LA EXPOSICIÓN DE CIMENTACIONES AL ATAQUE QUÍMICO POR SULFATOS EN EL SUELO DE LA PARROQUIA DE SAN GERARDO, RIOBAMBA.”** presentado por Esteban Francisco Sánchez Mayorga y dirigida por: Ing. Luis Enrique Villafuerte Bermúdez. Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación escrito en la cual se ha constatado el cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodia en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Ing. Luis E. Villafuerte



Firmado electrónicamente por:
**LUIS ENRIQUE
VILLAFUERTE
BERMUDEZ**

Tutor de Tesis

Firma

Ing. Hernán V. Pazmiño, MsC.



Firmado electrónicamente por:
**HERNAN VLADIMIR
PAZMIÑO
CHILUIZA**

Miembro del tribunal

Firma

Ing. Víctor J. García, PhD.



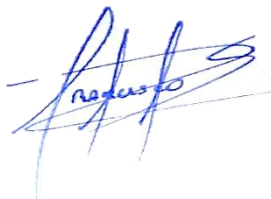
Firmado electrónicamente por:
**VICTOR
JULIO**

Miembro del tribunal

Firma

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La responsabilidad del contenido de este proyecto de Graduación corresponde exclusivamente a Esteban Francisco Sánchez Mayorga e Ing. Luis E. Villafuerte y el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Nacional de Chimborazo.



Esteban Francisco Sánchez Mayorga

CI. 060459269-1



ACTA FAVORABLE - INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CARRERAS NO VIGENTES

En la Ciudad de Riobamba, a los 23 días del mes de Febrero de 2022, luego de haber revisado el Informe Final del Trabajo de Investigación presentado por el estudiante **Esteban Francisco Sánchez Mayorga** con CC: **0604592691**, de la carrera **INGENIERÍA CIVIL** y dando cumplimiento a los criterios metodológicos exigidos, se emite el **ACTA FAVORABLE DEL INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN** titulado “**ANÁLISIS DE LA EXPOSICIÓN DE CIMENTACIONES AL ATAQUE QUÍMICO POR SULFATOS EN EL SUELO DE LA PARROQUIA DE SAN GERARDO, RIOBAMBA.**”, por lo tanto se autoriza la presentación del mismo para los trámites pertinentes.



Firmado electrónicamente por:
**LUIS ENRIQUE
VILLAFUERTE
BERMUDEZ**

Ing. Luis Villafuerte
TUTOR

DEDICATORIA

A las dos personas más importantes de mi vida que han sido y serán el pilar fundamental en la consecución de mis metas, a quienes me dieron la vida y son mi fortaleza, para batallar esta continua lucha llamada vida, mis padres, a quienes amo, respeto y admiro.

A mi querida prima la Ingeniera Katherine Cevallos por ser mi mentora durante mi vida académica, mi inspiración como profesional y el mejor ejemplo a seguir.

A mi ángel de la guarda, Sra. Lilia Vallejo, mi querida y adorada abuelita que es mi estrella fugaz en el cielo y por quien levanto la mirada hoy para dedicarle mi esfuerzo y dedicación, esperando hacerla sentir orgullosa, ya que sin ella este camino conflictivo pero satisfactorio nunca hubiera iniciado.

Esteban Francisco Sánchez Mayorga.

AGRADECIMIENTO

Agradezco infinitamente a Dios, por brindarme sabiduría y fortaleza para continuar de pie ante los obstáculos de la vida y por poner a las personas indicadas en ella. A mis adorados padres Wilo y Ceci, por su ardua labor para con mí persona por enseñarme que en la vida lo más importante es tenerlos a mi lado. Alguna vez se dirigieron a mí diciendo: “no te daremos lujos, pero siempre haremos lo posible para brindarte lo necesario”. Sin embargo, pude entender que mi verdadera riqueza es tener unos padres tan maravillosos, que me educaron con mucho amor y dedicación. Ellos me enseñaron que en la vida todo se gana, por lo que me convirtieron en un hombre noble y trabajador. Padres los Amo con todo mi corazón, sin su apoyo nada de esto fuera posible.

A mi compañera de vida, mi hermana Pamela, que siempre se mantuvo a mi lado a pesar de ser menor, siempre me demostró su apoyo, cariño y cuidado cuando más lo necesitaba.

A mis abuelitas Yoli y Lili que en paz descansen, que se encuentran siempre pendientes de mí y velando por mi futuro. Las dos son mis ángeles y a quienes les debo el cariño y amor que me han brindado a lo largo de mi vida.

Un agradecimiento muy especial a mi prima Kathy, quien fue mi inspiración para seguir esta carrera. No tengo más que palabras de agradecimiento por ser mi mentora y sobre todo por ser mi gran amiga a quien acudo cuando más necesito y quien siempre está pendiente de mí. De igual manera a mi prima Liseth quien fue un apoyo académico cuando me encontraba en momentos conflictivos mil gracias.

Gracias a la Universidad Nacional de Chimborazo que me abrió sus puertas y me brindó la oportunidad de convertirme en profesional, convirtiéndose en mi segundo hogar. A los docentes que siempre estuvieron dispuestos a compartir sus conocimientos para poder

llegar a ser un excelente profesional. A mi tutor de tesis Ing. Luis Villafuerte por darme la confianza y apoyo necesario para poder culminar esta investigación de manera satisfactoria.

A la persona que siempre me ha demostrado su apoyo incondicional y complicidad durante años, Arleth gracias por todo que has hecho por mí, prevalecen los buenos momentos que hemos compartido.

Finalmente, imposible no mencionar a José Luis, Pato, Michael, Pablo, Jairo, Luishi, William, Elvis y Stalin, mis grandes amigos, con los que compartimos muchos momentos buenos, malos y enriquecedores de la vida que jamás olvidaré.

Esteban Francisco Sánchez Mayorga.

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	15
2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
3.	OBJETIVOS.....	19
4.	MARCO TEÓRICO.....	20
4.2	Hormigón.....	20
4.3	Patologías del hormigón.....	21
4.4	Ataque Químico del Ion Sulfato.....	21
4.1	Sulfatos.....	22
4.2	Fuentes de sulfatos.....	22
4.3	Consecuencias del ataque por sulfatos.....	23
4.4	Categorías y clases de exposición.....	24
4.5	Protección del hormigón contra los ataques por sulfatos.....	25
4.6	Ataque Físico por Sales.....	26
4.1	Esquema de degradación química del hormigón.....	27
4.2	Clasificación SUCS.....	28
4.3	SIG ArcGIS.....	28
4.4	Método de interpolación en SIG, IDW.....	29
5.	METODOLOGÍA.....	30
5.1	Descripción del área de estudio.....	30
5.2	Unidad de análisis.....	31
5.3	Campaña de Muestreo.....	31
5.4	Técnicas de recolección de muestras.....	33

5.5	Método de Análisis e interpretación de las muestras.....	33
5.5.1	Ensayo de Granulometría (INEN-696, 2014), (ASTM C-136, 2015).	33
5.5.2	Concentración de Sulfatos (Tex-145-E, 2005), (ASTM C1580-20, 2020).	34
6.	RESULTADOS	37
6.1	Exploración de Campo.....	37
6.2	Ensayos de Granulometría	40
6.3	Concentración de Sulfatos	42
6.4	Descripción del estado en las estructuras de San Gerardo.....	45
7.	DISCUSIÓN	47
8.	CONCLUSIONES.....	50
9.	RECOMENDACIONES	52
10.	REFERENCIAS	53
11.	ANEXOS	56

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Categorías y Clases de exposición por ataque químico de sulfatos, Norma Ecuatoriana.</i>	24
Tabla 2 <i>Requisitos para proteger al hormigón contra los daños provocados por ataques por sulfatos provenientes de fuentes externas, Norma Americana.</i>	25
Tabla 3 <i>Clases de exposición y valores al ataque químico de sulfatos, Norma Británica.</i> ..	25
Tabla 4 <i>Valores Limites para las clases de exposición de ataques químicos por sulfatos, Norma Alemana.</i>	25
Tabla 5 <i>Requisitos adicionales para hormigones.</i>	26
Tabla 6 <i>Mecanismos de transporte de materia en el hormigón.</i>	27
Tabla 7 <i>Arenas 50% o más de la fracción mayor al tamiz 200 pasa el tamiz 4.</i>	28
Tabla 8 <i>Serie de tamices, ensayo de granulometría.</i>	34
Tabla 9 <i>Coordenadas UTM puntos de extracción de muestras de suelo, Parroquia San Gerardo.</i>	37
Tabla 10 <i>Características de puntos específicos.</i>	39
Tabla 11 <i>Resultados ensayos de clasificación SUCS, Parroquia San Gerardo.</i>	41
Tabla 12 <i>Resultados ensayos de concentración de sulfatos, Parroquia San Gerardo.</i>	42
Tabla 13 <i>Estado de las Fachadas de las viviendas de San Gerardo.</i>	45

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Esquema de ataque al hormigón por sulfatos.</i>	22
Figura 2 <i>Flujo de trabajo.</i>	30
Figura 3 <i>Parroquia de San Gerardo.</i>	31
Figura 4 <i>Grillas 200 x 200 m, Parroquia de San Gerardo.</i>	32
Figura 5 <i>Espectrofotómetro para los ensayos turbidimétricos.</i>	35
Figura 6 <i>Puntos de extracción de muestras de suelo, Parroquia San Gerardo.</i>	38
Figura 7 <i>Puntos 17 y 25 respectivamente.</i>	38
Figura 8 <i>Preparación de tamices previo al ensayo.</i>	40
Figura 9 <i>Muestras de suelo Tamizadas.</i>	42
Figura 10 <i>Concentración de sulfatos según el tipo de Suelo.</i>	44
Figura 11 <i>Concentración de sulfatos con nivel freático.</i>	45
Figura 12 <i>Anexo 1: Mapa de concentración de sulfatos, basados en los Rangos de la norma NEC.</i>	56
Figura 13 <i>Anexo 2: Mapa de concentración de sulfatos, basados en los Rangos de la norma BSI.</i>	57
Figura 14 <i>Vivienda V1, coordenadas WGS84 765111 m E, 9819366 m S.</i>	58
Figura 15 <i>Vivienda V4, coordenadas WGS84 765230 m E, 9819127 m S.</i>	58
Figura 16 <i>Vivienda V6, coordenadas WGS84 764831 m E, 9818876 m S.</i>	59
Figura 17 <i>Vivienda V10, coordenadas WGS84 765679 m E, 9818951 m S.</i>	59
Figura 18 <i>Vivienda V18, coordenadas WGS84 765279 m E, 9818424 m S.</i>	60
Figura 19 <i>Vivienda V20, coordenadas WGS84 765228 m E, 9819309 m S.</i>	60
Figura 20 <i>Vivienda V28, coordenadas WGS8 764688 m E, 9819068 m S.</i>	61
Figura 21 <i>Anexo 4: Vivienda cerca al punto 5 (V5, coordenadas WGS84 765477.00 m E, 9819075.00 m S).</i>	61
Figura 22 <i>Anexo 4: Canal de riego ubicado cerca al punto 5.</i>	62
Figura 23 <i>Anexo 5: Eflorescencia en muro de cerramiento (V14, coordenadas WGS84 765532.31 m E, 9818727.39 m S).</i>	62
Figura 24 <i>Anexo 5: Desprendimiento del Hormigón (V11, coordenadas WGS84 764902.34 m E, 9818681.69 m S).</i>	63
Figura 25 <i>Anexo 6: Desprendimiento de hormigón de la fachada (V12, coordenadas WGS84 765090.01 m E, 9818657.46 m S).</i>	63

Figura 26 Anexo 7: Canal de aguas residuales (Coordenadas WGS84 765310.51 m E, 9818739.16 m S).....	64
Figura 27 Anexo 8: Vivienda con desprendimientos de hormigón de la fachada lateral (V30, coordenadas WGS84 765379.80 m E, 9818762.18 m S).....	64
Figura 28 Anexo 8: Desprendimiento del hormigón de recubrimiento de la columna y exposición del acero de refuerzo (V13, coordenadas WGS84 765264.02 m E, 9818667 m S).	65
Figura 29 Anexo 9: Presencia de partículas de Yeso en la base de la fachada (V11_2, coordenadas WGS84 764921.64 m E, 9818717.03 m S).....	65
Figura 30 Anexo 9: Disgregación de elementos de hormigón y bloque de mampostería (V19, coordenadas WGS84 765630.02 m E, 9818629.98 m S).....	66
Figura 31 Anexo 10: Zonificación por interpolación, Acorde a las concentraciones de Sulfatos Norma NEC.....	67
Figura 32 Anexo 10: Zonificación por interpolación, Acorde a las concentraciones de Sulfatos Norma ACI.....	68
Figura 33 Anexo 10: Zonificación por interpolación, Acorde a las concentraciones de Sulfatos Norma BSI.....	69
Figura 34 Anexo 10: Zonificación por interpolación, Acorde a las concentraciones de Sulfatos Norma DIN.....	70

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue analizar la exposición de las cimentaciones al ataque químico en función de la concentración de sulfatos en el suelo de la parroquia de San Gerardo. Para conseguir este objetivo se analizaron las muestras de suelo extraídas de la zona de estudio, se utilizó el Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS) y ensayos Colorimétricos para determinar el tipo de suelo y las concentraciones de sulfatos existentes en el mismo.

Los resultados de la investigación muestran que San Gerardo está formado por suelos con arenas limosas (SM), arenas mal gradadas (SP), arenas mal gradadas con finos limosos (SP-SM) y turbas (PT). La variabilidad en las concentraciones de sulfatos en el suelo responde a: la presencia de suelos agrícolas con filtraciones de agua de riego, niveles freáticos a poca profundidad y estancamiento del agua con acumulación de materia vegetal y orgánica.

