

PRÁCTICA EMPRESARIAL EN ISAGEN S.A E.S.P. COMO AUXILIAR DE
INGENIERÍA CIVIL EN EL PROYECTO HIDROELÉCTRICO SOGAMOSO,
ENFOCADO EN REALIZAR UN ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DEL LLENADO
DEL SISTEMA DE CONDUCCIÓN EN EL MACIZO ROCOSO, A CAUSA DE LOS
CAMBIOS DE PRESIONES HIDROSTÁTICAS EN LA ROCA.

YULI PAOLA CÁCERES REMOLINA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2015

PRÁCTICA EMPRESARIAL EN ISAGEN S.A E.S.P. COMO AUXILIAR DE
INGENIERÍA CIVIL EN EL PROYECTO HIDROELÉCTRICO SOGAMOSO,
ENFOCADO EN REALIZAR UN ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DEL LLENADO
DEL SISTEMA DE CONDUCCIÓN EN EL MACIZO ROCOSO, A CAUSA DE LOS
CAMBIOS DE PRESIONES HIDROSTÁTICAS EN LA ROCA.

YULI PAOLA CÁCERES REMOLINA

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniera Civil

Directora

Isabel Cristina Domínguez Rivera
Ingeniera Sanitaria, MSc, PhD.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2015

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme siempre cumplir mis sueños, dándome todas las oportunidades que he necesitado, acompañándome en todo el camino de mi vida.

A mi familia especialmente a mis padres por apoyarme en todos mis proyectos, siendo mi guía en todo momento, este logro también pertenece a ellos.

A la Universidad Industrial de Santander, por ser mi segundo hogar durante todo este tiempo de formación como profesional.

A ISAGEN por darme la oportunidad de ser parte de su equipo de proyectos, fue una gran experiencia para mi crecimiento profesional y personal.

A todos mis amigos y compañeros que me acompañaron durante todo mi proceso de formación como ingeniera civil.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	12
1. GENERALIDADES DE LA EMPRESA.....	13
1.1. MISIÓN.....	13
1.2. VISIÓN.....	13
2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO.....	14
3. ACTIVIDADES REALIZADAS DURANTE LA PRÁCTICA PROFESIONAL....	15
3.1. SEGUIMIENTO AL PROYECTO MEDIANTE VISITAS A LOS FRENTE DE OBRAS PRINCIPALES.....	16
3.2. TRÁMITE DE CORRESPONDENCIA PRIORITARIA DEL PROYECTO.....	18
3.3. ANÁLISIS Y ORGANIZACIÓN DE LAS MODIFICACIONES REALIZADAS A LOS PLANOS DE CONSTRUCCIÓN Y OBRA CONSTRUIDA (AS-BUILT) DEL PROYECTO.....	19
3.4. APOYO EN EL ÁREA DE PRESUPUESTO.....	19
3.5. APOYO EN LA LIQUIDACIÓN DEL CONTRATO DE OBRAS PRINCIPALES.....	20
4. INFILTRACIONES EN EL MACIZO ROCOSO DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA.....	21
4.1. ASPECTOS GEOLÓGICOS.....	22
4.1.1. Permeabilidad del Suelo.....	22
4.1.1.1. Permeabilidad del suelo según su textura.....	22
4.1.1.2. Permeabilidad de un suelo según su estructura.....	23
4.1.2. Ensayos de Permeabilidad.....	24
4.1.2.1. Ensayo de permeabilidad de Lefranc.....	25

4.1.3. Ensayo de Permeabilidad de Lugeon.....	26
4.2. INFILTRACIONES GENERADAS POR EL EMBALSE.....	28
4.2.1. Volúmenes característicos de un embalse.....	28
4.2.2. Calculo teórico de infiltraciones.....	29
4.2.3. Medición en campo de infiltraciones.....	30
4.2.4. Comparación del nivel del embalse y caudal de infiltración	31
4.3. TRATAMIENTO DE INFILTRACIONES EN EL MACIZO ROCOSO DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA.....	32
4.3.1. Inyecciones.....	33
4.3.1.1. Tipos de tratamiento de impermeabilización mediante inyecciones.....	33
4.3.1.2. Métodos de inyección.....	34
4.3.1.3. Descripción del proceso de inyección.....	36
4.3.2. Pantalla cortaflujo.....	36
4.3.2.1. Procedimiento constructivo de la Pantalla Cortaflujo.....	36
4.3.2.2. Inyecciones en la pantalla cortaflujo.....	37
5. CONCLUSIONES.....	39
REFERENCIAS.....	41
BIBLIOGRAFIA.....	43

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Centrales de generación de energía de ISAGEN S.A E.S.P.....	13
Figura 2. Central hidroeléctrica Sogamoso.....	14
Figura 3. Proceso de construcción de canales para manejo de agua de la vía de acceso a la Central subterránea de Hidrosogamoso.....	17
Figura 4. Proceso de estabilización de talud en vía de acceso a la Central subterránea de Hidrosogamoso.....	17
Figura 5. Proceso de pavimentación de la vía de acceso a la Central subterránea de Hidrosogamoso.....	18
Figura 6. Ciclo de revisión Planos As Built.....	19
Figura 7. Listado de seguimiento al proceso de liquidación.....	20
Figura 8. Infiltraciones presentadas en la central subterránea Hidrosogamoso....	21
Figura 9. Triangulo de texturas de un suelo.	23
Figura 10. Variación de la permeabilidad con cada tipo de suelo.....	24
Figura 11. Representación de los niveles característicos de un embalse.....	29
Figura 12. Vertedero de aforo Caverna de transformadores Central Hidroeléctrica Sogamoso.....	31
Figura 13 Infiltraciones en galería inclinada de inyección central Sogamoso.....	31
Figura 14. Equipos de inyección.....	35
Figura 15. Descripción del proceso de inyección.....	36
Figura 16. Descripción del proceso de construcción de Pantalla cortaflujo.....	37
Figura 17. Pantalla cortaflujo y Cortina de inyecciones.....	38

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Permeabilidad media para diferentes texturas de suelo.....	23
Tabla 2. Variación de la presión durante el ensayo de Lugeon.....	26
Tabla 3. Clasificación de macizos rocosos en función de su permeabilidad.....	27
Tabla 4. Volúmenes característicos embalse Hidrosogamoso.....	29
Tabla 5. Perdidas por infiltración en el embalse.....	30
Tabla 6. Ecuaciones para cálculo de caudales en diferentes tipos de vertederos.	30
Tabla 7. Máximos y mínimos caudales de infiltración y niveles del embalse, de agosto 2014 a mayo 2015, en la Central Hidroeléctrica Sogamoso.....	32

RESUMEN

TÍTULO: PRÁCTICA EMPRESARIAL EN ISAGEN S.A E.S.P. COMO AUXILIAR DE INGENIERÍA CIVIL EN EL PROYECTO HIDROELÉCTRICO SOGAMOSO, ENFOCADO EN REALIZAR UN ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DEL LLENADO DEL SISTEMA DE CONDUCCIÓN EN EL MACIZO ROCOSO, A CAUSA DE LOS CAMBIOS DE PRESIONES HIDROSTÁTICAS EN LA ROCA.*.

AUTORA: YULI PAOLA CACERES REMOLINA**

PALABRAS CLAVES: Infiltración, Permeabilidad, Embalse, Inyecciones, Pantalla Cortaflujo.

Una central hidroeléctrica es una obra de gran magnitud, la cual se realiza bajo estudios que garanticen la viabilidad del proyecto, incluyendo desde aspectos económicos hasta aspectos estructurales; la estabilidad de la obra es uno de los aspectos más importantes para el correcto funcionamiento de la central, por eso desde su etapa de diseño se prevén medidas correctivas a los factores que puedan llegar a afectar la estructura.

El contacto que se genera entre un embalse y las estructuras de las obras principales de una central hidroeléctrica al igual que la escorrentía, pueden dar lugar a infiltraciones. En caso de ocurrir infiltraciones las consecuencias incluyen la disminución de la resistencia al corte de la roca volviéndola fácilmente deformable. Para prevenir estas situaciones indeseables es necesario realizar un análisis de las infiltraciones en el macizo rocoso, identificando el caudal que puede llegar a infiltrarse y los tratamientos para disminuirlas.

El presente artículo describe las actividades realizadas durante la práctica en ISAGEN E.S.P., junto con una descripción de los aspectos relacionados con las infiltraciones en una central hidroeléctrica, tales como los ensayos de permeabilidad, cálculo y mediciones de caudales de infiltración y los tratamientos implementados para controlar estas infiltraciones, con el fin de garantizar el correcto funcionamiento de la central hidroeléctrica junto con las obras principales que la componen.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directora: Isabel Cristina Domínguez Rivera.

