

**DETERMINACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN UNA PLANTA INDUSTRIAL
DE BENEFICIO DE MINERALES DE LA MINA REINA DE ORO DE VETAS
SANTANDER**

VANESSA GARCÍA FONSECA

CARLOS EDUARDO SOLANO SANABRIA



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOQUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES

BUCARAMANGA

2016

**DETERMINACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN UNA PLANTA INDUSTRIAL
DE BENEFICIO DE MINERALES DE LA MINA REINA DE ORO DE VETAS
SANTANDER**

VANESSA GARCÍA FONSECA

CARLOS EDUARDO SOLANO SANABRIA

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:**

INGENIERO METALÚRGICO

DIRECTOR:

Prof. WALTER PARDAVÉ LIVIA

INGENIERO METALÚRGICO, MSc



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOQUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES

BUCARAMANGA

2016

AGRADECIMIENTOS

Los autores de esta tesis de grado expresan sus agradecimientos a: La escuela de Ingeniería Metalúrgica y al personal docente por brindarnos los conocimientos necesarios para poder culminar este proyecto. Por su apoyo, comprensión y por contribuir a una formación integral.

Nuestro director, Walter Pardavé Livia, por guiarnos en la realización del proyecto, y por brindarnos la oportunidad de participar en él. Por su paciencia y su dedicarnos su tiempo para resolver los inconvenientes que se pudieron presentar.

A la empresa MINERA REINA DE ORO LTDA, y en especial al Ingeniero Rodolfo Contreras, por permitirnos realizar la investigación del proyecto y brindarnos la ayuda necesaria junto con los trabajadores de la minera.

Javier Gaitán y Ambrosio Carrillo, técnicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, por brindarnos la ayuda necesaria para la realización de las pruebas experimentales que se desarrollaron a lo largo del proyecto. Por el préstamo de los equipos de beneficio de minerales.

Agradecemos al Laboratorio de Microscopía de la Universidad Industrial de Santander – Parque Tecnológico de Guatigará y su personal, por el servicio de microscopía suministrado para la adquisición de datos.

A todos los que de alguna u otra forma hicieron que la realización de este proyecto fuera posible.

DEDICATORIA DE VANESSA

Primero que todo quisiera dedicar este proyecto a Dios, porque sin él nada es posible.

A mi mamá Isaura Fonseca, que con su gran esfuerzo ha logrado sacarnos adelante a mis hermanos y a mí. Porque sin su dedicación nada de esto hubiera sido posible.

A mis hermanos Daniel García y Andrea García que siempre han estado ahí acompañándome en este largo camino.

A mi sobrinita Valentina Díaz, que con su sonrisa y presencia se ha convertido en la alegría de mi casa.

A Johnatan Naranjo, por acompañarme a lo largo de este proyecto en los momentos más importantes, y conocer junto a él Vetás, el lugar donde se realizó el proyecto.

A mi compañero Eduardo Solano, por su paciencia en los momentos más difíciles.

A mis compañeros, familiares y demás personas que estuvieron siempre apoyándome.

DEDICATORIA DE EDUARDO

De ante mano el agradecimiento y la gloria de parte mía sea para Dios, promotor de todo mi conocimiento y mi principal compañía en el desarrollo diario del proyecto.

A la santísima Virgen María madre de DIOS y madre nuestra, por la intercepción ante nuestro señor por las vidas de todos lo que de una u otra manera nos acompañaron en el desarrollo del proyecto y también por la intercepción ante el espíritu santo para que él nos diera la inteligencia necesaria.

A mis padres Carlos Solano Zarate y Flor María Sanabria Medina, que con su gran esfuerzo ha logrado sacarnos adelante a mis hermanos y a mí. Porque sin su entrega incondicional no habría podido alcanzar estos logros.

A mis hermanas Adriana Solano y Luz Mila Ruiz que siempre con sus consejos me han acompañado en este largo camino.

A Alejandra Santos, que con su alegría y presencia me ha motivado a seguir adelante en la lucha de mis logros.

A Cristian Andrés Niño e Iván Moreno, por los conocimientos brindados a lo largo de mis estudios y que sin estos no habría podido conquistar mis metas académicas.