Se zonificó al barrio central de San Gerardo en dos clases de exposición del hormigón al ataque químico de sulfatos según lo expuestos en diferentes normativas, siendo dichas categorías entornos químicos poco y modernamente agresivos a las cimentaciones. Las cimentaciones en estas zonas de exposición constante a sulfatos se encuentran en mal estado, basados en la presencia de humedad, eflorescencia, disgregación del hormigón e inclusive pérdida de continuidad de algunos elementos estructurales, visible en las fachadas de las viviendas. Evidencia de que la exposición al agua subterránea y estancada con concentraciones de sulfatos afectan a la seguridad, funcionalidad y estética de la estructura en general.

Palabras clave: Ataque químico, cimentación, concentración de sulfatos, ensayo colorimétrico, nivel freático.

ABSTRACT

The objective of this study was to analyze the exposure of foundations to chemical attack as a function of sulfate concentration in the soil of St. Gerard Parish. To achieve this objective, soil samples extracted from the study area were analyzed using the Unified Soil Classification System (USCS) and Colorimetric tests to determine the type of soil and the sulfate concentrations in the soil.

The results of the investigation show that San Gerardo is formed by soils with silty sands (SS), poorly graded sands (SP), poorly graded sands with silty fines (SP-SM) and peat (PT). The variability in sulfate concentrations in the soil responds to: the presence of agricultural soils with irrigation water seepage, shallow water tables and water stagnation with accumulation of plant and organic matter.

The central neighborhood of San Gerardo was zoned into two classes of exposure of concrete to sulfate chemical attack according to different regulations, these categories being chemical environments that are slightly and moderately aggressive to foundations. The foundations in these areas of constant exposure to sulfates are in poor condition, based on the presence of moisture, efflorescence, disintegration of the concrete and even loss of continuity of some structural elements, visible on the facades of the houses. Evidence that exposure to groundwater and stagnant water with sulfate concentrations affect the safety, functionality, and aesthetics of the structure in general.

Key words: Chemical attack, foundation, sulfate concentration, colorimetric test, water table.



Elaborado electrónicamente por:
**DIANA CAROLINA
CHAVEZ GUZMAN**

Reviewed by:

Lcda. Diana Chávez

English Professor.

c.c. 065003795-5

1. INTRODUCCIÓN

La parroquia de San Gerardo ubicada al sur del cantón Guano, a 2 kilómetros de la ciudad de Riobamba, privilegiada por sus paisajes y fuentes de agua, tiene un área de 7.12 km² delimitada al norte por la quebrada las Abras, al sur la carretera Riobamba Cubijíes, al este por el río Guano y al oeste por la loma denominada Alarcón. La cobertura del suelo en la zona urbana destinado para asentamientos humanos es de 15 ha; los suelos de la parroquia San Gerardo son suelos poco profundos que varía entre arenoso y arena fina, con salinidad que aflora a la superficie por acarreo de la capa freática que se halla a poca profundidad (GAD Parroquial de San Gerardo, 2015).

Al ser un poblado en crecimiento la construcción de nuevas viviendas y demás edificios es necesario, todas estas nuevas estructuras necesitan una subestructura o cimentación que está ubicada por lo general debajo de la superficie del terreno para transmitir las cargas de la estructura al suelo (Nilson, 2006). A pesar de que existen varios materiales para construir cimentaciones el material más común y resistente es el hormigón.

Al hormigón se lo relaciona con un material de gran resistencia, toda obra realizada con este material tiene el objetivo de cumplir con los criterios de diseño que establecen las normas una de ellas, la vida útil y la durabilidad del material. En este caso se analizan las medidas preventivas ante agentes abrasivos que pueden afectar a las propiedades del hormigón y de las futuras edificaciones.

El hormigón, aunque se considera un material macizo, dependiendo de su diseño y puesta en obra puede tener ciertas fallas generando poros en su estructura, lo que le vuelve vulnerable a varios factores externos que pueden llevar a un desgaste prematuro del mismo. Un ejemplo es el ataque químico por sulfatos (Liao et al., 2020), los iones de sulfato pueden estar presentes en gran variedad disueltos en agua subterráneas como en el suelo producto

de la de la reacción química de una base y del ácido sulfúrico, lo que deja expuesto al hormigón que se encuentran en ambientes húmedos, enterrados (cimentaciones), sumergidos o ubicados cerca al agua del mar.

Existen diversos estudios realizados que han demostrado que la presencia de sulfatos puede llevar a una degradación severa de las cimentaciones, el ingreso de aguas sulfatadas y su posterior evaporación deposita los iones de sulfato en los espacios porosos del hormigón; los efectos empeoran si existen ciclos de mojado y secados recurrentes (Traversa & Villagrán-Zaccardi, 2010). Dicho proceso conlleva a la formación de etringita y yeso que son minerales producto de la reacción química de los sulfatos con el aluminato de calcio y el hidróxido de calcio respectivamente, dichos elementos constituyen la pasta de cemento.

Ensayos realizados en varios estudios detectaron cantidades de yeso cerca de etringita, ubicados entre la pasta cemento y los agregados (J. M. Tulliani et al., 2002) provocando esfuerzos de tensión dentro de los elementos de concreto, generando fisuras que comprometen la forma y resistencia inicial del mismo.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A partir de una exploración visual de la Parroquia San Gerardo específicamente la parte del barrio central, se puede verificar ciertas afectaciones en la base de las fachadas de las construcciones como: humedad, eflorescencia, disgregación del material, desprendimiento excesivo del recubrimiento de hormigón y como resultado la exposición del acero de refuerzo. Por lo que despierta la curiosidad de descubrir los motivos de la problemática.

En la parroquia de San Gerardo estudios de suelos realizados arrojan que la estratigrafía del lugar se encuentra conformada por suelos de arena gruesa y fina, con presencia de sales y un nivel freático a poca profundidad (GAD Parroquial de San Gerardo, 2015). Por lo que se busca verificar si la principal razón del estado de las fachadas de las viviendas se debe a un ataque de minerales disueltos en el agua.

Los sulfatos solubles en el suelo o a su vez disueltos en el agua representan un riesgo a la integridad del concreto, estos minerales al estar en contacto con el hidróxido de calcio (cal hidratada) reaccionan y se produce el sulfato de calcio (yeso), el cual reacciona con aluminato de calcio hidratado generando el sulfoaluminato de calcio (etringita). Estos componentes de mayor volumen generan expansiones y rupturas del concreto (Jiang et al., 2021). Estos nuevos esfuerzos en el material afectan directamente a la resistencia de la estructura, la serviciabilidad de la misma en sí y a la seguridad de sus ocupantes.

Las cimentaciones al ser una parte importante de las estructuras deben brindar seguridad y resistencia, a pesar de estar expuesta a condiciones externas que afectaran su integridad, composición y comportamiento. Debido a que la presencia de sulfatos en reacción con algunos componentes químicos del cemento, tienen un comportamiento

expansivo generando microfisuras afectando a la propiedad principal física que es la resistencia.

3. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

Analizar la exposición de las cimentaciones al ataque químico en función de la concentración del SO_4 en el suelo de la parroquia de San Gerardo.

1.2. Objetivos Específicos

- Clasificar el suelo de la parroquia San Gerardo según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).
- Medir la concentración de SO_4 (sulfatos) en el suelo de la parroquia de San Gerardo mediante ensayos de laboratorio.
- Realizar una zonificación de la exposición de las cimentaciones al ataque químico por la concentración de SO_4 en la parroquia San Gerardo.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Cimentaciones

Las cimentaciones o subestructuras son parte de una estructura ubicadas por lo general debajo de la superficie del terreno. Están encargadas de transmitir las cargas al suelo o roca sobre el que se encuentra, las cargas aplicadas comprimen el suelo causando asentamientos en la estructura soportada.

Las cimentaciones deben cumplir con dos requisitos esenciales en su diseño que son: que el asentamiento total de la estructura este limitada a una cantidad tolerablemente pequeña y que el asentamiento diferencial de las distintas partes de la estructura se elimine (Alva, 2011).

Para que una cimentación cumpla con su función y brinde seguridad es necesario limitar los asentamientos, lo que indica que se debe transmitir la carga de la estructura a un estrato de suelo con la resistencia suficiente y distribuir la carga sobre un área lo suficientemente grande para minimizar las presiones de contacto. Si este suelo se encuentra debajo la estructura se puede distribuir las cargas usando cimentaciones superficiales como zapatas aisladas u otras, si no es el caso se puede recurrir a cimentaciones profundas como pilas o pilotes para transmitir la carga a estratos más profundos y firmes (Nilson, 2006).

4.2 Hormigón

El hormigón el material más usado en las construcciones civiles, es muy versátil que se lo emplea desde pequeñas casas a vías, edificios, hidroeléctricas y demás construcciones que necesitan durabilidad y resistencia.

Es un material creado principalmente por una mezcla de proporciones adecuadas de cemento, agua y diferentes agregados pétreos para garantizar su calidad y trabajabilidad.

El cemento es un aglomerante, que reacciona al mezclarse con agua y a su vez se le puede añadir arena y grava para formar una masa compacta, que adquiere nuevas características físicas y mecánicas durante todo este proceso de fraguado.

4.3 Patologías del hormigón

Para las obras civiles el hormigón armado es una de las mejores técnicas para construir cualquier tipo de estructura. La mezcla hormigón y acero de refuerzo pueden tener un comportamiento diferente al esperado, si alguno de estos dos materiales entra en contacto con algún agente externo que afecte a su composición. Dicha exposición puede generar una patología que reducirá la vida útil del material, entre las patologías más comunes que puede afectar al hormigón armado tenemos:

- Fisuras en el hormigón
- La carbonatación
- El aluminosis
- Ataque del ion sulfato
- Reacción árido-álcali

4.4 Ataque Químico del Ion Sulfato

El ataque de los sulfatos al hormigón se presenta cuando cantidades relativamente altas de sulfatos disueltos en el agua entran en contacto con la pasta cemento. La reacción que se produce genera productos expansivos dentro del material generando fisuras, desprendimientos y desintegración del hormigón.

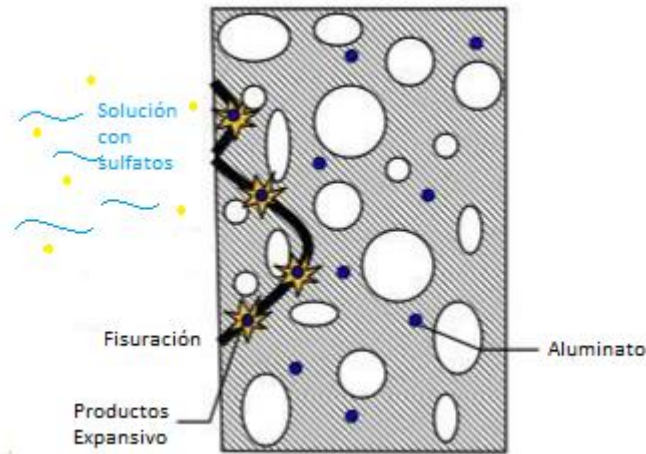


Figura 1 Esquema de ataque al hormigón por sulfatos.

Fuente: (Traversa & Villagrán-Zaccardi, 2010).

4.1 Sulfatos

Los sulfatos son sales producto de la reacción química de una base y del ácido sulfúrico (H_2SO_4). Están formados por un anión (ion de carga negativa) y un catión (ion de carga positiva), el anión comúnmente posee un átomo de azufre y cuatro átomos de oxígeno (SO_4) y según el tipo de catión se puede obtener gran variedad de sulfatos.

Los sulfatos pueden estar presentes en gran variedad en el suelo, aguas subterráneas, aguas superficiales y aguas del mar.

4.2 Fuentes de sulfatos

Los sulfatos se encuentran en suelos orgánicos, suelos con turbas, con aguas freáticas y algunos suelos arcillosos, producto de la descomposición del mismo material orgánico. Las sales sulfatadas más comunes pueden ser el sulfato de amonio, sulfato de calcio, sulfato de magnesio y sulfato de sodio.

Otras fuentes con sulfatos es el agua de mar, que contienen componentes que son más agresivos con el concreto, entre las sales disueltas más comunes en el agua de mar están, cloruro de sodio, cloruro de magnesio y sulfato de calcio.

Los asentamientos humanos producen aguas residuales con concentraciones de sulfatos, que, al no tener un adecuado tratamiento o transporte, puede filtrarse en el suelo lo que produce amenazas de sulfatos a las cimentaciones de viviendas cercanas (Tulliani et al., 2002).

4.3 Consecuencias del ataque por sulfatos

El ataque por sulfatos es más probable en el caso de hormigones porosos, el ingreso de aguas sulfatadas y su posterior evaporación deposita los iones de sulfato en dichos espacios, los efectos empeoran si existen ciclos de mojado y secados recurrentes. El aumento del volumen de los cristales pueden llegar a colmar los espacios porosos del hormigón y produce esfuerzos que pueden desintegrar la masa del material (Traversa & Villagrán-Zaccardi, 2010).

- Formación de Etringita

La reacción del sulfato de calcio con el aluminato de calcio hidratado formando sulfato aluminato de calcio trisulfato 32-hidratado ($\text{CAO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) o etringita, puede generar un aumento de volumen sólido, provocando expansión, fisuración y ablandamiento del hormigón (Pire, 2013).

- Formación de Yeso

El sulfato al entrar en contacto con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento produce sulfatos de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) lo que provoca ablandamiento y pérdida de resistencia del hormigón (Pire, 2013). Sin embargo, la presencia de etringita o yeso en el hormigón no constituye por sí misma un indicador de ataque de sulfatos, se necesita verificarlo mediante análisis químicos y petrográficos.

4.4 Categorías y clases de exposición

La exposición por sulfatos puede manifestarse en diferentes formas dependiendo del ambiente al que se expone los elementos de hormigón, la pasta cemento al entrar en contacto con los sulfatos produce más etringita y yeso que reduce la resistencia del material (Xu et al., 2020).

Las normativas ACI (American Concrete Institute), NEC (Norma Ecuatoriana de Construcción), DIN (Deustcher Industrie Normen), BSI (British Standards Institution), establecen niveles de exposición relacionados a la concentración de sulfatos medida en ppm, (partes por millón), % de masa, que se clasifica desde un nivel despreciable a un nivel muy severo (Jiménez & Lozano, 2018). El conocer el nivel de exposición del hormigón al ataque por sulfatos ayudaría a tomar decisiones para proteger la estructura o en el diseño del mismo hormigón con las recomendaciones que nos dan las normativas mencionadas.