ABSTRACT

TITLE: ISAGEN S.A. ESP PRACTICE BUSINESS AS CIVIL ENGINEERING'S ASSISTANT IN THE SOGAMOSO HYDROELECTRIC PROJECT, FOCUSED ON MAKING AN ANALYSIS OF THE IMPACT OF FILLING DRIVING SYSTEM IN ROCK MASS , BECAUSE OF CHANGES IN ROCK HYDROSTATIC PRESSURES.*

AUTHOR: YULI PAOLA CACERES REMOLINA.

KEYWORDS: Infiltration, Permeability, Reservoir, Injections, Cut off wall.

A hydroelectric plant is a building of great magnitude, which is under study to secure the project's viability, including from economic aspects to structural building aspects; the building's stability is one of the most important aspects for the proper operation of the plant, so from design's phase will take precaution of the corrective factors that may potentially will affect the structure.

The contact between a dam and the structures of the main works in a hydroelectric plant, together with runoff can lead to infiltrations. When infiltrations occur, the consequences include decrease in the shear strength of the rock, making it easily deformable. For preventing this undesirable situations, analysis should be carried out like: establishing infiltration in the rock mass, identifying the flow that can infiltrate, and studying potential treatments to reduce this flow.

The present article describes the activities realized during the practice in ISAGEN E.S.P., together with a description of the aspects related to the infiltrations in a hydroelectric power station, such as the tests of permeability, calculation and measurements of flows of infiltration and the treatments implemented to control these infiltrations, in order to guarantee the correct functioning of the hydroelectric power station together with the principal works that compose it.

* Work Degree

** Physics Mechanical Engineering Faculty, Civil Engineering School. Directora: Isabel Cristina Domínguez Rivera.

INTRODUCCIÓN

La construcción de un proyecto de generación de energía como la Central Hidroeléctrica Sogamoso, requiere de estudios precisos y confiables que garanticen la estabilidad y funcionalidad de toda la estructura. Estos estudios abarcan desde aspectos económicos, hasta aspectos estructurales los cuales aseguran la viabilidad del proyecto.

Uno de los aspectos más importantes que afectan la ejecución de esta clase de proyectos, es el riesgo inminente a la infiltración de agua, debido al gran almacenamiento del fluido que se embalsa con el fin de aprovechar esa energía potencial para la generación de energía eléctrica, ya que estas infiltraciones afectan seriamente el comportamiento mecánico del macizo rocoso, debido a que disminuyen la resistencia al corte de la roca volviéndola fácilmente deformable, proporcionando desplazamientos entre bloques de rocas en direcciones paralelas a los planos de ruptura. [1] Por esto, como parte del control de la estabilidad del proyecto, se hace necesario registrar y analizar la información suministrada por la instrumentación geotécnica implementada, tanto en las obras superficiales como subterráneas, realizando un monitoreo de las afectaciones que pueden generar estas infiltraciones en las estructuras que componen la obra, todo esto teniendo en cuenta que actualmente la Central Hidroeléctrica Sogamoso posee un embalse lleno y que este a su vez genera filtraciones de agua y presiones en el macizo rocoso adyacente.

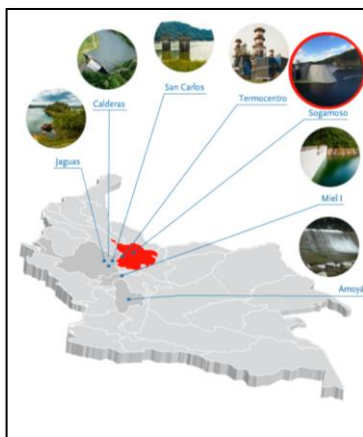
Éste artículo se constituye en un documento de revisión literaria de los aspectos relacionados con las infiltraciones, su identificación y tratamiento. Incluyendo la descripción detallada de dos alternativas para mitigar las infiltraciones: las inyecciones y la pantalla cortaflujo.

Adicionalmente, se incluye una descripción de las actividades realizadas durante la práctica y sus resultados.

1. GENERALIDADES DE LA EMPRESA

ISAGEN S.A E.S.P. es una empresa colombiana de servicios públicos, dedicada a la generación y comercialización de energía. Con la puesta en marcha de la Central Hidroeléctrica Sogamoso actualmente cuenta con siete centrales de generación de energía ubicadas en los departamentos de Antioquia, Tolima, Santander y Caldas, con una capacidad instalada total de 3.032 megavatios (MW) distribuidos en 2.732 MW hidráulicos y 300MW térmicos; posicionándose así como la segunda generadora más grande de Colombia. En la Figura 1 se ilustra la ubicación de las siete centrales de generación de ISAGEN. [2].

Figura 1. Centrales de generación de energía de ISAGEN S.A E.S.P



Fuente ISAGEN S.A E.S.P <<https://www.isagen.com.co/nuestra-empresa/generacion-de-energia/>>

1.1 MISIÓN

ISAGEN desarrolla proyectos de generación, produce y comercializa energía eléctrica y ofrece soluciones asociadas, para satisfacer las necesidades energéticas de sus clientes y crear valor empresarial.

1.2 VISIÓN

ISAGEN es líder en generación y transacciones de energía en tiempo real en Colombia, es el aliado de la productividad de los clientes y es reconocido por sus negocios de energía en mercados internacionales.

El desarrollo integral de los trabajadores y la responsabilidad empresarial son la base de la creación conjunta de valor para los accionistas y la sociedad.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

Desde febrero de 2009 ISAGEN adelanta la construcción del Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso, el cual con su puesta en marcha, aporta desde diciembre de 2014 una capacidad instalada de 820 MW, incrementando la producción de energía de ISAGEN en un 60 %. La Central está en capacidad de producir cerca del 8.3% de la energía que se consume en Colombia en un año.

La Central Hidroeléctrica Sogamoso se ubica en el departamento de Santander, en el cañón donde el río Sogamoso cruza la serranía de la Paz, y consiste en el aprovechamiento del caudal del río Sogamoso para la generación de energía eléctrica mediante la construcción de una presa de gravas con cara de concreto con una altura de 190 metros, 345 metros de ancho en su parte más alta, y un embalse con un volumen de 4.800 millones de metros cúbicos que ocupa un área de 7000 hectáreas; además posee una casa de máquinas subterránea con las tres unidades de generación más grandes de Colombia, por medio de las cuales se obtiene una capacidad instalada de 820 MW y se produce una energía media anual de 5.056 GWh. En la Figura 2 se muestra una fotografía aérea de las obras principales de la Central Hidroeléctrica Sogamoso. [3].

Figura 2. Central hidroeléctrica Sogamoso



Fuente: Registro fotográfico ISAGEN

3. ACTIVIDADES REALIZADAS DURANTE LA PRÁCTICA PROFESIONAL

La realización de la práctica empresarial en ISAGEN como auxiliar de ingeniería en el área de obras principales del Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso, se establece mediante actividades técnico – administrativas orientadas por un profesional responsable de la empresa, que contribuyen al crecimiento de la formación profesional y personal del practicante.

La organización del tiempo en el que se realizó la práctica empresarial inició en un acople a la empresa y al proyecto, tiempo en el cual se adquirieron las responsabilidades de las actividades a realizar, seguido de la recopilación y análisis bibliográficos los cuales se obtuvieron mediante visitas a los frentes principales de obras, como por el análisis de planos, especificaciones técnicas, procedimientos constructivos e información de datos obtenidos en el seguimiento de las obras especialmente del seguimiento llevado a las infiltraciones presentadas en el macizo rocoso, lo que finalmente llevó tanto a un crecimiento de conocimientos profesionales como a la elaboración del artículo final.

En el periodo de práctica se realizaron actividades relacionadas con la ingeniería civil entre las cuales se destacan:

- Seguimiento al proyecto mediante visitas a los frentes de obras principales.
- Trámite interno de correspondencia prioritaria del proyecto.
- Análisis y organización de las modificaciones realizadas a los planos de construcción y obra construida (AS-Built) del proyecto.
- Apoyo en el área de presupuesto.
- Apoyo en la liquidación del contrato de obras principales.

3.1. SEGUIMIENTO AL PROYECTO MEDIANTE VISITAS A LOS FRENTES DE OBRAS PRINCIPALES.

Como en todo proyecto, se debe llevar un seguimiento estricto del avance en el que se encuentra la obra, teniendo en cuenta las actividades realizadas y las que se están ejecutando para con esto plantear la forma de realizar las próximas actividades garantizando el rendimiento y cumplimiento de las fechas requeridas para su finalización; por todo esto durante la práctica se realizaron visitas periódicas a todos los frentes de las obras principales como la Central Subterránea, el Vertedero, la Presa y los depósitos entre otros, con el fin de recopilar información y registros fotográficos, plasmándolos en informes semanales y mensuales de rendimientos y avance de obra, que faciliten a la empresa un control general de la obra.