A mis compañeros, familiares y demás personas que estuvieron siempre apoyándome.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN.....	20
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	22
1.1 OBJETIVOS.....	23
1.1.1 OBJETIVO GENERAL.....	23
1.1.2 Objetivos específicos.....	23
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	24
2.1 HUELLA HÍDRICA.....	24
2.1.1 CLASIFICACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA.....	24
2.1.1.1 Agua azul.....	24
2.1.1.2 Agua verde.....	24
2.1.1.3 Agua gris.....	24
2.2 OPERACIONES DEL BENEFICIO DE MINERALES QUE CONSUMEN AGUA O GENERAN VERTIDOS.....	24
2.2.1 CONCENTRACIÓN.....	24

2.2.1.1 Gravimétrica.....	25
2.2.1.2 Flotación.....	25
2.2.1.3 Magnética.....	25
2.2.2 Molienda.....	25
2.2.3 Espesamiento.....	25
2.3 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA (ACV).....	25
2.3.1 Análisis del Ciclo de Vida de la cuna a la puerta (cradle-to-gate).....	26
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	27
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	28
3.2 RECONOCIMIENTO DE LA PLANTA INDUSTRIAL.....	29
3.3 REGISTRO DE LAS ETAPAS DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE ORO QUE INVOLUCRAN EL CONSUMO DE AGUA Y VERTIDOS.....	29
3.4 TOMA DE DATOS DE LOS CAUDALES DE AGUA DE LOS AFLUENTES DEL RÍO SURATÁ DE LA ENTRADA Y SALIDA DEL PROCESO.....	30
3.5 CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL AURÍFERO DE LA MINA REINA DE ORO.....	30
3.5.1 Análisis de Fluorescencia de Rayos X.....	30
3.5.2 Análisis de granulometría.....	31

3.6 CÁLCULO DE LA HUELLA HÍDRICA DEL SISTEMA Y GRADO DE CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS.....	31
3.6.1 Cálculo de la Huella Hídrica azul.....	31
3.6.2 Cálculo de la Huella Hídrica verde.....	32
3.6.3 Cálculo de la Huella Hídrica gris.....	33
3.7 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA CUNA A LA PUERTA.....	34
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	35
4.1 CAUDALES.....	36
4.2 CÁLCULO LLEVADO A CABO EN LA DETERMINACIÓN DE LOS SUB-PARÁMETROS DE LA HUELLA HÍDRICA AZUL.....	40
4.2.1 Zona inicial.....	40
4.2.1.1 Determinación de los fluidos.....	42
4.2.1.2 Determinación del porcentaje de humedad.....	42
4.2.1.3 Determinación del caudal.....	43
4.2.2 Zona número 2.....	45
4.2.2.1 Determinación de los fluidos.....	45
4.2.3 Determinación del caudal de la mesa Wilfley número 1.....	48
4.2.4 Determinación del caudal de la mesa Wilfley número 2.....	50

4.3 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DE ENTRADA AL PROCESO DE MOLIENDA (ZONA INICIAL) CON BASE EN UN BALANCE DE FLUJOS CON LOS DATOS OBTENIDOS DE LA ZONA 2 Y LA ENTRADA GENERAL DEL FLUJO AL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE ORO.....	52
4.3.1 Balance del flujo de las zonas inicial y zona 2.....	53
4.4 ZONA 3.....	54
4.4.1 Determinación del flujo.....	54
4.4.2 Cálculo del caudal de entrada inicial.....	55
4.4.3 Cálculo del caudal de salida de la zona tres.....	55
4.5 DETERMINACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA AZUL (HHA) TOTAL DEL PROCESO.....	57
4.6 ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X.....	58
4.7 ANÁLISIS DE GRANULOMETRÍA.....	60
4.8 ENSAYO DE HUMEDAD.....	61
4.9 ANÁLISIS DE ABSORCIÓN ATÓMICA.....	61
5. CONCLUSIONES.....	64
6. RECOMENDACIONES.....	65
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

BIBLIOGRAFÍA.....69

ANEXOS.....71

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Determinación de la producción total de mineral que se lleva a cabo en la concentración de oro de la Mina Reina de Oro en toneladas secas/día.....	32
Tabla 2. Datos zona inicial.....	36
Tabla 3. Zona 2, Mesa Wilfley 1.....	37
Tabla 4. Zona 2, Mesa Wilfley 2.....	38
Tabla 5. Datos zona 3.....	39
Tabla 6. Descripción de las variables que conforman los diferentes circuitos presentados en el diagrama de proceso del balance de agua de la mina Reina de Oro.....	41
Tabla 7. Determinación de los caudales que comprenden el circuito de molienda en la etapa inicial de conminución del sistema en $\frac{m^3}{hora}$	44
Tabla 8. Porcentaje de error presentado por los equipos utilizados en la toma de caudales en la etapa inicial de conminución 1.....	45
Tabla 9. Determinación de los caudales que comprenden el circuito de la mesa Wilfley número 1.....	46