Cabe mencionar que las normativas nos dan las concentraciones de sulfatos en unidades de mg/l para el caso de sulfatos en el agua o en mg/kg para suelos (BSI, 2013), sin embargo todas estas unidades hablan de concentraciones, por ejemplo 1 ppm equivale a 1 mg/l de la misma manera 1 ppm es igual a 1 mg/kg, en el caso de querer transformar a porcentajes de masa 1 % de la masa es igual a 10000 ppm.

Tabla 1 Categorías y Clases de exposición por ataque químico de sulfatos, Norma Ecuatoriana.

Categorías	Severidad	Clase	Condición	
			Sulfatos solubles en agua (SO ₄) en el suelo, % en masa	Sulfato (SO ₄) disuelto en agua, ppm
S Sulfato	No aplicable	S0	SO ₄ ≤ 0.1	SO ₄ < 150
	Moderada	S1	0.1 ≤ SO ₄ < 0.2	150 ≤ SO ₄ < 1500
	Severa	S2	0.2 ≤ SO ₄ < 2.0	1500 ≤ SO ₄ ≤ 10000
	Muy severa	S3	SO ₄ > 2.0	SO ₄ > 10000

Fuente: (NEC-SE-HM, 2015).

Tabla 2 Requisitos para proteger al hormigón contra los daños provocados por ataques por sulfatos provenientes de fuentes externas, Norma Americana.

Severidad de la potencial exposición	Sulfato soluble en agua (SO ₄)	Sulfatos (SO ₄) en agua, ppm	a/c en masa, máx.
Exposición Clase 0	0.00 a 0.10	0 a 150	Ningún requisito especial para resistencia a sulfatos
Exposición Clase 1	>0.10 y <0.20	>150 a <1500	0.5
Exposición Clase 2	0.2 a < 0.2	1500 a <10000	0.45
Exposición Clase 3	≥0.2	≥10000	0.4
Exposición al agua de mar	-	-	Ver sección 2.4, ACI 201

Fuente: (ACI 201, 2012).

Tabla 3 Clases de exposición y valores al ataque químico de sulfatos, Norma Británica.

Características químicas	Método de referencia	Entorno químico Ligeramente agresivo	Entorno químico Moderadamente agresivo	Entorno químico Altamente agresivo
Agua subterránea				
SO ₄ mg/l	EN 196-2	≥200 y ≤600	>600 y ≤3000	>3000 y ≤6000
Suelo				
SO ₄ mg/kg	EN 196-2	≥2000 y ≤3000	>3000 y ≤12000	>12000 y ≤24000

Fuente: (BSI, 2013).

Tabla 4 Valores Límites para las clases de exposición de ataques químicos por sulfatos, Norma Alemana.

Características químicas	Método de referencia	XA1	XA2	XA3
Agua subterránea				
SO ₄ mg/l	DIN EN 196-2	≥200 y ≤600	>600 y ≤3000	>3000 y ≤6000
Suelo				
SO ₄ mg/kg	DIN EN 196-2	≥2000 y ≤3000	>3000 y ≤12000	>12000 y ≤24000

Nota: XA1 Entorno químico Ligeramente agresivo, XA2 Entorno químico Moderadamente agresivo, XA3 Entorno químico Altamente agresivo.

Fuente:(DIN 4030-1, 2008).

Para evaluar la severidad de la exposición del hormigón a los sulfatos se debe tomar muestras del agua o del suelo que podría ser lixiviado por el agua que se desplaza hacia el hormigón y someterlos a ensayos a para conocer sus valores de concentración.

4.5 Protección del hormigón contra los ataques por sulfatos

Para brindar la protección del hormigón contra ataques de sulfatos se debe prestar especial atención al momento de su diseño al igual que su puesta en obra.

La protección del hormigón contra estos ataques se puede obtener considerando estas recomendaciones:

- Diseño de hormigones impermeables, bajando la relación a/c, Tabla 5.
- Uso de cementos con un contenido bajo de aluminato tricálcico.
- Colocar, compactar, acabar y curar el hormigón adecuadamente.

Tabla 5 Requisitos adicionales para hormigones.

Clase de exposición	Relación a/c máx.	f'c min. MPa	Requisitos mínimos adicionales			
			Contenido de aire	Tipo de Cemento		
			NTE INEN 152 (ASTM C 150)	NTE INEN 490 (ASTM C 595)	NTE INEN 2380 (ASTM C 1157)	Aditivo cloruro de calcio
S0	N/A	17	Sin restricción en el tipo	Sin restricción en el tipo	Sin restricción en el tipo	Sin restricción
S1	0.5	28	II	IP (MS), IS (<70) (MS)	MS	Sin restricción
S2	0.45	31	V	IP (MS), IS (<70) (HS)	MS	No se permite
S3	0.45	31	V puzolanas o escorias	IP (HS) y puzolanas o escorias o IS (<70) (HS) y puzolanas o escorias	HS y puzolanas o escorias	No se permite

Fuente: (NEC-SE-HM, 2015).

4.6 Ataque Físico por Sales

El daño ocurre típicamente en superficies expuestas de hormigón húmedo con suelos que tienen concentraciones de sales como sulfato de sodio o magnesio originados por aguas subterráneas; el daño del hormigón aparece en forma de escamas superficiales similares a las producidas por ciclos de congelación y deshielo; la exposición continua a cambios de

temperatura o humedad pueden llevar a una desintegración del hormigón de baja calidad (ACI 201, 2012).

Para proteger el hormigón de este ataque no es necesario el uso de aditivos o de un cemento en específico; lo que se debe procurar es minimizar el movimiento del agua dentro del hormigón lo que se puede obtener reduciendo la relación a/c a 0.45 con una puzolana (Haynes et al., 1996). Para reducir problemas de humedad se recomienda el uso de drenajes de agua apartados del hormigón.

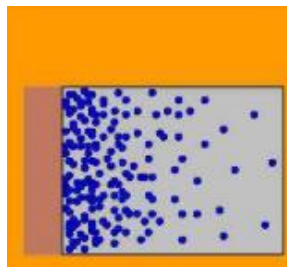
4.1 Esquema de degradación química del hormigón

El proceso de degradación química del hormigón sucede en dos fases que son iniciación y propagación, una depende de la estructura interna del hormigón, cantidad de poros, conectividad entre los mismos y su diámetro, es una fase relativamente lenta hasta que la sustancia ajena se disperse dentro del material; la otra produce reacciones que alteran la seguridad, funcionalidad y estética de la estructura, deteriorando la resistencia y durabilidad del material, respectivamente (Traversa & Villagrán-Zaccardi, 2010).

Tabla 6 Mecanismos de transporte de materia en el hormigón.

Mecanismo de transporte y circulación	Imagen	Descripción
Capilaridad		Transporte inducido por la energía (tensión superficial) del agua actuando sobre los capilares del hormigón
Permeabilidad		Fluidos sometidos a una presión

Difusión



Diferencia de concentraciones

Fuente: (Traversa & Villagrán-Zaccardi, 2010).

4.2 Clasificación SUCS

Este método denominado “Sistema Unificado de Clasificación de Suelos”, mediante el cual se clasifica para los mismos basados en ensayos de laboratorio para determinar el tamaño de sus partículas, límite líquido e índice plástico.

Turba (PT): Suelo con abundante material orgánico o entretrejido vegetal, que presenta un color (marrón oscuro o negro), olor característico, de consistencia esponjosa y textura variable.

Arena (S): Partículas pasantes del tamiz 4.75 mm (N°4) y retenidas en el tamiz 75µm (N°200).

Tabla 7 Arenas 50% o más de la fracción mayor al tamiz 200 pasa el tamiz 4.

Descripción General	Símbolo	Denominación
Arena con menos del 5% de finos	SP	Arena mal gradada
Arena con 5% - 12% de finos limosos	SP-SM	Arena mal gradada con finos limosos
Arena con más de 12% de finos	SM	Arena Limosa

Fuente: (ASTM D2487, 2011).

4.3 SIG ArcGIS

Un SIG (Sistema de información geográfica) es un sistema usa para categorizar y describir la Tierra u otras geografías con el fin de analizar y publicar información referenciada espacialmente. Permite crear, compartir y aplicar mapas con información geográfica pertinente (Puerta et al., 2011).

4.4 Método de interpolación en SIG, IDW.

La interpolación predice valores para celdas que se desconoce su valor a través de una cantidad limitada de puntos de los cuales se tiene valores. Se usa para predecir valores de cualquier punto geográfico.

La herramienta IDW (Ponderación de distancia inversa) interpola los datos mediante un método que estima los valores de las celdas calculando promedios de los valores de los puntos de datos de muestra contiguos a cada celda de procesamiento. Cuanto más cerca está un punto del centro de la celda que se está estimando, más influencia o peso tendrá en el proceso de cálculo del promedio (Puerta et al., 2011).

5. METODOLOGÍA

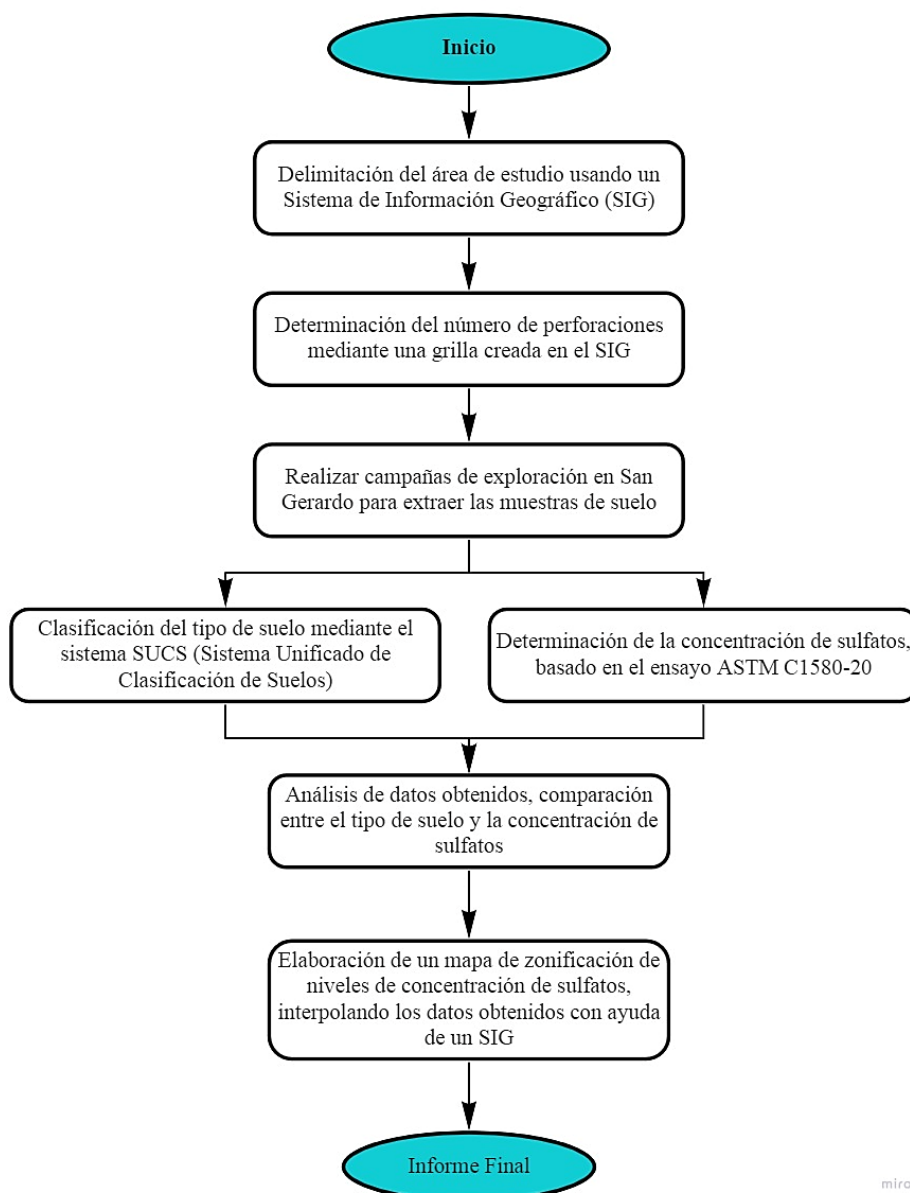


Figura 2 Flujo de trabajo.

Fuente: Esteban Sánchez.

5.1 Descripción del área de estudio

Se detalla el área de estudio del proyecto de investigación “Análisis de la exposición de cimentaciones al ataque químico por sulfatos en el suelo de la parroquia San Gerardo, Riobamba”. Con la bibliografía recopilada, la información dada por el GAD de San Gerardo se detalla que el área de toda la parroquia es de 7.12 Km² (GAD Parroquial de San Gerardo, 2015).