Entre las actividades realizadas en los frentes de obra, a las cuales se realizó el seguimiento durante la práctica, se destaca la pavimentación de la vía de acceso a la Central Subterránea y a la cresta de la Presa. El procedimiento de pavimentación se realizó por etapas las cuales incluyen actividades previas como la construcción de estructuras para manejo de aguas y la estabilización de los taludes que requieran protección, todo esto para posteriormente proceder a la colocación de la base granular y la capa de rodadura. A continuación se describe el proceso de pavimentación, incluyendo las etapas previas.

- Construcción de estructuras para manejo de aguas

El control de las aguas de escorrentía de la vía es un aspecto muy importante para garantizar su estabilidad, por esto dentro de las actividades preliminares a la pavimentación de una vía se hace necesaria la construcción de cunetas que recojan y canalicen longitudinalmente las aguas superficiales y de infiltración. En la Figura 3 se muestra el seguimiento al proceso de construcción de los canales.

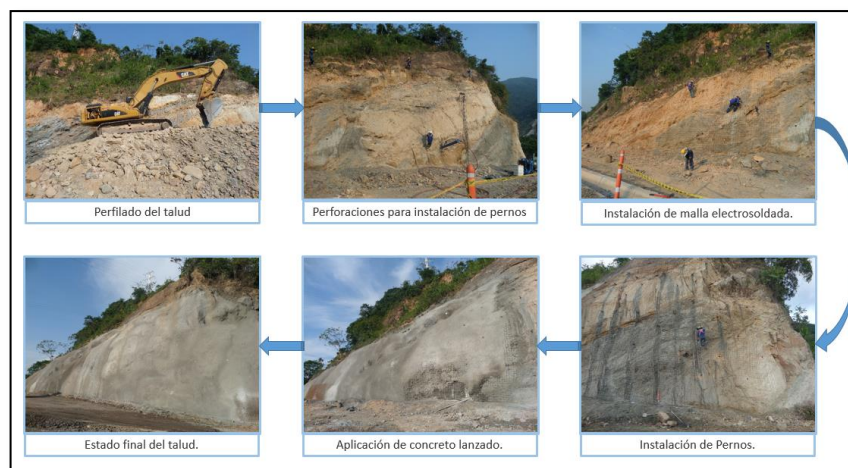
Figura 3. Proceso de construcción de canales para manejo de agua de la vía de acceso a la Central subterránea de Hidrosogamoso.



- Estabilización de taludes

Como parte de las obras que garantizaran la estabilidad de la vía se encuentra el tratamiento que se realiza al material que se encuentra en sus alrededores como lo son sus taludes, por esto se requiere llevar a cabo procesos de estabilización de taludes. En la Figura 4 se muestra el seguimiento al proceso de estabilización de taludes.

Figura 4. Proceso de estabilización de talud en vía de acceso a la Central subterránea de Hidrosogamoso.



- Pavimentación

Posteriormente a los trabajos de estabilización de taludes y la construcción de estructuras para manejo de agua se puede dar paso a la pavimentación de la vía. En la Figura 5 se muestra el seguimiento al proceso de pavimentación de la vía de acceso a la central subterránea.

Figura 5. Proceso de pavimentación de la vía de acceso a la Central Subterránea de Hidrosogamoso.



Durante la práctica se realizaron cerca de 50 visitas a los frentes principales de obra, los cuales sirvieron para la elaboración de 26 informes de reporte de avance de obra.

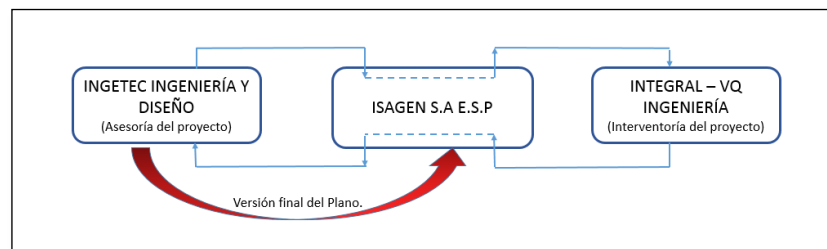
3.2. TRÁMITE INTERNO DE CORRESPONDENCIA PRIORITARIA DEL PROYECTO.

La comunicación entre las empresas que hacen parte del proyecto se realiza por medio de cartas en las cuales se tratan temas correspondientes a estado de las obras, liquidación de cantidades de obra y temas contractuales entre otros. El procedimiento realizado con estas comunicaciones consiste su lectura detallada con el fin de determinar el profesional encargado del seguimiento del tema tratado, para remitirlo a él y que se realice el debido proceso a seguir con la comunicación.

3.3. ANÁLISIS Y ORGANIZACIÓN DE LAS MODIFICACIONES REALIZADAS A LOS PLANOS DE CONSTRUCCIÓN Y OBRA CONSTRUIDA (AS-BUILT) DEL PROYECTO

Los planos son medios de comunicación gráfica, con los cuales se indican las dimensiones, formas y requerimientos necesarios en las estructuras, por esto deben tener una revisión detallada durante su construcción, y al finalizar cada obra se hace necesario registrar en un plano el estado final de la obra construida, ya que en algunas ocasiones al momento de la construcción surgen imprevistos que ocasionan que se realicen algunos cambios a lo planeado inicialmente. La revisión del plano final de obra construida se realiza mediante un ciclo de revisiones en los que participan ISAGEN y la asesoría e interventoría del proyecto, en el cual se llega a un acuerdo conjunto del estado final de plano As Built. Durante la práctica se realizaron los registros de fechas y planos que componen el ciclo de revisiones el cual se describe en la Figura 6.

Figura 6. Ciclo de revisión Planos As Built.



De los cerca de 2500 planos que componen las obras de la central hidroeléctrica Sogamoso, durante la práctica se realizó el seguimiento a la revisión de alrededor de 1500 planos entre los cuales se encuentran tanto las obras principales del proyecto, como planos de la vía sustitutiva Bucaramanga- Barrancabermeja la cual también hizo parte del proyecto

3.4. APOYO EN EL ÁREA DE PRESUPUESTO.

El área de presupuesto es muy importante en toda organización ya que gracias a ella se garantizan los recursos para la ejecución del proyecto. Como parte de la gestión de esta área, se encuentra el control de la ejecución de los recursos financieros. De acuerdo con lo anterior, el apoyo al área de presupuesto durante la práctica consistió en preparar el reporte de los pagos mensuales asociados al

proyecto generados por las distintos equipos del proyecto, como el equipo ambiental, servicios administrativos, ejecución de obras civiles, logística y relaciones en común. Este reporte incluye la comparación del presupuesto que se tenía programado por ejecutar y el ejecutado al finalizar cada mes, permitiendo así a la empresa analizar y determinar con anticipación si se va a presentar un déficit en el presupuesto o si por el contrario está quedando libre parte del presupuesto, con lo cual la organización concluye como conseguirá el presupuesto que hace falta o en que invertirá el presupuesto disponible. Como resultado de esta actividad se generaron 6 reportes correspondientes al primer semestre del año 2015. Estos reportes fueron realizados bajo el manejo del sistema informático SAP "Systems, Applications, Products in Data Processing".

3.5. APOYO EN LA LIQUIDACIÓN DEL CONTRATO DE OBRAS PRINCIPALES

Debido a que la Central Hidroeléctrica Sogamoso ya se encuentra en operación y sus obras principales están terminando por completo se hace necesario liquidar el contrato por el cual se realizaron dichas obras. Las actividades de apoyo a esta liquidación realizadas durante la práctica incluyeron: la revisión de liquidaciones entregadas por el Contratista, el cálculo de cantidades de materiales, la verificación de la veracidad de la información entregada por este y el seguimiento del avance del proceso de liquidación por cada frente, tabulándolo en un cuadro para que se pueda detallar de una manera sencilla el avance en el proceso. Los resultados de esta actividad se sintetizan en una tabla con la cual se realiza el seguimiento al proceso de liquidación (Figura 7).