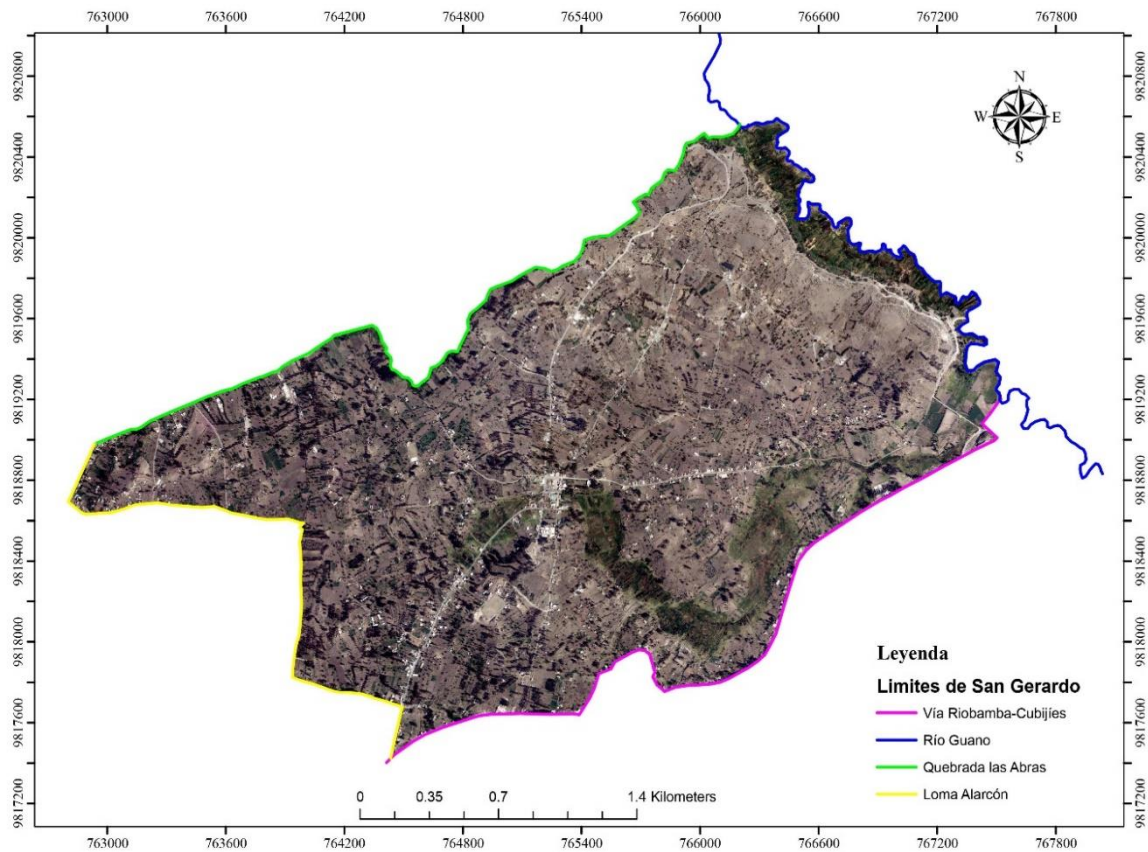


Figura 3 Parroquia de San Gerardo.

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

5.2 Unidad de análisis

Se considera la cabecera parroquial por lo que existe una mayor concentración de viviendas, es por esto que esta zona se considera como la de mayor probabilidad de desarrollo urbanístico, es decir, existe la posibilidad de que los ciudadanos construyan su vivienda cerca a la cabecera parroquial, la que posee 71.24 Hectáreas (GAD Parroquial de San Gerardo, 2015)

5.3 Campaña de Muestreo

La participación geotécnica debe ocurrir durante la vida del proyecto. La entrada varía en función de la fase del proyecto, asimismo, la fase de la investigación proporciona el beneficio de una mejor calidad y relevancia de los datos geotécnicos para el proyecto (Look, 2013).

Se considera un estudio de viabilidad (IAS) para determinar la participación geotécnica, como nos menciona Look en su libro “Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables” *table 1.4 Suggested test spacing*, en la cual se estima un espacio aproximado de 200 m de separación entre cada perforación realizada.

De esta manera se presenta la muestra correspondiente a la Cabecera parroquial de San Gerardo:

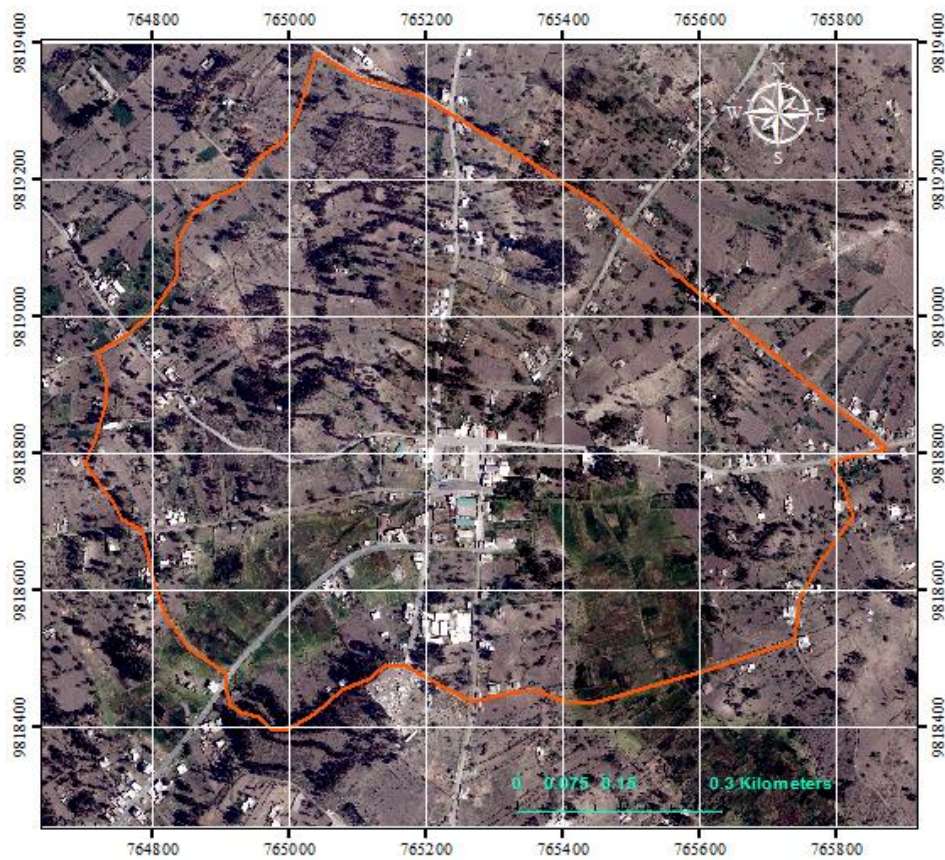


Figura 4 Grillas 200 x 200 m, Parroquia de San Gerardo.

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

De igual manera para el cálculo de la muestra de investigación se considera el valor establecido en la tabla *1.4 Suggested test spacing* en el cual se determina las perforaciones por hectárea, siendo un valor de 0.2 perforaciones por hectárea.

$$\begin{aligned}
 \text{Muestra} &= 0.2 * \text{hectárea} \\
 \text{Muestra} &= 0.2 * 71.24 = 14.25 \\
 \text{N}^\circ \text{ Muestra} &\approx 15
 \end{aligned}$$

En una primera exploración de campo se verificó que el perímetro de la urbe estaba en crecimiento, por ello basado en un criterio ingenieril se decidió duplicar el número de muestras para validar los datos obtenidos. Finalmente se extrajo 30 muestras de suelo que se ensayaron y posteriormente, se analizaron en los diferentes laboratorios.

5.4 Técnicas de recolección de muestras

La recolección de datos se realizará mediante campañas exploratorias en la zona de estudio, se usarán barrenas tipo “Regular barrel auger”(barrena de cilindro hueco) basados en las especificaciones ASTM D1452 M-16(ASTM D1452M-16, 2021), cada perforación llegara a una profundidad de 1.5m.

Mediante el formato de la norma mencionada anteriormente se procedió a completar los datos de: codificación de muestras, coordenadas de la perforación, número de perforación, niveles de perforación según la estratigrafía, características del suelo, descripción del lugar, clima.

Se procede a clasificar las muestras para realizar dos ensayos: Clasificación SUCS y Concentración de sulfatos, mediante la codificación de estas, basados en: tipo de estrato y profundidad.

5.5 Método de Análisis e interpretación de las muestras

5.5.1 Ensayo de Granulometría (INEN-696, 2014), (ASTM C-136, 2015).

Una vez obtenidas las muestras de suelo, se ensayaron en los laboratorios para determinar su tipo acorde el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), basados en la norma ASTM C136. Haciendo ensayos granulométricos para conocer el tipo de suelo de cada muestra se siguió los pasos detallados a continuación:

- De las muestras obtenidas se toma una porción aproximada a 5000 gramos de los cuales se cuartarán manualmente y lavara para retirar cualquier materia orgánica existente.
- Este material será secado a una temperatura de 110°C +/- 5°C, por 24 horas.
- Seleccionar la serie de tamices a ser utilizados como indica la correspondiente norma, estos deberán encontrarse totalmente libres de impurezas o residuos de ensayos anteriores.

Tabla 8 Serie de tamices, ensayo de granulometría.

Tamices	Tamaño de Abertura (mm)
1 1/2"	38.100
1"	25.400
3/4"	19.100
3/8"	9.5200
4	4.760
10	1.190
40	0.297
200	0.074

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

- El suelo seco se coloca en la serie de tamices ordenados de forma decreciente como se muestra en la Tabla 8. el tamizado del suelo se llevara según lo recomendado en la norma (INEN-696, 2014).
- Se pesa la masa retenida en cada uno de los tamices, al finalizar se realiza una sumatoria de todo el material y este no debe ser menor en 1% al peso total inicial de la muestra seca.
- Se describe cada muestra con el método denominado “Sistema Unificado de Clasificación de Suelos” basado en la norma INV E-181-13.

5.5.2 Concentración de Sulfatos (Tex-145-E, 2005), (ASTM C1580-20, 2020).

Para determinar la concentración de sulfatos en cada una de las muestras de suelo obtenidas se aplicó el ensayo de laboratorio basado en la norma ASTM C1580-20. Cada paso seguido se lo detalla a continuación:

- De las muestras obtenidas se toma una porción aproximada a 500 gramos.
 - Este material será secado a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, por 24 horas.
 - El material seco se muele y tamiza por una malla de 0.5mm de abertura.
- Se separa 10 gramos de la muestra seca pasante del tamiz, en una balanza analítica (legibilidad $d=0.1\text{mg}$).
- Se añade 40 ml de agua destilada, diluida con ácido nítrico (HNO_3) al 3%, esta mezcla se agitará por una hora a 25°C .
 - Se deja reposar la mezcla para que decante por 30 minutos, transcurrido el tiempo se filtra la mezcla con ayuda de un embudo de cristal y un papel de filtro un matraz Erlenmeyer.
 - La solución filtrada se coloca en dos celdas de vidrio de 10 ml para medir la concentración de sulfatos en el espectrofotómetro.
 - Encendemos el espectrofotómetro para usar a 450 nm con un paso de luz de 4 a 5 cm. Figura 5.

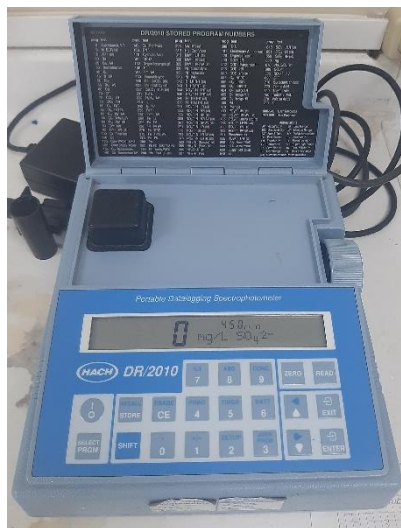


Figura 5 Espectrofotómetro para los ensayos turbidimétricos.

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

- En una de las celdas se añade un reactivo en base de cloruro de bario BaCl_2 , se agita la solución y se empieza cronometrar 5 ± 0.5 minutos,

- Se coloca primero una de las celdas sin el reactivo en el espectrofotómetro para poder encerrar el aparato.
- Después se coloca la celda con la solución de cloruro de bario en el espectrofotómetro que mide la turbidez que genera las partículas del sulfato de bario BaSO_4 y la registra.

6. RESULTADOS

6.1 Exploración de Campo

En la tabla 9 se presenta las coordenadas de los puntos obtenidos para posteriormente llevar a analizar en los respectivos laboratorios las muestras extraídas. En el mapa se puede identificar perforaciones que tuvieron una profundidad de 0.55 – 1.50 m, los mismos que fueron desarrollados con ayuda del software ArcMap. Ver figura 6.

Tabla 9 *Coordenadas UTM puntos de extracción de muestras de suelo, Parroquia San Gerardo.*

Punto	Elevación m.s.n.m.	Coordenadas UTM	
		Este	Norte
1	2707	765088	9819326
2	2722	764919	9819072
3	2704	765104	9819093
4	2691	765332	9819075
5	2665	765506	9819097
6	2723	764943	9818832
7	2698	765109	9818893
8*	2665	765312	9818858
9	2665	765585	9818833
10	2651	765766	9818858
11*	2681	764940	9818658
12*	2671	765183	9818722
13	2661	765318	9818681
14**	2649	765531	9818668
15	2651	765788	9818692
16	2682	764933	9818450
17***	2680	765124	9818497
18	2668	765319	9818474
19**	2649	765532	9818466
20	2689	765329	9819297
21	2727	764734	9818882
22	2698	764731	9818671
23*	2693	764707	9818460
24	2694	764792	9818279
25***	2706	764955	9818314
26	2655	765697	9818501
27	2646	765836	9818633
28	2724	764718	9819073
29	2721	764930	9819252
30*	2661	765379	9818788

Nota: * Puntos con nivel freático, profundidad 0.55-1.5m.; ** Puntos con nivel freático a nivel del suelo natural; *** Puntos de los que no se pudo obtener muestras de suelo.