Figura 7. Tabla de seguimiento al proceso de liquidación

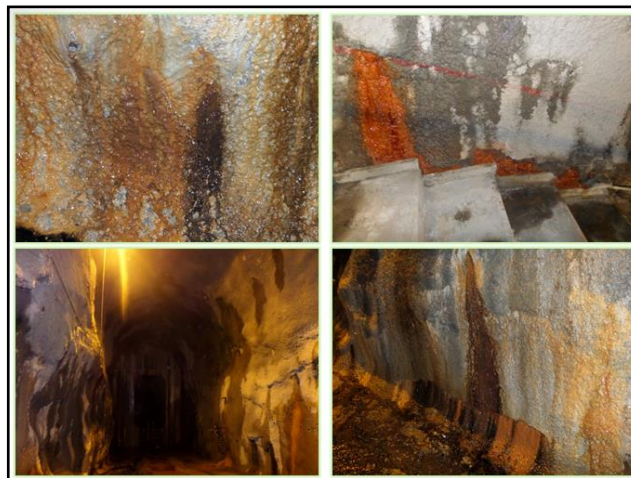
Código de Proyecto	Código de Actividad	Descripción de la actividad	Fecha de inicio	Fecha de término	Estado	Código de actividad	Código de actividad	Código de actividad	Código de actividad	Resumen de ejecución		Resumen de ejecución		Resumen de ejecución		Resumen de ejecución		
										Saldo	Fecha de revisión	Observaciones	Cuota de obra					
41	01	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	28-mar-14	31-mar-14														
42	02	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
43	03	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
44	04	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
45	05	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
46	06	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
47	07	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
48	08	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
49	09	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
50	10	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
51	11	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
52	12	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
53	13	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
54	14	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
55	15	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
56	16	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
57	17	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
58	18	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
59	19	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
60	20	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
61	21	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
62	22	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
63	23	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
64	24	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
65	25	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
66	26	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
67	27	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
68	28	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
69	29	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
70	30	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
71	31	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
72	32	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
73	33	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
74	34	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
75	35	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
76	36	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
77	37	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
78	38	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
79	39	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
80	40	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
81	41	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
82	42	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
83	43	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
84	44	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
85	45	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
86	46	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
87	47	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
88	48	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
89	49	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
90	50	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
91	51	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
92	52	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
93	53	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
94	54	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
95	55	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
96	56	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
97	57	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
98	58	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
99	59	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														
100	60	Trabajo de apoyo a la ejecución de obra	27-mar-14	31-mar-14														

4. INFILTRACIONES EN EL MACIZO ROCOSO DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

Las Centrales Hidroeléctricas son obras diseñadas para la generación de energía eléctrica, en las que su funcionamiento se basa en la transformación de energía potencial del agua captada de un embalse a energía cinética que se utiliza para impulsar los rodetes de las turbinas, produciendo energía mecánica; la cual se transforma nuevamente a través de los generadores de energía en energía eléctrica [4]. Debido a que para la generación de energía se necesita contar un nivel apreciable de agua permanentemente, se hace necesaria la construcción de una presa que acumule el agua que fluye por un río formando un embalse, con el fin de que garantice contar siempre con agua en el sitio de generación.

En el macizo rocoso que rodea una presa pueden presentarse infiltraciones causadas por la escorrentía de la zona y por el contacto directo con el embalse. Si estas filtraciones de agua a través de los suelos no son tratadas adecuadamente, pueden ser muy perjudiciales para la estabilidad de algunas obras de la central hidroeléctrica ya que puede llegar a debilitar las estructuras. En este sentido, el análisis de cuanto puede llegar a infiltrarse aporta información fundamental para tomar medidas preventivas. Las medidas preventivas pueden incluir la implementación de cortinas de drenaje, cortinas de inyección y de ser necesaria la construcción de pantallas cortaflujo, para garantizar la integridad de la estructura. La Figura 8 muestra las infiltraciones presentadas en la Central Subterránea Sogamoso.

Figura 8. Infiltraciones presentadas en la central subterránea de Hidrosogamoso



4.1. Aspectos geológicos

La conformación de la geología del terreno es un aspecto fundamental en la determinación de la capacidad de infiltración de una zona, ya que la composición del suelo definirá la manera en que se comportara el material al estar en contacto con un fluido, determinando si éste es susceptible al paso de los fluidos por sus poros, o por el contrario si está compuesto de materiales poco permeables que se opondrán al paso de agua a través de él. Debido a esto la construcción de obras que estarán en contacto directo con un fluido, requiere llevar a cabo ensayos de permeabilidad que determinen la capacidad de infiltración de este, sirviendo de apoyo para deducir las medidas necesarias para controlar estas infiltraciones en la obra y garantizar la estabilidad de la estructura. A continuación se describen aspectos importantes como la permeabilidad y los ensayos de permeabilidad, los cuales permiten caracterizar el terreno por zonas muy permeables, permeables o poco permeables, y con esto determinar qué tan intensivas deben ser las medidas para disminuir las infiltraciones.

4.1.1. Permeabilidad del Suelo.

La permeabilidad del suelo indica si este tiene la capacidad de permitir que fluidos atraviesen su estructura, lo cual está directamente relacionado con la porosidad del material, ya que es por estos poros por donde se da paso a un fluido para que circule por su interior.

4.1.1.1. Permeabilidad del suelo según su textura

La permeabilidad de un suelo depende de su textura. La distribución y proporción en la que se encuentran las partículas de un suelo indican la clasificación de textura en este, representada por el porcentaje de arena, arcilla y limo [5]. Una de las formas para determinar la textura de un suelo es la utilización de triángulo de texturas de suelo como el ilustrado en la Figura 9. Este es un triángulo equilátero dividido en casillas que indican las clases de textura, determinadas con el porcentaje de arena limo y arcilla que están indicados en sus lados. Para la utilización de este triángulo se requiere que previamente se realice una clasificación granulométrica del material del suelo.

en láminas; ii) en bloque en el que las partículas se congregan en unidades casi cuadradas con bordes pronunciados; iii) prismática, donde las partículas se adicionan en columnas separadas por fisuras diminutas; y iv) granular, en el que las partículas individuales de arenas limo y arcilla se aglomeran en forma de granos casi esféricos [5].

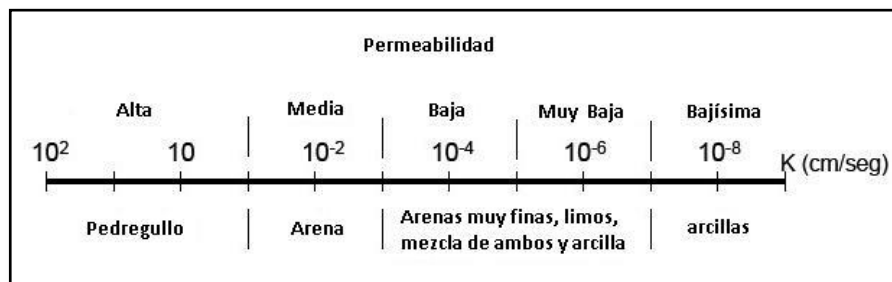
La estructura del suelo es otro factor que demarca su capacidad de infiltración, debido a que según su distribución el material puede adquirir mayor porosidad si se encuentra en estructura granular, lo que no sucede para estructuras laminares en la que las láminas se pueden traslapar impidiendo el paso de agua a través de ellas. La permeabilidad del suelo se incrementa a medida que aumenta la porosidad y esta aumenta con la separación del material, por tanto la infiltración va creciendo de laminar, en bloque, prismática y granular; siendo la estructura laminar la menos permeable y la granular la más permeable [5].

4.1.2. Ensayos de Permeabilidad

La permeabilidad de un suelo se puede establecer realizando diferentes ensayos que permitan conocer el coeficiente de permeabilidad representado por la letra K. A partir de este coeficiente y con base a estudios realizados se encuentran rangos que definen valores medios en los que el suelo cuenta con alta o poca infiltración. En la Figura 10 se ilustra la variación de la permeabilidad para cada tipo de suelo.

Entre los ensayos de permeabilidad más conocidos se destacan el de Lefranc y el de Lugeon, que se describen a continuación.

Figura 10. Permeabilidad.



Fuente: Mecánica de suelos – Permeabilidad [En línea] <http://fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/fuerzas/mecanica-de-suelos-permeabilidad> [Citado el 22 de abril de 2015]

4.1.2.1. Ensayo de permeabilidad de Lefranc

El ensayo de Lefranc es una de las técnicas comúnmente usadas para medir el coeficiente de permeabilidad de los suelos permeables o semi-permeables, de estructura granular que se encuentran debajo del nivel freático y rocas muy fracturadas. Este ensayo se puede realizar bajo el procedimiento de carga hidráulica constante o con carga hidráulica variable. Para la realización de este ensayo se requiere realizar un sondeo el cual previamente se llene con agua, para verificar la expulsión de aire y se establezca la velocidad de descenso de esta [6].

- Ensayo con carga hidráulica constante: Este ensayo consiste en realizar un sondeo a una longitud y sección transversal determinada, colmarlo de agua, la cual al estar en un medio poroso se empezara a perder por las fisuras del suelo provocando un descenso en el nivel inicial de agua, por lo cual se bombea agua a este para mantener constante su nivel en un mismo punto, conjuntamente se van realizando las medidas de caudal bombeado el cual será necesario para la determinación del coeficiente de permeabilidad. Para la realización de este ensayo se trabaja con la hipótesis de se trata de un flujo laminar, el medio isotrópico y homogéneo, y se trata de un régimen permanente [6].

El coeficiente de permeabilidad se obtiene con la siguiente ecuación:

$$K = \frac{Q}{C * H} [cm/s]$$
$$C = \frac{2\pi L}{\ln(\frac{L}{R})} [cm]$$

Dónde:

Q = Caudal bombeado [cm³]

H = Distancia de la superficie de agua hasta el nivel freático. [cm]

C = Coeficiente de forma de la cavidad

L = Longitud de tramo filtrante [cm]

R = Radio del sondeo [cm]

- Ensayo con carga hidráulica variable: Este ensayo es utilizado en suelos poco permeables. Al igual que el ensayo de carga hidráulica constante se realiza un sondeo con longitud y sección trasversal determinada para proceder a llenarlo de agua, y a medida que ocurre la pérdida de agua por infiltración se realiza el registro de la variación del nivel piezómetro con la variación de tiempo en el

que se obtuvo el cambio de altura de un nivel h_1 a un nivel h_2 . La obtención del coeficiente de permeabilidad se consigue con la siguiente expresión:

$$K = \frac{2\pi R}{C * (t_2 - t_1)} * \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) [cm/s]$$

Donde

$t_1 =$ Tiempo inicial [segundos]

$t_2 =$ Tiempo final [segundos]

$h_1 =$ Altura inicial [centímetros]

$h_2 =$ Altura final [centímetros]

4.1.2.2. Ensayo de Permeabilidad de Lugeon

El ensayo de permeabilidad de Lugeon es uno de los ensayos más comunes para la medición de permeabilidad en macizos rocosos que estarán en contacto con un embalse. Este ensayo consiste en medir el caudal que puede ser inyectado en una longitud definida con un caudal y una presión determinada. El procedimiento a seguir es realizar un sondeo en el macizo rocoso en lugares donde se requiera medir la permeabilidad, esta perforación debe ser limpiada cuidadosamente con agua y aire a presiones menores de 1Mpa, esto con el fin de remover sedimentos o cualquier partícula que pueda quedar al interior de la perforación. Este lavado se debe realizar hasta que el agua retorne completamente limpia, por lo general de 3 a 5 minutos, continuamente se rodea la perforación en su parte inferior y superior por un sello neumático, y se procede a bombear agua limpia, registrando las medidas tomadas por el manómetro y caudalímetro, ya que con estos datos se determinara el coeficiente de permeabilidad. La ejecución de estas pruebas se realiza variando las presiones de bombeo y registrando para cada presión un caudal correspondiente, al realizar el cambio de presión se debe esperar que el flujo de agua se comporte de una manera constante y desde ahí mantener el bombeo de agua el tiempo determinado en la Tabla 2 [7].

Tabla 2. Variación de la presión durante el ensayo de Lugeon. [7]

Presión (P)	Tiempo transcurrido (minutos)
$P_1 = P/4$	5
$P_2 = P/2$	5
$P_3 = P$	5
$P_2 = P/2$	5
$P_1 = P/4$	5

Fuente: Especificaciones técnicas proyecto Sogamoso. Capítulo 10.

Lo parámetros para determinar el coeficiente de permeabilidad se tomaran cuando se cuente con una presión estable. En general se usa una presión máxima de 10 bares para profundidades mayores a 15 metros y 5 bares para menores de 15 metros; en la Tabla 3 se define una clasificación de macizos rocosos en función de la permeabilidad la cual en este proyecto hidroeléctrico Sogamoso se consideró de 4 Lugeon [8].

Tabla 3. Clasificación de macizos rocosos en función de su permeabilidad. [8]

Tipo de Macizo rocoso	Unidades Lugeon	Presión (bares)
Muy impermeable	0-1	10
Prácticamente impermeable	1-3	10
Permeable	3-10	10
	1.5-6	5
Muy permeable	>10	10
	>6	5

Fuente: GIANCONI, Luis. Criterios conceptuales del análisis geotécnico de macizos rocosos utilizados para la construcción de una presa de gravedad en hormigón en la cuenca del ramal.

La determinación del coeficiente de permeabilidad se realiza con la siguiente relación:

$$K = \frac{Q}{2\pi LH_t} * \ln\left(\frac{L}{R}\right) [cm/s]$$

Donde

$$Q = \text{Caudal inyectado} \left[\frac{cm^3}{s}\right]$$

$$L = \text{longitud de la perforacion inyectada} [cm]$$

$$R = \text{radio de la perforacion} [cm]$$

$$H_t = \text{Presion de Sobre carga} [cm]$$

$$1 \text{ lugeon} = 1 \frac{Lt}{min}$$

4.2. Infiltraciones generadas por el embalse

Generalmente en un embalse se presentan pérdidas en el nivel del agua, debidas a la evaporación y a las infiltraciones ocasionadas en el macizo rocoso, las cuales dependen de características como el nivel y el periodo crítico del embalse. A continuación se describen los volúmenes característicos de embalse los cuales sirven para determinar el caudal teórico de infiltración como un análisis de la relación que se presenta entre el nivel del embalse y caudal de infiltración real.

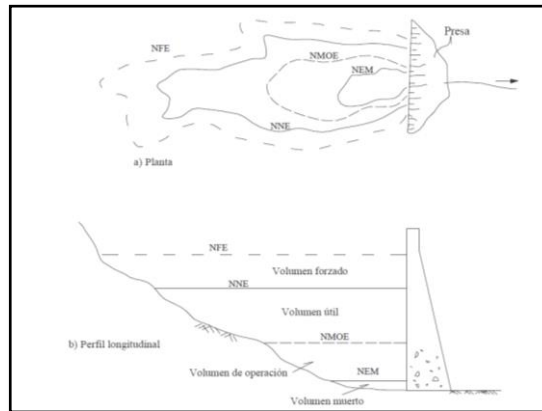
4.2.1. Volúmenes característicos de un embalse

El volumen total que conforma un embalse normal, lo compone la suma del volumen muerto, volumen de operación, volumen útil y volumen forzado; los cuales se describen a continuación de acuerdo a lo planteado por Guevara en Estructuras Hidráulicas Embalses [9].

- Volumen Muerto: Es el volumen mínimo que debe contener el embalse, el cual sea capaz de cubrir el espesor de sedimentos generados por el área de suelo inundada.
- Volumen de operación: Es el volumen necesario para la operación normal de la Central Hidroeléctrica.
- Volumen útil: Es el volumen el cual puede abastecer tanto el correcto funcionamiento de la Central Hidroeléctrica como suministros de agua o irrigación (Cuando aplique).
- Volumen forzado: Es el volumen que sobrepasa los niveles necesarios para el funcionamiento de la Central Hidroeléctrica y genera su evacuación por el vertedero de excesos, ya que este se presenta por crecientes del río.

En la Figura 11 se representan los niveles característicos de un embalse, y en la Tabla 4 se definen los niveles del embalse Topocoro de Hidrosogamoso.

Figura 11. Representación de los niveles característicos de un embalse



Fuente: Estructuras hidráulicas. Embalse. M. E. Guevara.

Tabla 4. Volúmenes Característicos embalse Hidrosogamoso

Volumen total	4 813' 450 412 m3
Volumen muerto	100' 000 000 m3
Volumen de operación	2 091' 540 407 m3
Volumen Útil	2 721' 910 004 m3
Volumen Forzado	> 4 813' 450 412 m3

4.2.2. Calculo teórico de infiltraciones

Las infiltraciones producidas en el macizo rocoso a causa del contacto con el embalse son directamente proporcionales al volumen útil de embalse, al porcentaje de infiltración característico del suelo y al periodo crítico [10]. Las infiltraciones se pueden determinar por medio de la siguiente ecuación:

$$V_{inf}: (\% \text{ infiltracion mensual}) * C * V_{util} [m^3/mes]$$

Donde:

C: periodo critico [meses]

V_{útil}: Volumen útil del embalse [m³]

% infiltracion mensual, depende de la permeabilidad del suelo (tabla 3)

El porcentaje de infiltración mensual depende de la permeabilidad del suelo y se define a partir de la Tabla 5.

Tabla 5. Perdidas por infiltración en el embalse.

Suelos del embalse	Infiltración mensual (%)
Impermeable	1
Regular permeable	1.5
Permeable	2 a 5

Fuente: Villamizar C., A. 1989

4.2.3. Medición de infiltraciones

Así como se estiman caudales de infiltración a partir de fórmulas teóricas, se deben realizar mediciones que permitan conocer la realidad de lo que se está infiltrando a través del macizo rocoso para poder llevar un control detallado y tomar las medidas preventivas necesarias. La estimación de los caudales de infiltración al interior de las obras principales de una central hidroeléctrica se realiza mediante estructuras que permitan el aforo de estos caudales en cualquier momento.

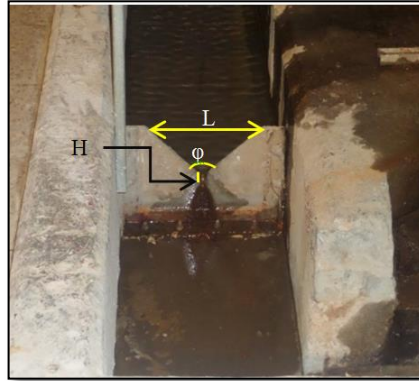
Las estructuras más usadas y confiables para la medición de estos caudales son los vertederos de aforo, los cuales pueden ser de forma rectangular, trapezoidal o triangular. Estos vertederos se localizan en los canales que reciben el agua de infiltración, junto con miras que permiten conocer la altura de la lámina de agua. Con estas estructuras se realizan mediciones periódicas de los niveles de agua a partir de los cuales según la forma del vertedero se calcula el caudal de infiltración [11], siguiendo los parámetros de la Tabla 6.