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

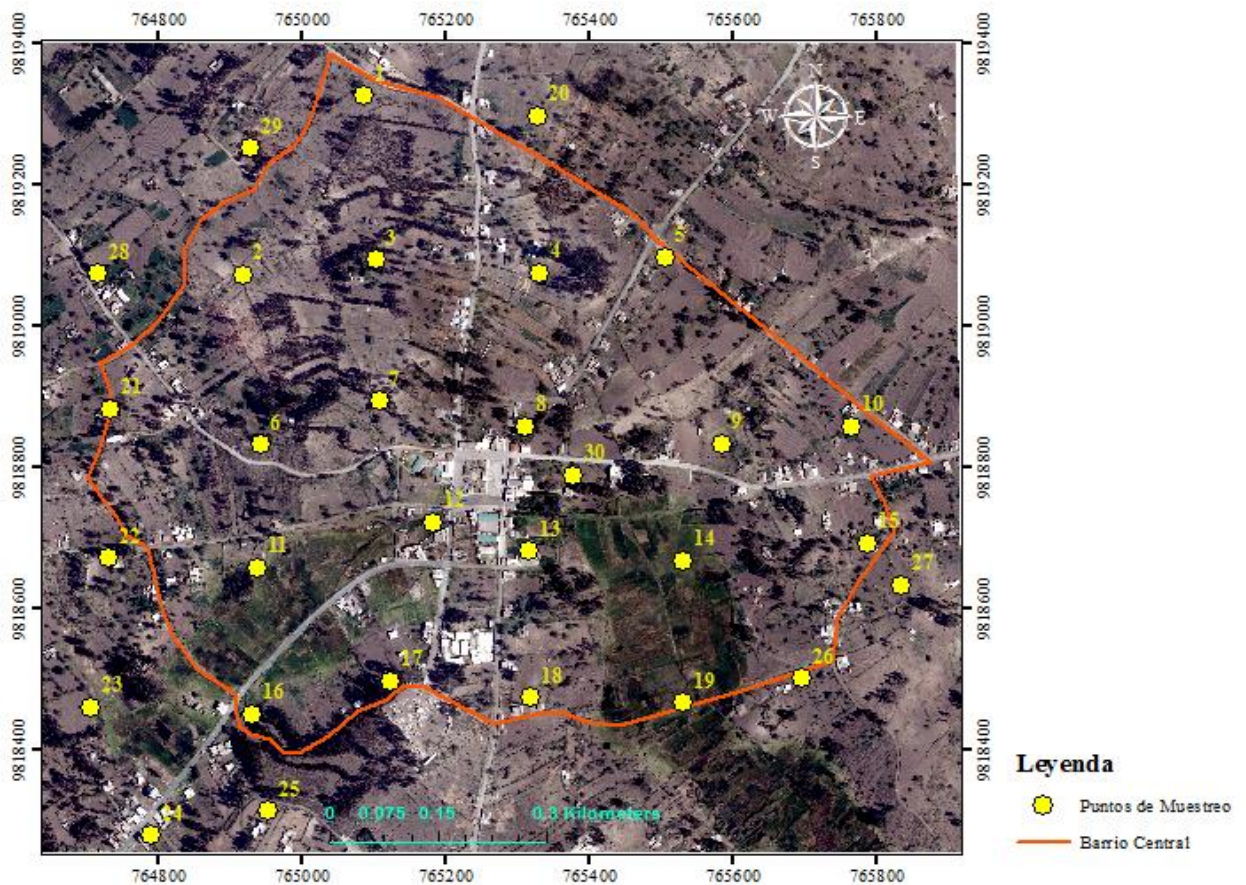


Figura 6 Puntos de extracción de muestras de suelo, Parroquia San Gerardo.

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.






Concluida la campaña de exploración en los puntos 17 y 25 no se pudo obtener una muestra representativa para los ensayos de laboratorio ya que el tipo de suelo que se encuentra en estos lugares son materiales pétreos destinados para minas, por lo tanto, el método de extracción de las muestras no es el adecuado para estos dos puntos.



Figura 7 Puntos 17 y 25 respectivamente.

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

Tabla 10 Características de puntos específicos.

Puntos	Nivel Freático (m)	Observación
8	0.90	
11	0.60	
12	0.60	
14 *	0.00	
19 **	0.00	

23

0.55



30

1.5



Nota: * Suelo totalmente saturado; **Suelo totalmente saturado se puede extraer solo una muestra de suelo.

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

6.2 Ensayos de Granulometría

Al realizar el análisis de las muestras de suelo del barrio central se obtienen cuatro tipos de suelos según la clasificación SUCS: SM (arena limosa), SP (arena mal gradada), SP-SM (Arena mal grada con finos limosos) y P_t (Turba), como se detalla a continuación en la tabla 11 (ASTM D2487, 2011).



Figura 8 Preparación de tamices previo al ensayo.

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

Tabla 11 Resultados ensayos de clasificación SUCS, Parroquia San Gerardo.

N° de muestra	%Pasante tamiz n°4	%Pasante tamiz n°200	Índice plástico (IP)	Símbolo del grupo	Tipo de suelo
1	99.77	23.64	NP	SM	Arena limosa
2	99.35	15.87	NP	SM	Arena limosa
3	99.97	9.97	NP	SP-SM	Arena mal gradada con finos limosos
4	98.44	7.94	NP	SP-SM	Arena mal gradada con finos limosos
5	99.85	18.73	NP	SM	Arena limosa
6	100	4.27	NP	SP	Arena mal gradada
7	99.32	16.64	NP	SM	Arena limosa
8	99.62	5.88	NP	SP-SM	Arena mal gradada con finos limosos
9	99.43	23.05	NP	SM	Arena limosa
10	99.74	25.57	NP	SM	Arena limosa
11	99.37	23.8	NP	SM	Arena limosa
12	99.87	11.24	NP	SP-SM	Arena mal gradada con finos limosos
13	99.57	17.44	NP	SM	Arena limosa
14	98.34	11.15	NP	PT	Turba
15	99.84	14.87	NP	SM	Arena limosa
16	99.68	18.87	NP	SM	Arena limosa
17	Sin Datos				
18	99.69	19.31	NP	SM	Arena limosa
19	Sin Datos			PT	Turba
20	99.77	23.14	NP	SM	Arena limosa
21	99.77	23.14	NP	SM	Arena limosa
22	99.18	25.52	NP	SM	Arena limosa
23	96.86	4.01	NP	SP	Arena mal gradada
24	100	16.04	NP	SM	Arena limosa
25	Sin Datos				
26	99.78	24.06	NP	SM	Arena limosa
27	99.44	20.12	NP	SM	Arena limosa
28	100	13.52	NP	SM	Arena limosa
29	83.14	11.64	NP	SP-SM	Arena mal grada con finos limosos
30	99.77	23.14	NP	SM	Arena limosa

Nota: NP (No Plástico).

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

Del total de las muestras 19 son Arenas limosas, 2 Arenas mal gradadas, 5 Arenas mal gradadas con finos limosos y 2 son turbas, cabe aclarar que se añade al punto 19 en la clasificación que cumple con las características físicas de un suelo tipo turba. En los puntos 17 y 25 el suelo a poca profundidad se encontró grava por lo que el método de recolección usando barrenas no era el adecuado para este tipo de suelo.



Figura 9 Muestras de suelo Tamizadas.

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

6.3 Concentración de Sulfatos

Se analizaron las muestras de suelo extraídas de la parroquia de San Gerardo, excepto del punto 17 y 25 ya que el suelo al ser muy duro no se pudo extraer una muestra representativa para este tipo de ensayo. Se obtuvieron dos categorías y clases de exposición del hormigón a los sulfatos acorde a los valores de la normativa (NEC-SE-HM, 2015).

Adicionalmente, se realizó una tabla comparativa a partir de los valores de la norma antes mencionados y la normativa Británica (BSI, 2013).

Tabla 12 Resultados ensayos de concentración de sulfatos, Parroquia San Gerardo.

Punto	Concentración total de sulfatos mg/kg	Concentración de sulfatos ppm	NEC (Norma Ecuatoriana de la Construcción)	ACI (American Concrete Institute)	BSI (British Standards Institution)	DIN (Deutsches Institut für Normung)
1	40	40	No aplicable	No aplicable	No considerado	No considerado
2	0	0	No aplicable	No aplicable	No considerado	No considerado
3	20	20	No aplicable	No aplicable	No considerado	No considerado
4	0	0	No aplicable	No aplicable	No considerado	No considerado
5	290	290	Moderado	Moderado	E.Q. Poco agresivo	E.Q. Poco agresivo
6	40	40	No aplicable	No aplicable	No considerado	No considerado
7	5	5	No aplicable	No aplicable	No considerado	No considerado
8	60	60	No aplicable	No aplicable	No considerado	No considerado
9	0	0	No aplicable	No aplicable	No considerado	No considerado
10	10	10	No aplicable	No aplicable	No considerado	No considerado
11	260	260	Moderado	Moderado	E.Q. Poco agresivo	E.Q. Poco agresivo
12	125	125	No aplicable	No aplicable	No considerado	No considerado

13	300	300	Moderado	Moderado	E.Q. Poco agresivo	E.Q. Poco agresivo
14	215	215	Moderado	Moderado	E.Q. Poco agresivo	E.Q. Poco agresivo
15	25	25	No aplicable	No aplicable	No considerado	No considerado
16	85	85	No aplicable	No aplicable	No considerado	No considerado
17	Sin Datos					
18	5	5	No aplicable	No aplicable	No considerado	No considerado
19	700	700	Moderado	Moderado	E.Q. Moderadamente agresivo	E.Q. Moderadamente agresivo
20	0	0	No aplicable	No aplicable	No considerado	No considerado
21	10	10	No aplicable	No aplicable	No considerado	No considerado
22	55	55	No aplicable	No aplicable	No considerado	No considerado
23	85	85	No aplicable	No aplicable	No considerado	No considerado
24	10	10	No aplicable	No aplicable	No considerado	No considerado
25	Sin Datos					
26	5	5	No aplicable	No aplicable	No considerado	No considerado
27	40	40	No aplicable	No aplicable	No considerado	No considerado
28	0	0	No aplicable	No aplicable	No considerado	No considerado
29	5	5	No aplicable	No aplicable	No considerado	No considerado
30	130	130	No aplicable	No aplicable	No considerado	No considerado

Nota: Entorno Químico (E.Q.).

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

Según los detalles de las características de ciertos puntos en donde la concentración de sulfatos permiten caracterizarla mediante la comparación de dos normativas, se establecen dos mapas de georreferenciación.

Mediante las normas NEC (Tabla 1) y ACI (Tabla 2), que comprenden los rangos de concentración de sulfatos de 0 a 10000 ppm (partes por millón), se obtuvieron dos clasificaciones bajo el criterio de severidad: Clase S0 no aplicable de 0 a 150 ppm y Clase S1 moderado de 150 a 1500 ppm. Mismo que fueron representados plasmando los puntos donde se extrajeron las muestras de suelo, con ayuda del programa ArcMap en el Anexo 1.

Basados en la normativa británica BSI (Tabla 3) y alemana DIN (Tabla 4), se clasificó mediante los valores obtenidos de concentración de sulfatos en dos categorías: Entorno químico ligeramente agresivo que va desde los 200 a 600 mg/l que es equivalente a unidad de ppm para medir concentraciones y entorno químico moderadamente agresivo de 600 a 3000 mg/l o ppm. Ver Anexo 2.

De los ensayos realizados en el laboratorio obtuvimos concentraciones de sulfatos inferiores a 200 ppm. Por una parte, la normativa DIN y BSI no consideran estos valores para su categorización. Sin embargo, las normativas NEC y ACI clasifican los mismos dentro del rango de no aplicables.

En la figura 10 se observa que la concentración de sulfato se eleva en zonas con suelos tipo turbas y existen niveles considerables en suelos tipo SM o arenas limosas. En las zonas con concentraciones moderadas de sulfatos y suelo SM se encontró un nivel freático poco profundo a una distancia mínima de 0.55 m en un punto.

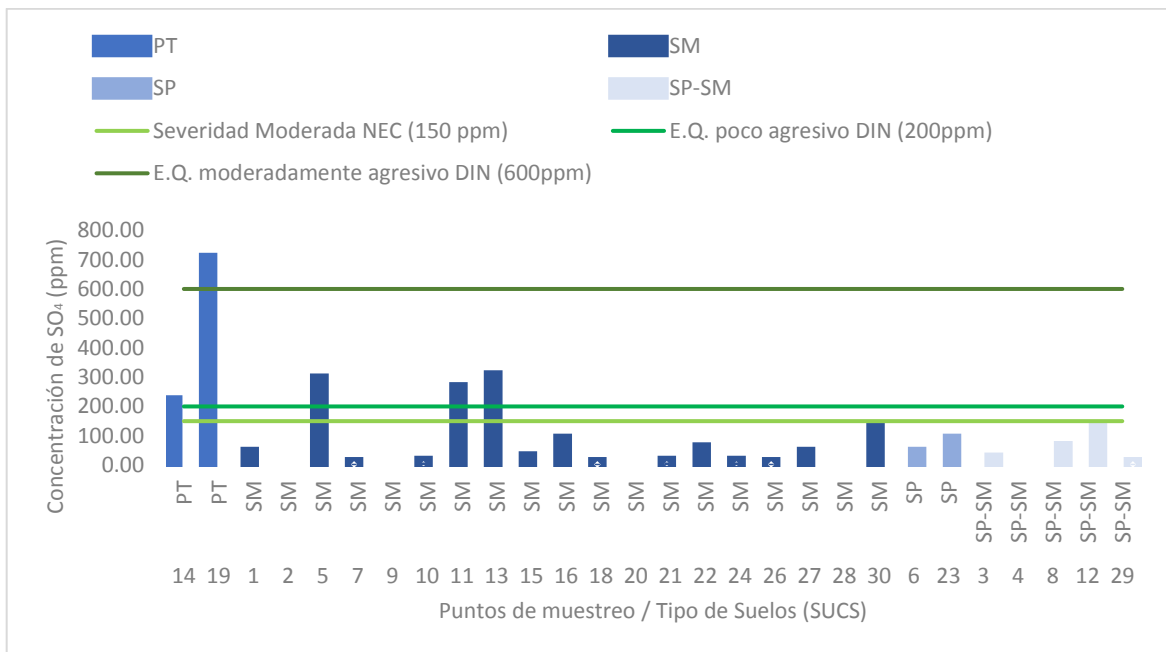


Figura 10 Concentración de sulfatos según el tipo de Suelo.

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

Se observa que la presencia de agua subterránea y agua estancada eleva las concentraciones de sulfatos, lo que representa una clase S1 de exposición del hormigón al ataque químico de sulfatos; ver figura 11.

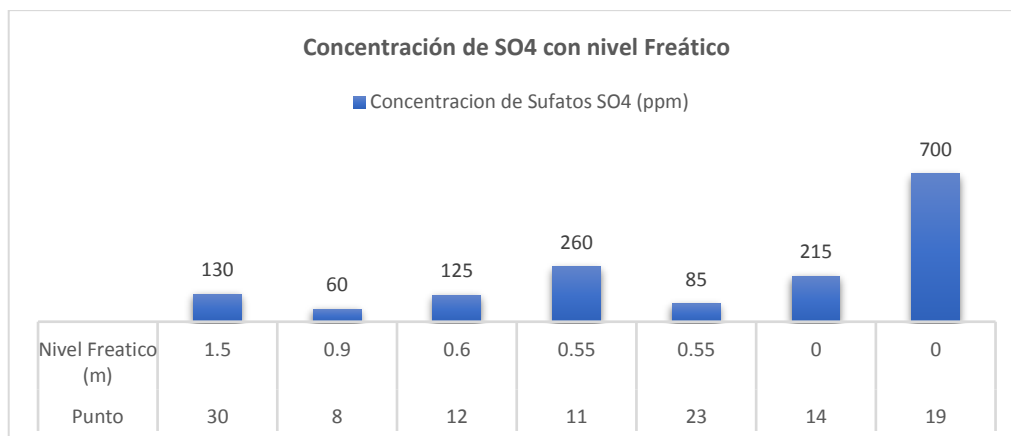


Figura 11 Concentración de sulfatos con nivel freático.

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

6.4 Descripción del estado en las estructuras de San Gerardo

Con los resultados de los estudios del suelo de San Gerardo y con las observaciones realizadas durante las campañas de exploración. Se encontró zonas a una exposición moderada de sulfatos, donde se ubican algunas viviendas que presentan patologías (tabla 13) en la parte baja de sus fachadas. Estas patologías debilitan la resistencia del hormigón de cimentaciones, muros y otros elementos estructurales, que se encuentran en contacto directo con el suelo contaminado.

Tabla 13 Estado de las Fachadas de las viviendas de San Gerardo.

Punto	ID	m.s.n.	Coordenadas UTM		Sulfatos SO ₄ (ppm)	Patología
			Este	Norte		
Viviendas Barrio Central San Gerardo						
1	V1	2694	765111.00	9819366.00	40	SP
4	V4	2693	765230.00	9819127.00	0	SP
6	V6	2715	764831.00	9818876.00	40	SP
10	V10	2654	765679.00	9818951.00	10	SP
18	V18	2671	765279.00	9818424.00	5	SP
20	V20	2688	765228.00	9819309.00	0	SP
28	V28	2715	764688.00	9819068.00	0	SP
Casas Con Patologías						
5	V5	2662	765477.00	9819075.00	290	Humedad en paredes, eflorescencia y desprendimiento de material (Anexo 4).
11	V11	2676	764902.34	9818681.69	260	Disgregación del hormigón y desprendimiento del Recubrimiento (Anexo 5).
11	V11_2	2686	764921.64	9818717.03	260	Eflorescencia (Anexo 9).

12	V12	2668	765090.01	9818657.46	125	Eflorescencia, disgregación del hormigón y desprendimiento del recubrimiento (Anexo 6).
13	V13	2664	765264.02	9818667.00	300	Humedad, eflorescencia, desprendimiento del recubrimiento y exposición del acero de refuerzo (Anexo 8).
14	V14	2649	765532.31	9818727.39	215	Eflorescencia (Anexo 5).
19	V19	2650	765630.02	9818629.98	700	Desprendimiento del recubrimiento y pérdida de continuidad de elementos estructurales (Anexo 9).
30	V30	2658	765379.80	9818762.18	130	Desprendimiento del recubrimiento (Anexo 8).

Nota: Sin Patología (S.P.).

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

7. DISCUSIÓN

San Gerardo en su gran mayoría pertenece a la formación geológica de Riobamba, que es un conglomerado volcánico formado por la mezcla de cantos rodados angulares y redondos. Los procesos de alteración mecánica y meteorización química de las rocas forman un eluvión, que es transportado de su origen por diferentes mecanismos formando un coluvión (GAD Parroquial de San Gerardo, 2015). Típicamente los coluviones están formados por limos, arenas finas, arenas mal gradadas; los mismos que se encuentra en casi toda el área de la parroquia. Cabe mencionar que el relieve del suelo juega un papel importante para la formación de vertientes, las mismas que dan paso al origen de los suelos tipo turbas encontrados en ciertas zonas del área total de estudio.

Torres y Acevedo (2008) reportan en su estudio que la salinidad en el agua de riego por concentraciones de sulfatos y las condiciones de drenaje del suelo, dan lugar a la acumulación de iones de sulfato en el perfil de este, lo cual puede conllevar a un problema a largo plazo. En el punto 5 se pueden encontrar niveles moderados de concentración de SO_4 (Anexo 4), ya que se encuentra dentro de un área con gran cantidad de terrenos agrícolas y rodeado por canales de riego, estos al ser de tierra son propensos a tener infiltraciones agravando la problemática existente.

El agua salada o estancada son medios para que exista una concentración de sulfatos considerable, cabe recalcar que las condiciones salinas del agua de mar presentan una concentración de sulfatos de 2623.6 ppm (Jiménez & Lozano, 2018). Dentro de las normativas tratadas la concentración de sulfatos en el agua de mar corresponde a la Clase S2 de exposición severa (NEC-SE-HM, 2015) o a un ambiente químico moderadamente agresivo (BSI, 2013). Comparando el valor más crítico del presente estudio que es de 700 ppm (Punto 19) correspondiente a una exposición Clase S1 moderada o a un entorno químico moderadamente agresivo (DIN 4030-1, 2008).

El desprendimiento del recubrimiento de hormigón en la base las fachadas de las viviendas, como la presencia de eflorescencia en las mismas (Anexo 5), son una clara manifestación de iones de sulfato que interactúan químicamente con sales y la pasta de cemento hidratada (Catur Muraña, 2021). Verificando la concentración de sulfatos en los puntos 11 y 14 están dentro de un rango moderado de 260 y 215 ppm respectivamente. Cabe mencionar que el deterioro en la vivienda mostrada en el anexo 6 es muy severo debido a su exposición a un periodo de tiempo largo.

El ataque químico a las cimentaciones de un edificio por ácido sulfúrico producido por microorganismo de aguas residuales, que se filtraron de un pozo absorbente cercano y que junto al hormigón de mala calidad con la que se construyeron las mismas (J. Tulliani et al., 2002), generaron una desintegración severa del material. La aparición de yeso con cantidades de etringita, explican que se produjo un fenómeno expansivo en el hormigón, perdiendo así su recubrimiento y generando micro fisuras que afectaron a la resistencia de las cimentaciones.

De esta forma podemos comparar los resultados obtenidos de concentración de 300 y 130 ppm de SO_4 en los puntos 13 y 30 respectivamente, cercanos a un canal que vierte aguas residuales (Anexo 7), se observó el desprendimiento del recubrimiento y la exposición del acero refuerzo en las fachadas de viviendas dentro del área de influencia de estos puntos (Anexo 8).

Custodio (2020) después de un diagnóstico de las patologías en las cimentaciones de viviendas unifamiliares, concluye que existen daños en paredes interiores y en la fachada exterior de las viviendas provocadas por la humedad y la concentración de sulfatos en el suelo. Mencionando patologías en el hormigón como eflorescencia, desprendimientos del recubrimiento y enlucido en mampostería. Mismas características encontradas en las

viviendas ubicadas en zonas de exposición moderadas a sulfatos en el suelo de San Gerardo
(Anexo 9).

8. CONCLUSIONES

Los resultados del estudio permiten concluir que, en las regiones de la parroquia de San Gerardo, donde existen vertientes de agua que pueden fluir a través del suelo arenoso, se estancan en el terreno que tiene una mayor depresión y dan paso a la aparición de turbas. Estos son entornos donde las concentraciones de sulfatos aumentan por la acumulación y descomposición de la materia orgánica y por lo tanto sería zonas de amenaza para las infraestructuras de hormigón de las viviendas cercanas.

Midiendo la concentración de sulfatos solubles en el suelo, los resultados de los ensayos turbidimétricos muestran que los niveles de SO_4 , que presentan un riesgo moderado para el hormigón aparecen en suelos agrícolas con filtraciones de agua de riego. Este se da por el uso de fertilizantes u otros productos químicos con niveles de sulfatos y estos al no degradarse por completo se acumulan y aumentan su concentración en el perfil del terreno.

Con base en los resultados obtenidos en esta investigación, se zonifica el barrio Central de San Gerardo dentro de dos clases de exposición por ataque químico de SO_4 , S0 (no aplicable) y S1 (Moderado), donde las zonas de clase S1, son suelos agrícolas (Punto 5) rodeados por canales de riego y otros suelos que tienen niveles freáticos cerca de la superficie o son turbas. De la misma forma con las normativas europeas, el suelo del área de estudio presenta dos entornos químicos, Poco agresivo y Moderadamente agresivos, siendo los suelos PT los que poseen las concentraciones más altas de sulfatos y por ende los afectarían al hormigón de las cimentaciones.

Mediante el presente estudio se concluye que el estado de las cimentaciones de las viviendas en San Gerardo, pueden presentar patologías que afectan la resistencia del hormigón. Argumento fomentado en el estado actual de las fachadas. La presencia de humedad, eflorescencia, partículas de yeso, disgregación del hormigón e inclusive pérdida

de continuidad de algunos elementos estructurales, vistos en las fachadas de viviendas cercanas a las zonas con mayores concentraciones de sulfatos. Muestran que la exposición al agua subterránea y estancada con un entorno químico moderado afecta al hormigón y directamente a la seguridad, funcionalidad y estética de la estructura en general.

9. RECOMENDACIONES

Se recomienda verificar que tipo de cemento se usa para la elaboración del hormigón de las cimentaciones, un cemento que tenga un alto contenido de aluminato tricálcico podría terminar siendo contra productivo en un entorno con altas concentraciones de sulfatos. La resistencia del hormigón a los sulfatos mejoraría si se producen un hormigón más denso e impermeable. Usando un cemento tipo HS, una baja relación a/c agua cemento y con los respectivos procedimientos para su colocado y compactado en obra.

Realizar estudios similares en los barrios la Florida y La Victoria ubicados al sur y sureste del Barrio Central, respectivamente. Debido a que observó en los resultados altas concentraciones de sulfatos que tienen una tendencia de crecimiento hacia esos lugares.

Aunque el método colorimétrico se basa en la normativa ASTM C1580-20 se recomienda los próximos estudios basarse en los mismos para los ensayos de laboratorio.

Se recomienda complementar el estudio investigativo extendiendo el mismo hacia otro material importante, como lo es el acero de refuerzo. Analizando, el tipo de afecciones que generan las concentraciones de sulfatos ya sea en el suelo o en el agua.

Es de vital importancia verificar el contenido de sulfato en los materiales pétreos utilizado en las mezclas de hormigón para las construcciones de esta zona.

10. REFERENCIAS

- ACI 201. (2012). *Guía para la Durabilidad del Hormigón*.
- Alva, J. (2011). Introducción y conceptos básicos. *Memoria Del Colegio Nacional*, 101–109. <https://anamarcelabayona.files.wordpress.com/2012/11/leyes-de-la-termodinamica2.pdf>
- ASTM C-136. (2015). *Método de ensayo para el análisis por tamizado de áridos finos y gruesos*.
- ASTM C1580-20. (2020). *Standard Test Method for Determination of Asbestos in Soil* (Vol. 04). <https://doi.org/10.1520/C1580-20.2>
- ASTM D1452M-16. (2021). *Standard Practice for Soil Exploration and Sampling by Auger Borings*.
- ASTM D2487. (2011). *Práctica Estándar para la Clasificación de Suelos para Propósitos de Ingeniería (Sistema de Clasificación Unificada de Suelos)*. <https://doi.org/10.1520/D2487->
- BSI. (2013). BSI Standards Publication Concrete — Specification , performance , production and conformity. In *British Standards Institution* (Issue May).
- Catur Muraña, F. J. (2021). Valoración del hormigón ante ataque de sulfatos. *Revista Ingeniería*, 5(12), 180–192. <https://doi.org/10.33996/revistaingenieria.v5i12.83>
- Custodio, C. (2020). *Diseño de una metodología de prevención y tratamiento de las patologías en las cimentaciones de las viviendas en la urbanización la Floresta los Olivos 2019*.
- DIN 4030-1. (2008). *Beurteilung betonangreifender Wasser, Böden und Gase - Teil 1: Grundlagen und Grenzwerte*.