Tabla 6. Ecuaciones para cálculo de caudales en diferentes tipos de vertederos. [11]

Tipo de Vertedero	Ecuación
Rectangular con contracción	$Q = 1.83 * L * H^{1.5}$
Rectangular sin contracción	$Q = 3.3 * L * H^{1.5}$
Triangular $\varphi: 90^\circ$	$Q = 1.4 * H^{2.5}$
Triangular $\varphi: 60^\circ$	$Q = 0.775 * H^{2.47}$
Trapezoidal	$Q = 1.859 * L * H^{1.5}$
Q = Caudal [m ³ /s], L= Longitud cresta del vertedero[m], H= Altura de lámina de agua [m]	

En la Figura 12 se muestra un vertedero de aforo triangular de $\phi=90^\circ$, instalado en la Caverna de Transformadores en la central hidroeléctrica Sogamoso.

Figura 12. Vertedero de aforo Caverna de transformadores Central Hidroeléctrica Sogamoso



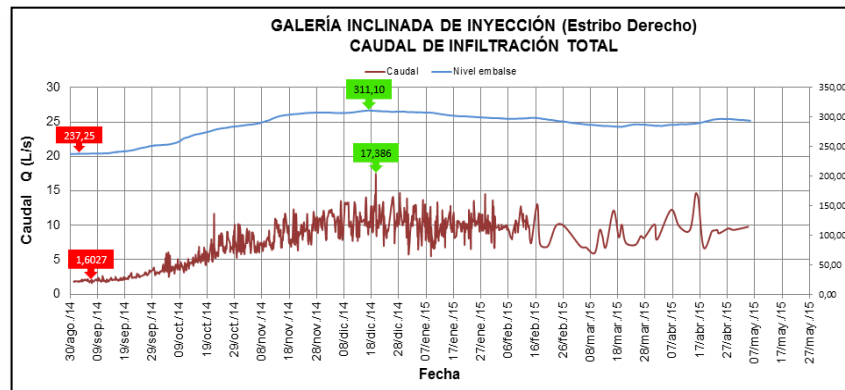
Fuente: Registro fotográfico ISAGEN S A E S P

Los valores de altura de lámina de agua y caudal de infiltración son registrados en tablas de aforo con el fin de realizar seguimiento a estos caudales.

4.2.4. Comparación del nivel embalse y Caudal de infiltración.

En la Figura 13 se muestra una gráfica donde se ilustra la variación del caudal de infiltración a medida que cambia el nivel del embalse a partir de datos tomados en una de las galerías de inyección de la central hidroeléctrica Sogamoso.

Figura 13 Infiltraciones en galería inclinada de inyección Central Hidroeléctrica Sogamoso.



Fuente: INGETEC INGENIERÍA Y DISEÑO

Se puede observar que la gráfica de caudal de infiltración junto con la del nivel del embalse tiene la misma tendencia, es decir que los caudales de infiltración ascienden a medida que sube el nivel del embalse y disminuyen a medida que baja su nivel.

De la gráfica también se puede extraer que los niveles máximos y mínimos no se presentan el mismo día, por lo cual el caudal máximo de infiltración se presenta unos días después del nivel máximo del embalse para este periodo de tiempo. Esto se debe a que el agua tarda un periodo de tiempo en llegar desde el lugar del macizo en el cual se infiltró hasta los vertederos de aforo. En la Tabla 7 se indican los caudales de infiltración y niveles del embalse máximos y mínimos para el periodo de tiempo comprendido entre agosto de 2014 y mayo de 2015.

Tabla 7. Máximos y mínimos Caudales de infiltración y niveles del embalse, de agosto 2014 a mayo 2015, en la Central Hidroeléctrica Sogamoso

Max/Min	Nivel del Embalse	Caudal de infiltración
Máximos	311.10	17.39 L/s
	16-dic-14	19-dic-14
Mínimos	237.25	1.60 L/s
	30-ago-14	06-sep-14

4.3. Tratamiento de infiltraciones en el macizo rocoso de una central hidroeléctrica

El macizo rocoso que rodea la presa y demás estructuras de una Central Hidroeléctrica son susceptibles al flujo de agua a través de sus poros, debido a la gran cantidad de agua con la que tiene contacto durante el funcionamiento de la central. Sin los tratamientos y control adecuado esto puede llegar a ser peligroso para la estabilidad de la presa ya que si la cantidad de agua infiltrada que llega hasta ella supera los límites permisibles, se pueden generar fallas estructurales dentro de la misma. Por todo esto se hace necesario llevar a cabo un control mediante procedimientos que permitan validar que el agua filtrada por el macizo se encuentra dentro de los límites permisibles.

Un procedimiento comúnmente usado en la impermeabilización de un macizo es el tratamiento de la fundación mediante inyecciones de lechada para obstruir el paso de agua a través de los poros del macizo. En otras condiciones donde el terreno lo amerite, por ejemplo cuando se cuente con un macizo muy permeable, se requiere

que adicionalmente se construyan estructuras que garanticen la impermeabilización del terreno construyendo una pantalla corta flujo. A continuación se describen estos dos procedimientos: inyecciones y pantalla cortafujo realizadas para mitigar las infiltraciones en las obras principales de una central hidroeléctrica

4.3.1. Inyecciones

La ejecución de inyecciones es un procedimiento que incrementa la resistencia del macizo rocoso aumentando su capacidad portante y consolidando las rocas altamente fracturadas, además disminuye la permeabilidad del terreno mejorando las condiciones mecánicas del medio inyectado. Estas características hacen de este un método muy utilizado en lugares donde se presenten infiltraciones [12].

En primer lugar el procedimiento prevé una fase de planeación en la cual se realiza un estudio geotécnico que caracterice el terreno que se va a inyectar, permitiendo con esto la obtención del índice de permeabilidad, grado de fracturación de la roca, calidad del macizo rocoso y descripción de las discontinuidades. Después de conocer la composición del terreno se puede realizar el diseño de inyección definiendo la ubicación exacta de cada perforación, el número de huecos con su profundidad e inclinación, al igual que el espacio requerido entre perforaciones, y las características de la mezcla a inyectar, la cual depende de la composición del terreno y el requerimiento según la estructura en la cual se va a usar. Una vez definidos todos estos parámetros se puede llegar a elaborar las inyecciones, procedimiento que posteriormente debe ir acompañado de una evaluación de su eficiencia por pruebas de permeabilidad que establezcan si es necesario una reinyección en caso de que con esta no se alcanzaran los resultados esperados de permeabilidad [13]. Existen varios tipos de tratamiento de impermeabilización mediante inyecciones, los cuales se describen a continuación, de acuerdo a lo planteado por Pablo Giordano en Tratamiento de fundaciones - Inyecciones [14]:

4.3.1.1. Tipos de tratamiento de impermeabilización mediante inyecciones

- Cortina de inyecciones: Consiste en inyecciones distribuidas en dirección normal al flujo del agua, las cuales se pueden realizar mediante una o varias líneas con inclinaciones definidas en el diseño, y estas obstruyen el paso el agua; generalmente son usadas para disminuir las filtraciones por debajo de la presa.

- Inyecciones de área: Son inyecciones realizadas para aumentar la capacidad de soporte del macizo rocoso, o mejorar la impermeabilización en una zona que presenta un gran deterioro en el material que la conforma y que con la cortina de inyecciones no se pudo alcanzar el grado de impermeabilización requerido.
- Inyecciones de contacto: son inyecciones realizadas en las juntas que se generan entre estructuras de concreto y la superficie con la que se encuentra en contacto, debidas a la contracción del concreto durante el fraguado, y tienen el objetivo de sellar posibles zonas de filtraciones.

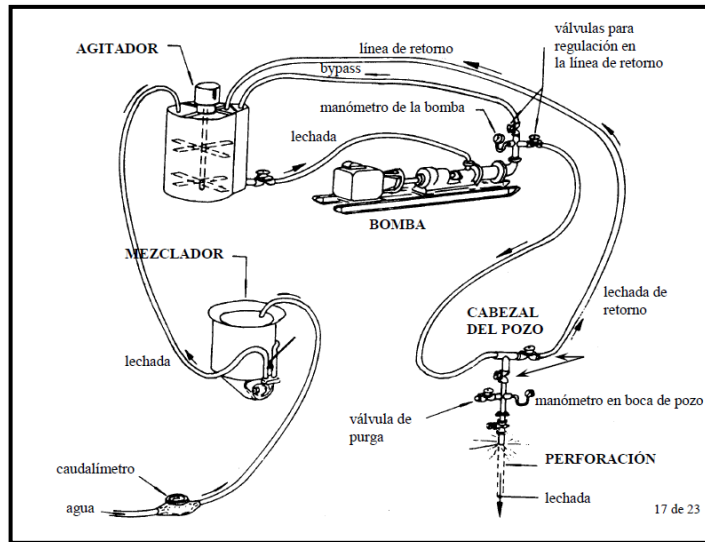
4.3.1.2. Métodos de inyección

La ejecución de las inyecciones puede llevarse a cabo, de diferentes maneras las cuales se describen a continuación de acuerdo a lo planteado por Pablo Giordano en Tratamiento de fundaciones- Inyecciones [15].