- GAD Parroquial de San Gerardo. (2015). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del GADPR de San Gerardo*. 6. http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdiagnostico/0660821480001_PLAN_DE_DESARROLLO_SAN_GERARDO_24-06-2015_20-56-21.pdf
- Haynes, H., O'Neill, R., & Mehta, P. K. (1996). Concrete deterioration from physical attack by salts. *Concrete International*, 18(1), 63–69.
- INEN-696. (2014). NTE INEN 0696: Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso. In *Determinacion del tamaño de particulas en arido fino y grueso*. (Vol. 1, Issue Primera Edición).
- Jiang, X., Mu, S., Yang, Z., Tang, J., & Li, T. (2021). Effect of temperature on durability of cement-based material to physical sulfate attack. *Construction and Building Materials*, 266, 120936. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120936>
- Jiménez, K., & Lozano, H. (2018). *Análisis de la influencia de sulfatos y cloruros en el deterioro d estrucutras en concreto en zonas costeras del Atlántico*. April, 66. <papers2://publication/uuid/512EBCE8-D635-4348-A67D-22DD52988F4C>
- Liao, K. X., Zhang, Y. P., Zhang, W. P., Wang, Y., & Zhang, R. L. (2020). Modeling constitutive relationship of sulfate-attacked concrete. *Construction and Building Materials*, 260, 119902. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119902>
- Look, B. (2013). *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*.
- NEC-SE-HM. (2015). *Estructuras de hormigón armado*.
- Nilson, A. (2006). Diseño de estructuras de concreto. In *Society* (Vol. 20, Issue 181). http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&dopt=Citation&list_uids=12071716

- Pire, W. G. (2013). *Estudio De Durabilidad Al Ataque De Sulfatos Del Concreto Con Agregado Reciclado*. <http://core.kmi.open.ac.uk/download/pdf/12818497.pdf>
- Puerta, R., Rengifo, J., & Bravo, N. (2011). *ARCGIS BÁSICO*.
- Tex-145-E. (2005). Determining sulfate content in soils — Colorimetric Method. In *Texas Department of Transportation* (Vol. 4, Issue 4).
- Torres, A. H., & Acevedo, E. H. (2008). El problema de salinidad en los recursos suelo y agua que afectan el riego y cultivos en los valles de Lluta y Azapa en el Norte de Chile. In *Idesia* (Vol. 26, Issue 3, pp. 31–44). <https://doi.org/10.4067/s0718-34292008000300004>
- Traversa, L. P., & Villagrán-Zaccardi, Y. A. (2010). Introducción a la durabilidad y patología de las estructuras de hormigón armado. *IX Jornada "Técnicas de Restauración y Conservación Del Patrimonio"*, 1, 1–20.
- Tulliani, J. M., Montanaro, L., Negro, A., & Collepari, M. (2002). Sulfate attack of concrete building foundations induced by sewage waters. *Cement and Concrete Research*, 32(6), 843–849. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00752-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00752-9)
- Tulliani, J., Montanaro, L., Negro, A., & Collepari, M. (2002). *Ataque de sulfato de cimientos de edificios de hormigón inducido por aguas residuales*. 32, 843–849.

11. ANEXOS

Anexo 1. Concentración de sulfatos medidos con los rangos de la norma NEC.

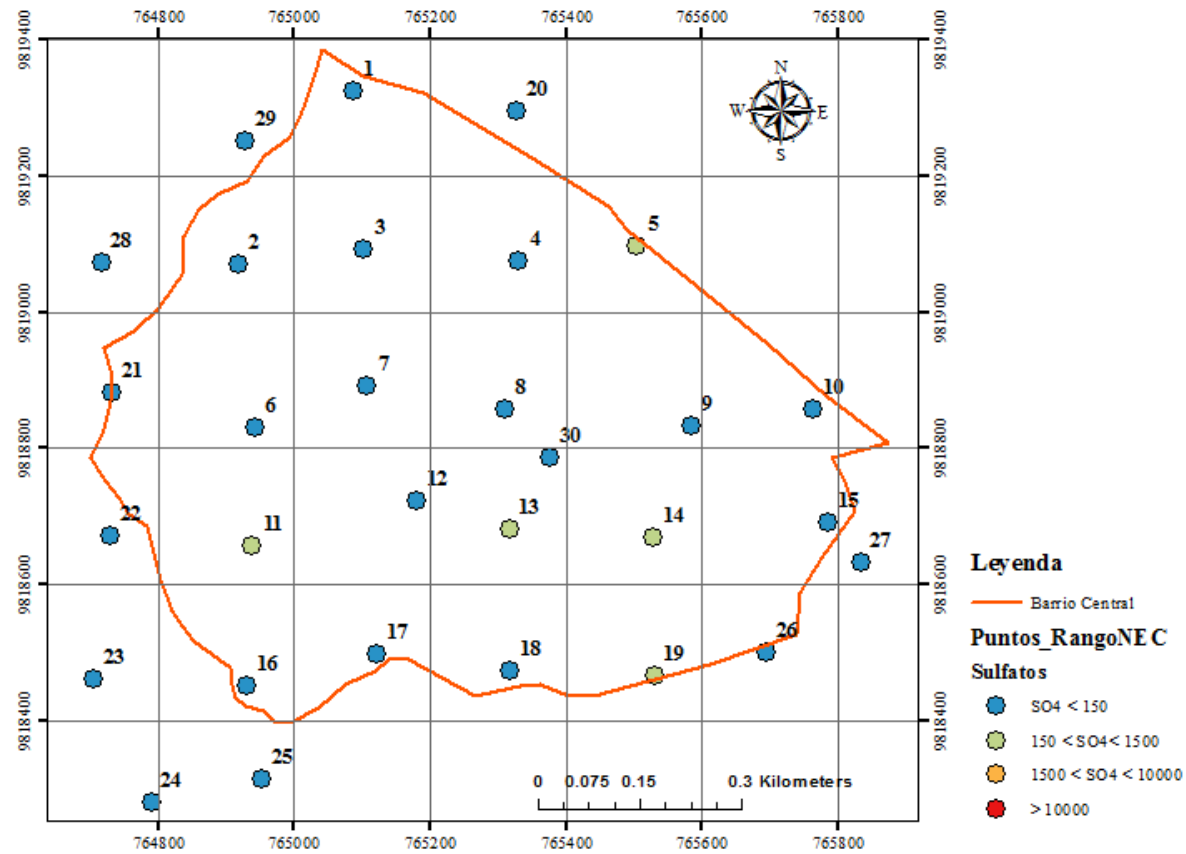


Figura 12 Anexo 1: Mapa de concentración de sulfatos, basados en los Rangos de la norma NEC.

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

Anexo 2. Concentración de sulfatos medidos con los rangos de la norma BSI.

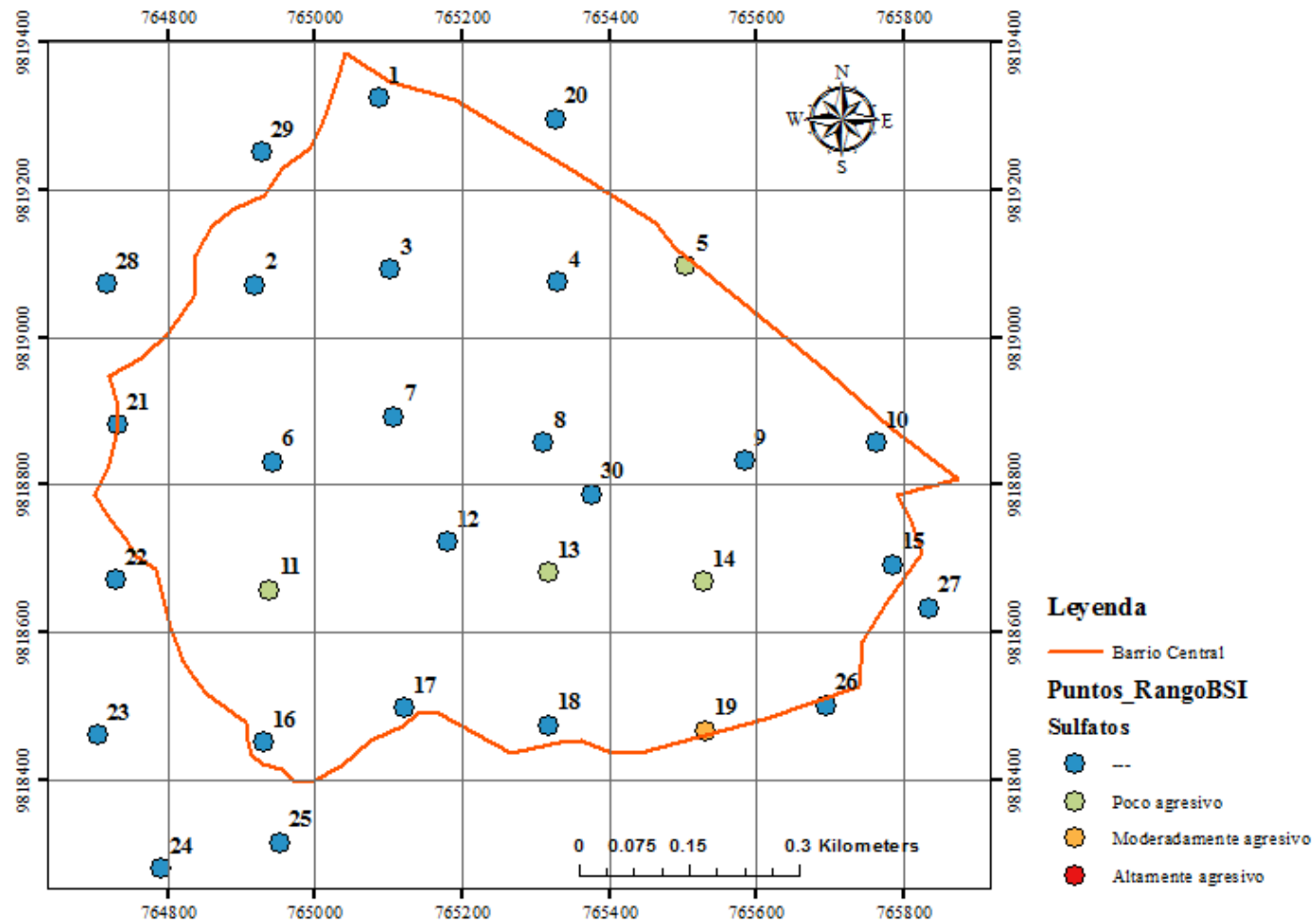


Figura 13 Anexo 2: Mapa de concentración de sulfatos, basados en los Rangos de la norma BSI.

Fuente: Esteban Sánchez, 2021

Anexo 3. Viviendas del barrio central sin patologías visibles en las fachas.



Figura 14 Vivienda V1, coordenadas WGS84 765111 m E, 9819366 m S.

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.



Figura 15 Vivienda V4, coordenadas WGS84 765230 m E, 9819127 m S.

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.



Figura 16 Vivienda V6, coordenadas WGS84 764831 m E, 9818876 m S.

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.



Figura 17 Vivienda V10, coordenadas WGS84 765679 m E, 9818951 m S.

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.



Figura 18 Vivienda V18, coordenadas WGS84 765279 m E, 9818424 m S.

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.



Figura 19 Vivienda V20, coordenadas WGS84 765228 m E, 9819309 m S.

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.



Figura 20 Vivienda V28, coordenadas WGS8 764688 m E, 9819068 m S.

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

Anexo 4. Vivienda dentro del área de influencia del punto 5, concentración de sulfatos 290 ppm.



Figura 21 Anexo 4: Vivienda cerca al punto 5 (V5, coordenadas WGS84 765477.00 m E, 9819075.00 m S).

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.



Figura 22 Anexo 4: Canal de riego ubicado cerca al punto 5.

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

Anexo 5. Eflorescencia de muro de hormigón cerca al punto 11 y 14.



Figura 23 Anexo 5: Eflorescencia en muro de cerramiento (V14, coordenadas WGS84 765532.31 m E, 9818727.39 m S).

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.



Figura 24 Anexo 5: Desprendimiento del Hormigón (V11, coordenadas WGS84 764902.34 m E, 9818681.69 m S).

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

Anexo 6. Eflorescencia y desprendimiento severo del hormigón cerca al punto 11.



Figura 25 Anexo 6: Desprendimiento de hormigón de la fachada (V12, coordenadas WGS84 765090.01 m E, 9818657.46 m S).

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

Anexo 7. Canal de aguas Residuales, que vierte sus aguas a una quebrada.



Figura 26 Anexo 7: Canal de aguas residuales (Coordenadas WGS84 765310.51 m E, 9818739.16 m S).

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

Anexo 8. Patología del hormigón en viviendas en la zona de influencia del punto 30.



Figura 27 Anexo 8: Vivienda con desprendimientos de hormigón de la facha lateral (V30, coordenadas WGS84 765379.80 m E, 9818762.18 m S).

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.



Figura 28 Anexo 8: Desprendimiento del hormigón de recubrimiento de la columna y exposición del acero de refuerzo (V13, coordenadas WGS84 765264.02 m E, 9818667 m S).

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

Anexo 9. Patologías del hormigón usado en construcciones de viviendas en San Gerardo.



Figura 29 Anexo 9: Presencia de partículas de Yeso en la base de la fachada (V11_2, coordenadas WGS84 764921.64 m E, 9818717.03 m S).

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.



Figura 30 Anexo 9: *Disgregación de elementos de hormigón y bloque de mampostería (V19, coordenadas WGS84 765630.02 m E, 9818629.98 m S).*

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

Anexo 10. Mapas de zonificación, según las concentraciones de sulfatos encontradas.