- Inyecciones por etapas o descendente: En este método se realiza la perforación e inyección de manera paralela, por zonas y en forma descendente hasta alcanzar la longitud requerida del pozo a inyectar. Al finalizar las inyecciones de cada zona se debe realizar un lavado de la lechada aproximadamente a los 120 minutos después de terminada la inyección.
- Inyecciones en estación o ascendentes: En estas inyecciones inicialmente se realiza la perforación total del pozo a inyectar, en el cual de manera ascendente y por zonas se comienza a ejecutar la inyección de lechada, generalmente se debe esperar un tiempo aproximado de seis horas para continuar las inyecciones al finalizar cada zona.
- Inyecciones a gravedad: En este método de inyección se realiza la profundidad total del pozo a inyectar, y se introduce un tubo en el cual se bombea lechada a una presión similar a la presión atmosférica y a medida que se va inyectado se comienza a subir la tubería de inyección, esta técnica es usada en macizos que presentan grandes fisuras y la lechada circula fácilmente.

En la Figura 14 se muestran los equipos utilizados en el proceso de inyección.

Figura 14. Equipos de inyección

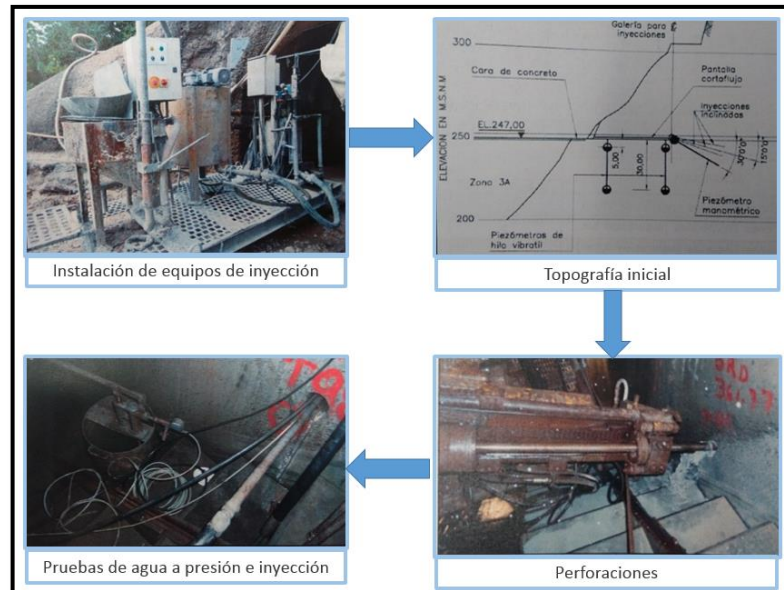


Fuente: GEOTECNIA. Tratamiento de fundaciones. I. Inyecciones

4.3.1.3. Descripción del proceso de inyección

El procedimiento de inyección consiste en la perforación de diferentes huecos ya determinados en el diseño, que pueden ser primarios secundarios y terciarios, definiendo la secuencia de inyección, en los que se comienza realizando pruebas de agua a presión manteniendo presiones menores a 1 Mpa, con el fin de extraer sedimentos lodo o cualquier partícula que se encuentre al interior del hueco y de definir la permeabilidad en esa zona. Este lavado se hace hasta que el agua retorne totalmente limpia, todo esto para dar paso a la inyección de lechada con una mezcla homogénea de agua arena y/o aditivos. Paralelamente a esta actividad se realizan registros de caudal, volumen inyectado, penetrabilidad y presión, que ayuden al análisis del procedimiento de inyección [16]. En la Figura 15 se describe el proceso de inyección realizado en la central hidroeléctrica Sogamoso.

Figura 15. Descripción del proceso de inyección



4.3.2. Pantalla cortaflujo

La pantalla corta flujo es una estructura de impermeabilización utilizada en presas donde la calidad del macizo no cumpla los requisitos de permeabilidad [17]. Esta pantalla impide que el flujo de agua que circula por el macizo adyacente a la estructura, atraviese la presa. La central hidroeléctrica Sogamoso cuenta con la primera pantalla corta flujo inclinada en el mundo, con un espesor de 1 metro y una profundidad hasta de 51 metros incrustada en la roca. A continuación se encuentra una descripción del proceso constructivo de la pantalla Corta flujo de la Central Hidroeléctrica Sogamoso.

4.3.2.1. Procedimiento constructivo de la Pantalla Cortaflujo

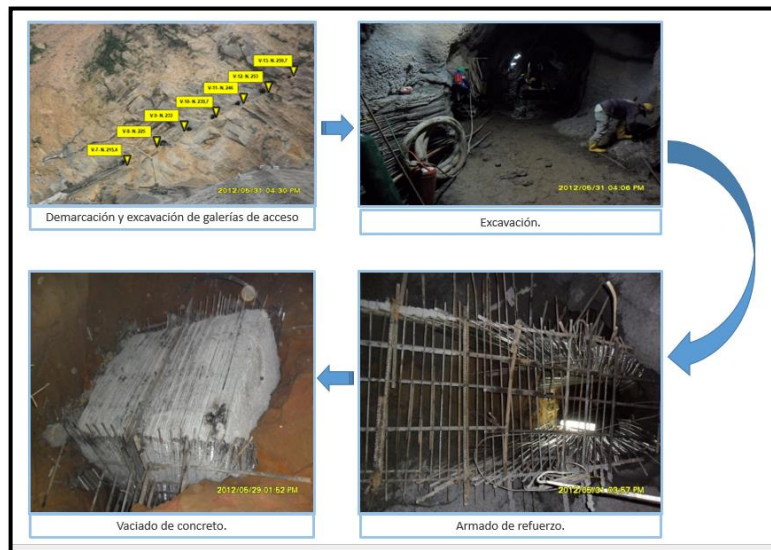
Para la construcción de la pantalla cortaflujo inicialmente se necesitó una demarcación topográfica que indicó los puntos de trazado y perforación, el alineamiento de las excavaciones se realizó mediante sistemas de alineación con puntería laser, el cual consiste en un rayo de luz que marca la distancia y el punto

exacto de excavación, lo cual permite mayor exactitud aumentando la confiabilidad del trazado.

Al contar con la topografía se ejecutaron las excavaciones las cuales se realizaron de forma ascendente con ayuda de voladura, al concluir la excavación se trabajó en el vaciado de concreto de la longitud excavada, y se continuó con la excavación de las siguientes zonas, manteniendo una longitud mínima de dos metros entre trabajos de excavación y hormigonado, realizando el hormigonado en zonas de tres a diez metros dependiendo de las condiciones del terreno.

El método de voladura usado fue el de voladura controlada tersa o lisa (smooth blasting) que consiste en perforaciones en la roca con longitudes que dependen de la geología y condiciones del sitio, las cuales serán limpiadas con aire a presión hasta que quede limpia y libre de detritos, continuamente se procede a la instalación del explosivo, que luego de comprobar todas las medidas de seguridad se efectuará la voladura. En la Figura 16 se describe el proceso de construcción de la pantalla corta flujo [17].

Figura 16. Descripción del proceso de construcción de Pantalla cortaflujo



Fuente: Integral VQ Ingeniería.