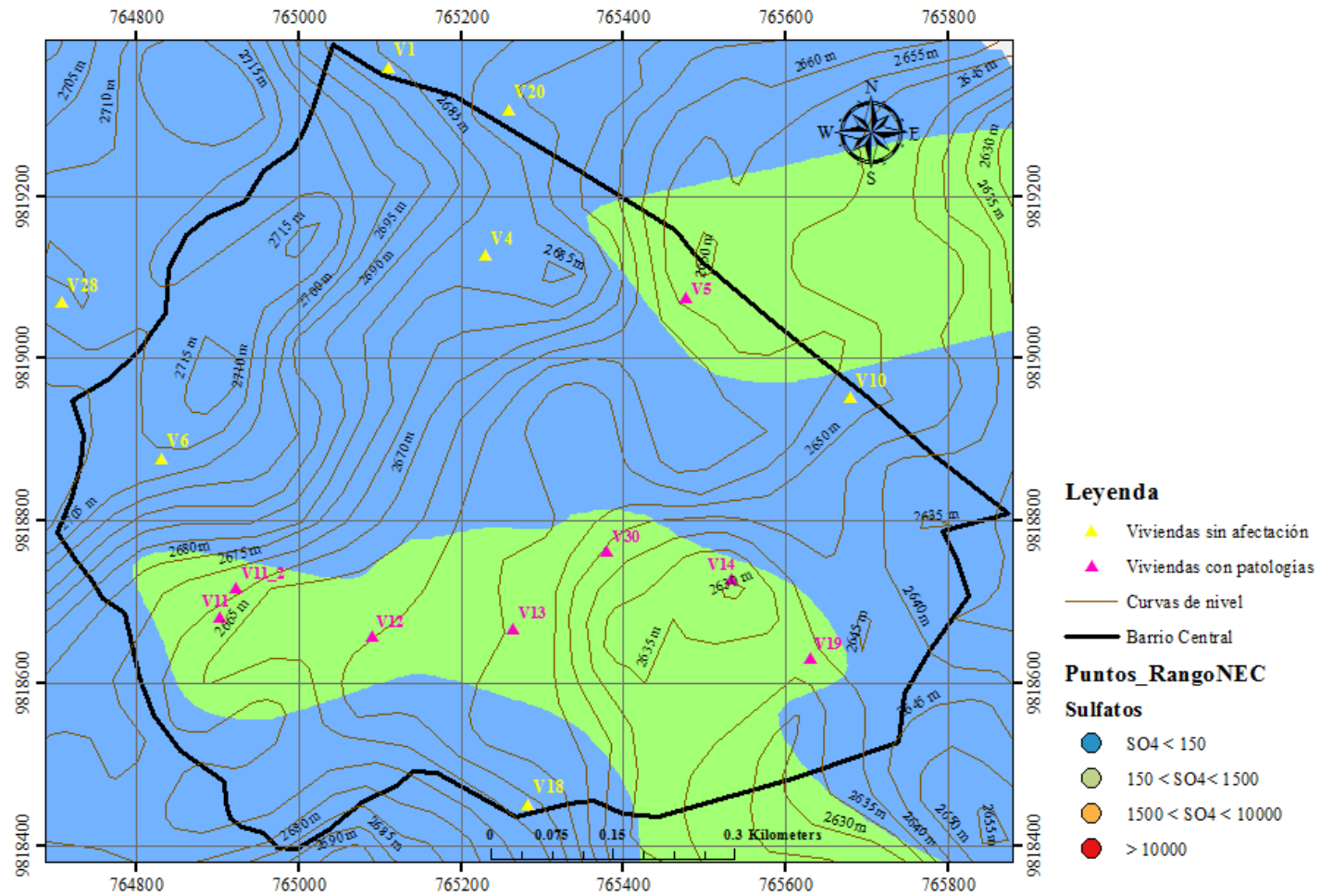


Figura 31 Anexo 10: Zonificación por interpolación, Acorde a las concentraciones de Sulfatos Norma NEC.

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

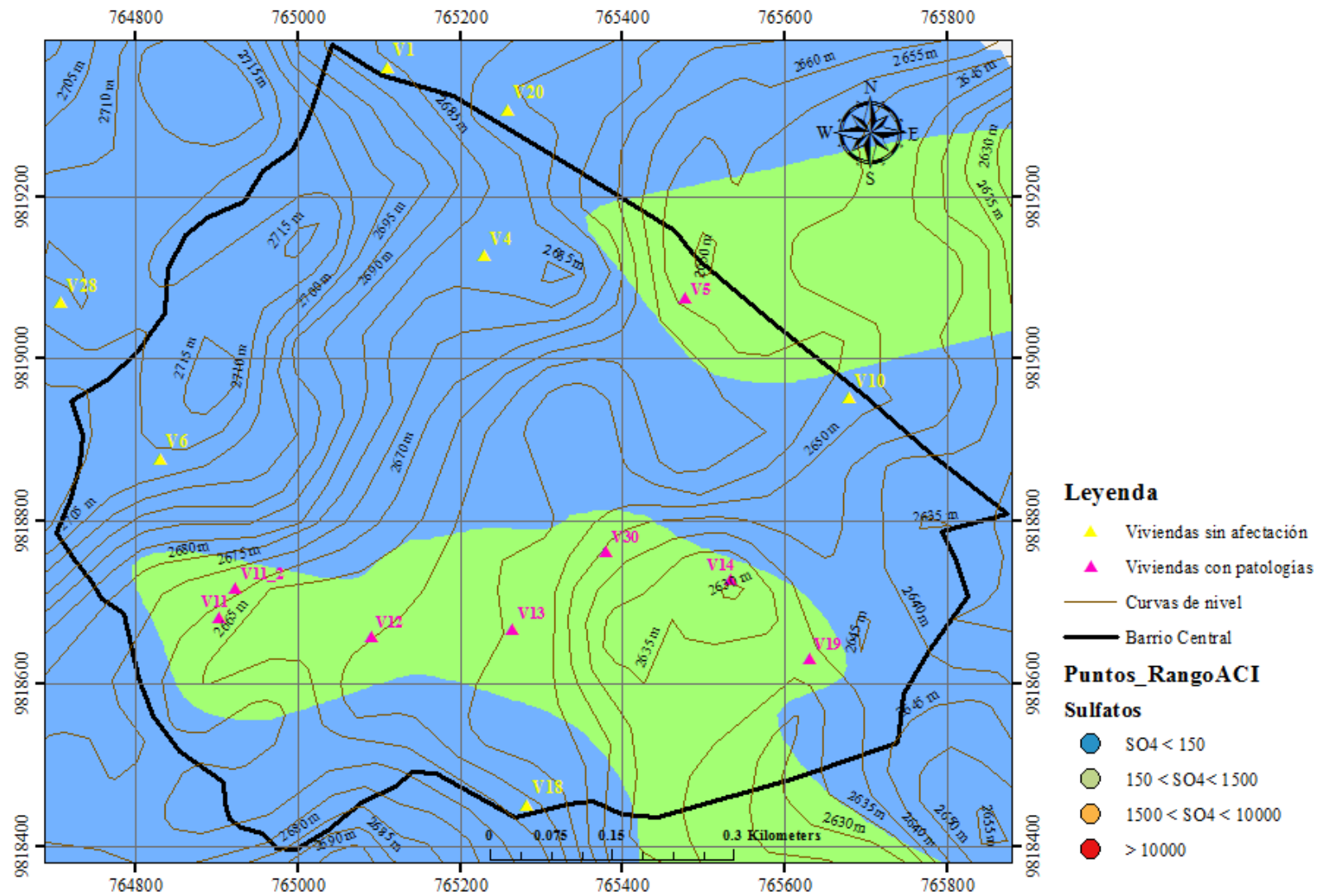


Figura 32 Anexo 10: Zonificación por interpolación, Acorde a las concentraciones de Sulfatos Norma ACI.

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

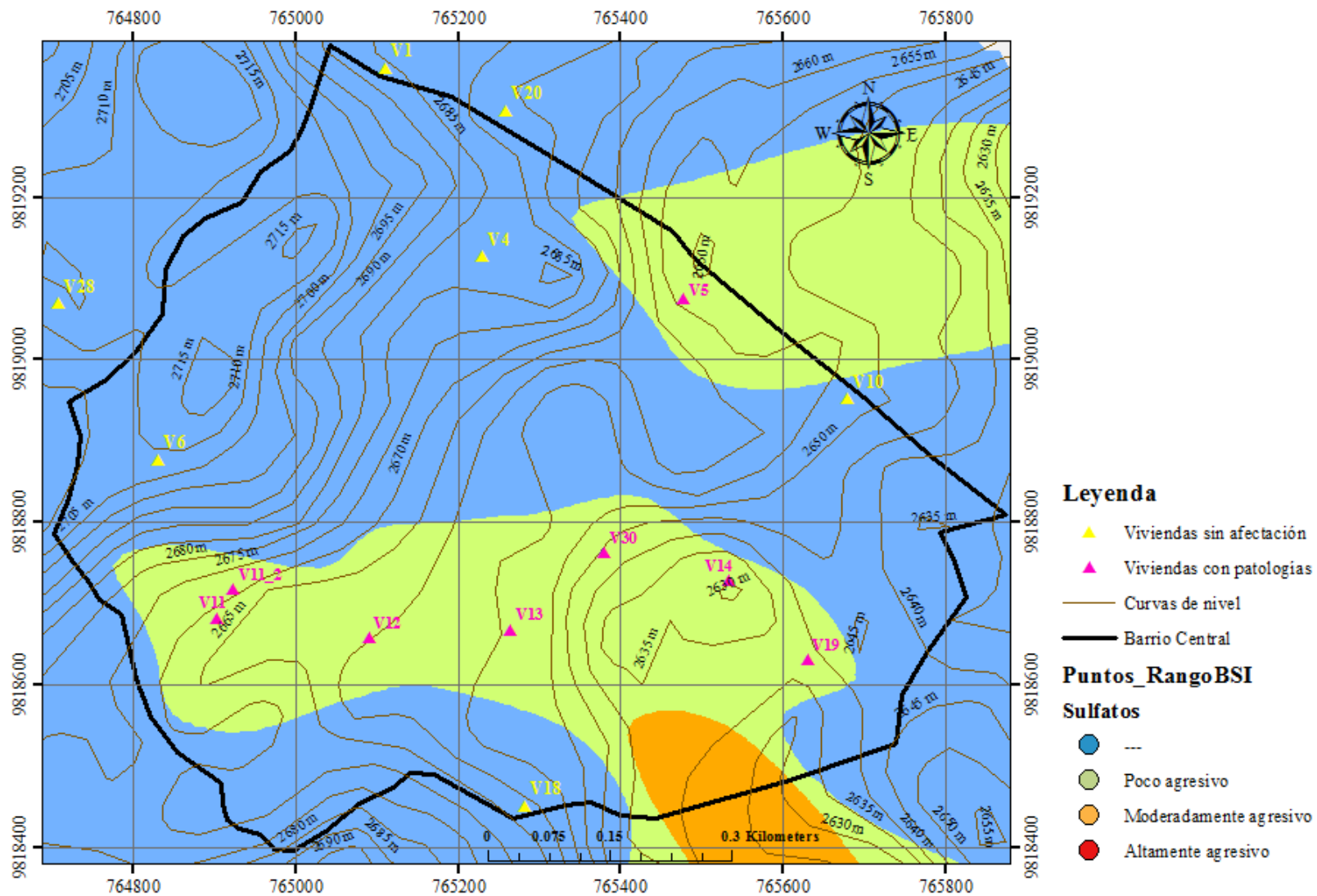


Figura 33 Anexo 10: Zonificación por interpolación, Acorde a las concentraciones de Sulfatos Norma BSI.

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

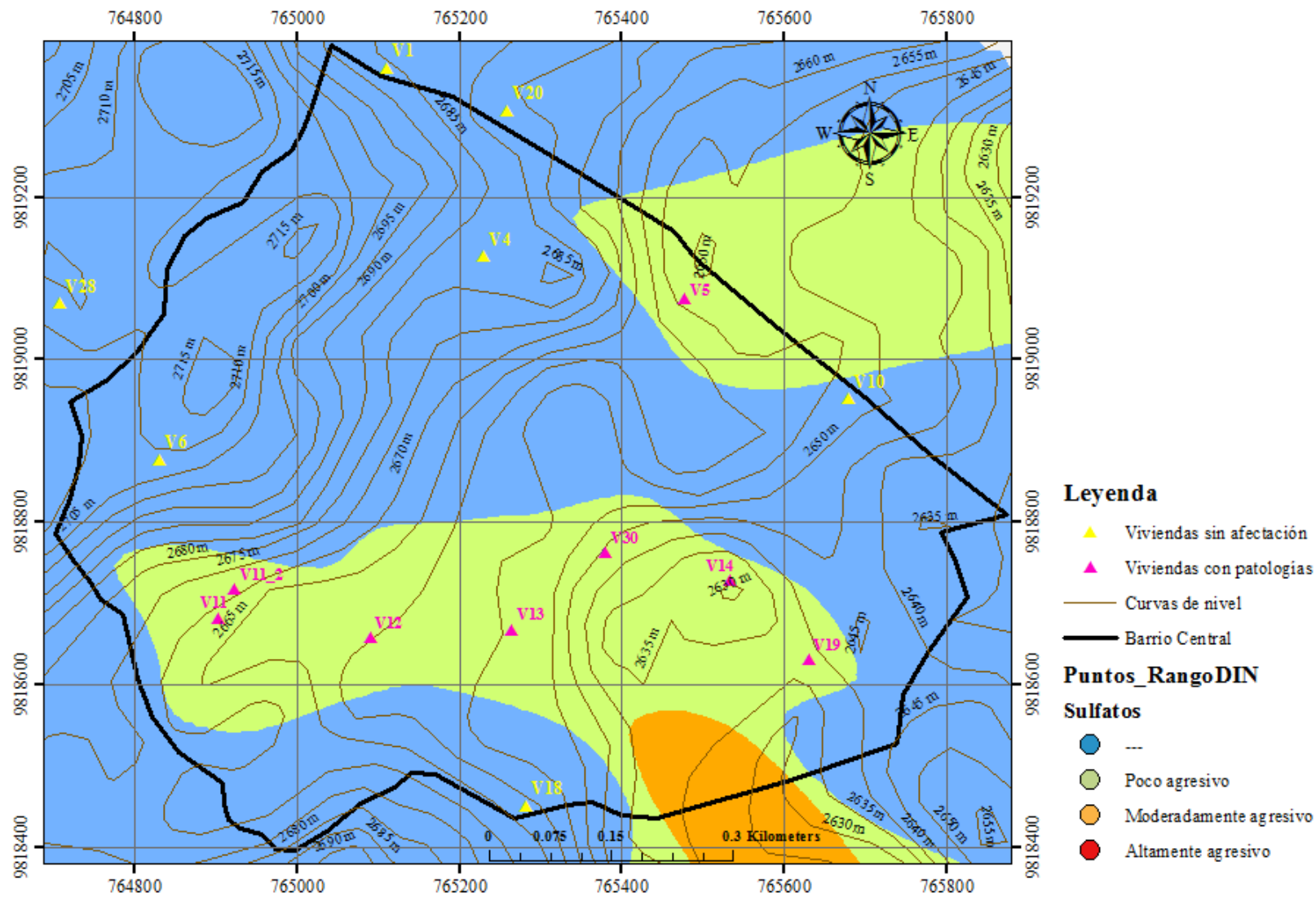


Figura 34 Anexo 10: Zonificación por interpolación, Acorde a las concentraciones de Sulfatos Norma DIN.

Fuente: Esteban Sánchez, 2021.

Anexo 11.

Anexo 12. Curva de calibración para calcular la concentración de sulfatos por el método turbidímetro.