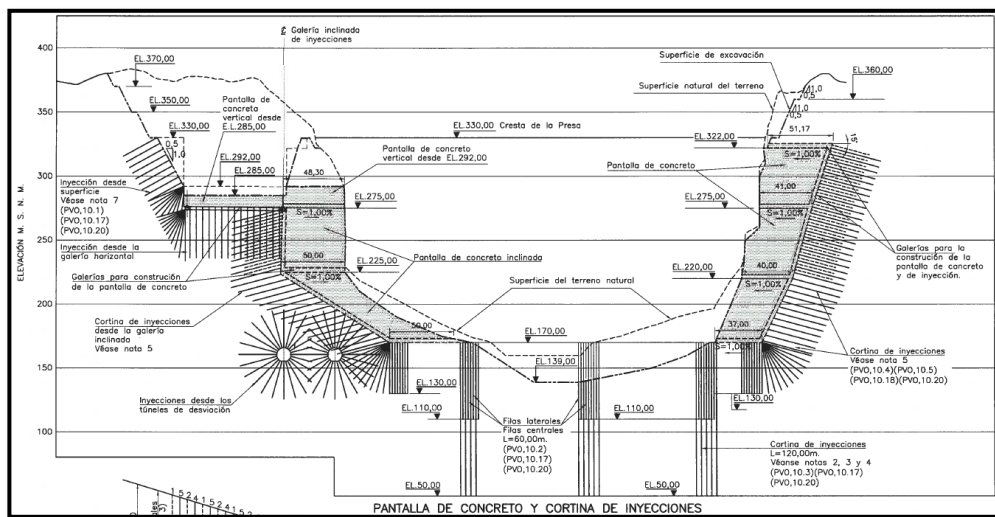
4.3.2.2. Inyecciones en la pantalla cortaflujo

El igual que en los túneles en la pantalla cortaflujo se presentan oquedades entre el concreto y la superficie del terreno donde se encuentra, generadas por la

contracción del concreto en su fraguado y a las irregularidades de la roca, las cuales son necesarias completar con lechada para aumentar la estabilidad en la estructura. El complemento de estas oquedades se realiza mediante inyecciones de contacto a través de la inyección de lechada que es una mezcla homogénea de cemento, agua, bentonita, micro-sílice, aditivos y eventualmente arena.

El procedimiento llevado a cabo en las inyecciones de contacto de la pantalla cortaflujo consiste en al finalizar la excavación realizar la limpieza de la zona, que permita un análisis previo del área a vaciar determinando irregularidades en la roca, y se proceda a colocar mangueras sobre estas irregularidades por las cuales se ejecutaran las inyecciones de contacto, estas inyecciones de contacto entre el concreto de la pantalla y la roca deberán programarse mínimo para una semana después de concluido el vaciado de la pantalla[18].

Figura 17. Pantalla cortaflujo y Cortina de inyecciones



Fuente: ISAGEN S.A E.S.P

5. CONCLUSIONES

En cuanto al conocimiento sobre las infiltraciones en el macizo rocoso de una central hidroeléctrica puede concluirse que:

- Las infiltraciones en el macizo rocoso de una central hidroeléctrica se deben a la escorrentía de la zona y al contacto directo con el embalse, manteniendo una relación directamente proporcional a la porosidad del suelo o roca en la cual se encuentren las obras, ya que el flujo del agua se da a través de estos poros.
- La permeabilidad depende de características físicas del suelo como su textura y estructura, siendo los suelos de textura arcillosa o estructura laminar los de menos permeabilidad o capacidad de infiltración.
- En obras en las cuales existe riesgo inminente de infiltración de agua como lo son las centrales hidroeléctricas se requiere la ejecución de ensayos de permeabilidad que muestren que tanto puede llegar a infiltrarse y con esto buscar soluciones para mitigar estas infiltraciones. Así mismo, se debe contar con mediciones permanentes de las infiltraciones generadas antes durante y después del llenado del embalse.
- El caudal de infiltración generado en una central hidroeléctrica es directamente proporcional al nivel del embalse con el que esta cuenta.
- Al conocer la capacidad que tendrá el embalse es posible estimar un caudal de infiltración a partir del volumen útil de este, el cual por lo general es mayor al caudal de infiltración que se genera en realidad, ya que este caudal teórico no tiene en cuenta los tratamientos realizados al macizo rocoso para mitigar las infiltraciones, como lo son las inyecciones.
- Es importante que en diseño y planeación de una central hidroeléctrica se encuentren contemplados los tratamientos para las infiltraciones en el macizo rocoso como lo son la implementación de una cortina de inyecciones, inyecciones de contacto, inyecciones de área y de ser necesaria la construcción de una pantalla cortaflujo.

En cuanto a las actividades asignadas durante la práctica, tales como: El seguimiento al proyecto mediante visitas a los frentes de obra principales, el trámite interno de correspondencia prioritaria, el análisis y organización de las modificaciones realizadas a los planos de construcción y obra construida As Built, el apoyo en el área de presupuesto y en la liquidación del contrato de obras principales. Estas pudieron cumplirse de manera eficaz, logrando un crecimiento profesional y personal. En particular:

- El seguimiento a las actividades pendientes en obra, llevo a la ampliación del conocimiento tanto de procesos constructivos como de temas contractuales.
- Se realizó eficientemente el trámite de correspondencia prioritaria, generando que la información se impartiera de una forma rápida y organizada.
- Con la actualización oportuna de los cuadros de control de planos As Built, se permitió que su proceso de revisión, fuera controlado y ágil.
- El apoyo en el área presupuesto generó un aprendizaje en el uso del programa SAP, realizando los reportes de caja durante el primer semestre del año, en el cual se realizaron comparaciones entre el presupuesto programado y el ejecutado.
- Se estableció un apoyo al proceso de liquidación mediante la revisión de liquidaciones de los frentes de obra, y el control del proceso, el cual se registró satisfactoriamente durante el periodo de práctica.

REFERENCIAS.

- [1] GONZÁLES MARTÍNEZ, Arsenio. Hidráulica del macizo rocoso. Universidad de Huelva España, 2005. P 1.
- [2] ISAGEN S.A E.S.P. Central Hidroeléctrica Sogamoso [En línea] <https://www.isagen.com.co/nuestra-empresa/generacion-de-energia/> [Citado el 02 de marzo de 2015].
- [3] ISAGEN S.A E.S.P. Central Hidroeléctrica Sogamoso [En línea] <https://www.isagen.com.co/nuestra-empresa/generacion-de-energia/generacion-hidroelectrica/central-hidroelectrica-sogamoso/> [Citado el 02 de marzo de 2015].
- [4] SÁNCHEZ SÁNCHEZ, Pável de Jesús. Inspección y mantenimiento básicos para Centrales Hidroeléctricas: Universidad Nacional Autónoma de México, 2012. P 25
- [5] EDUCARM. Propiedades físicas del suelo [En línea] http://servicios.educarm.es/templates/portal/ficheros/websDinamicas/20/suelos_tema_2..pdf [Citado el 19 de marzo de 2015]
- [6] SÁNCHEZ SAN ROMAN, Javier. Medidas Puntuales de Permeabilidad. Universidad Salamanca, 2011. p 15
- [7] QUIROZ, Diego. Instructivo técnico de la cortina de inyecciones de la presa del proyecto hidroeléctrico Sogamoso. 2014 P 38
- [8] GIACONI, Luis, GUICHON, Martin, GIORDANO, Ricardo, CUMBA, Andrea. Criterios conceptuales del análisis geotécnico de macizos rocosos utilizados para la construcción de una presa de gravedad en hormigón en la cuenca del Ramal. 2010 P 4.
- [9] ME. GUEVARA. Estructuras hidráulicas embalses.1998. p 6.
- [10] ME. GUEVARA. Estructuras hidráulicas embalses.1998. p 24.
- [11] IDEAM. Toma de muestras de aguas residuales.2007 p 9.
- [12] ALTUNA, Alfredo. Minería y Medio Ambiente. En: Tratamiento en fundaciones de presas con inyecciones. Febrero- Marzo 2009. No 3.
- [13] QUIROZ, Diego. Instructivo técnico de la cortina de inyecciones de la presa del proyecto hidroeléctrico Sogamoso.p25.

- [14] GIORDANO Pablo. Tratamiento de Fundaciones – Inyecciones 2005. P 5-8.
- [15] GIORDANO Pablo. Tratamiento de Fundaciones – Inyecciones 2005. P 10.
- [16]GRUPO ICT II. Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso Presa Vertedero y Obras Subterráneas. Procedimiento para la inyección de cortina. Rev. 0. Colombia Abril 2011.
- [17] GRUPO ICT II. Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso Presa Vertedero y Obras Subterráneas. Procedimiento de excavación y construcción de la Pantalla Cortaflujo vertical. Rev. 0. Colombia Marzo 2012.
- [18] GRUPO ICT II. Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso Presa Vertedero y Obras Subterráneas. Procedimiento de inyecciones en la Pantalla Cortaflujo de la Presa. Rev. 0. Colombia Marzo 2012.

BIBLIOGRAFÍA

DUQUE, Gonzalo. Manual de geología para ingenieros. 2003.

GONZÁLES. Arsenio. Hidráulica del macizo rocoso.2006.

ISAGEN. Licitación pública No. 5/415 Pliego de condiciones- Parte II – Copia Conformada. Especificaciones técnicas. Capítulo 10. Inyecciones a presión y perforaciones de drenaje. Medellín: ISAGEN, 2009.

ISAGEN. Licitación pública No 5/415. Pliego de Condiciones – Parte II – Copia conformada. Especificaciones técnicas. Capítulo 12. Pantalla Cortaflujo. Medellín: ISAGEN, 2009.

MARANO, Paulo. Infiltración del agua en el suelo. 2005.

PATIÑO, Sandra. Flujo a través del macizo rocoso de la margen izquierda de fundación de la presa Porce II.