Tabla 10. Porcentaje de error presentado por los equipos utilizados en la toma de los caudales de la mesa Wilfley número 1.....	47
Tabla 11. Determinación de los caudales que comprenden el circuito de la mesa Wilfley número 2.....	49
Tabla 12. Porcentaje de error presentado por los equipos utilizados en la toma de los caudales de la mesa Wilfley número 2.....	50
Tabla 13. Determinación del caudal que ingresa al proceso general proveniente de la laguna verde.....	52
Tabla 14. Porcentaje de error presentado por los equipos utilizados en la toma de los caudales provenientes de la laguna verde.....	53
Tabla 15. Determinación de los caudales de la etapa final del proceso en ($\frac{m^3}{hora}$).....	55
Tabla 16. Porcentaje de error presentado por los equipos utilizados en la toma de los caudales de la zona final del proceso.....	56

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología experimental.....	27
Figura 2. Diagrama general de la Mina Reina de Oro.....	40
Figura 3. Variación de la Huella Hídrica Azul en el proceso de recuperación de la Mina Reina de Oro.....	57
Figura 4. Cuantificación porcentual de los elementos de mayor cantidad de la muestra, obtenidos del análisis de Fluorescencia de Rayos X del mineral aurífero de la mina Reina De Oro.....	58
Figura 5. Cuantificación en mg del elemento por kilogramo de muestra de los elementos de menor cantidad obtenidos del análisis de fluorescencia de rayos x del mineral aurífero de la mina Reina De Oro.....	58
Figura 6. Distribución Granulométrica del mineral inicial.....	60

LISTA DE ANEXOS

	Pág
Anexo A. Etapas que componen a la mina Reina de Oro y los afluentes que la surten.....	71
Anexo B. Lagunas verdes, principal fuente que surte de agua a la Mina Reina de Oro de Vetas – Santander.....	71
Anexo C. Valores permisibles según la norma ambiental 0631 del 17 de marzo del 2015.....	72
Anexo D. Resultados análisis de absorción atómica.....	73

RESUMEN

TÍTULO:

DETERMINACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN UNA PLANTA INDUSTRIAL DE BENEFICIO DE MINERALES DE LA MINA REINA DE ORO DE VETAS SANTANDER *

AUTORES:

VANESSA GARCÍA FONSECA**

CARLOS EDUARDO SOLANO SANABRIA**

PALABRAS CLAVES:

Huella hídrica, análisis de ciclo de vida, beneficio de minerales auríferos.

DESCRIPCIÓN

El proyecto de investigación “DETERMINACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN UNA PLANTA INDUSTRIAL DE BENEFICIO DE MINERALES DE LA MINA REINA DE ORO DE VETAS SANTANDER” está orientado al cálculo de la huella hídrica de la mina; El proyecto busca por medio del conocimiento metalúrgico analizar de manera detallada la alteración que genera la concentración y recuperación del oro en los afluentes de aguas que se hallan en la comunidad de Vetas Santander. En el proceso de determinación de la huella hídrica se desarrollaron análisis como el de fluorescencia de rayos X, el cual proporcionó de manera cuantitativa porcentual los elementos que componen el mineral aurífero. La determinación de los diferentes caudales presentes en el sistema, involucraron ensayos como el de humedad, el cual consistió en calentar durante 1 día a una misma temperatura de 100 ° Celsius 4 muestras previamente pesadas del mineral molido y que después del tiempo descrito fueron nuevamente pesadas y por medio de las ecuaciones presentes se determinó el volumen de agua presente en el mineral. Este valor se relacionó con los tiempos de llenado del mineral al molino y se logró deducir el caudal proveniente del mineral. El análisis de absorción atómica permitió inferir que los afluentes de aguas vertidas al final del proceso se hallaban contaminados con una alta concentración de hierro según los requisitos de la norma nacional ambiental 0631 del 17 de marzo del 2015.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Walter Pardavé Livia

ABSTRACT

TITLE

DETERMINATION OF WATER FOOTPRINT IN A MINERAL BENEFIT INDUSTRIAL PLANT OF MINE GOLD QUEEN (LA MINA REINA DE ORO) FROM VETAS SANTANDER*

AUTHORS:

VANESSA GARCÍA FONSECA**

CARLOS EDUARDO SOLANO SANABRIA**

KEYWORDS:

Water footprint, life cycle analysis, benefit of gold minerals.

DESCRIPTION

The research project "DETERMINATION OF WATER FOOTPRINT IN A MINERAL BENEFIT INDUSTRIAL PLANT OF MINE GOLD QUEEN (LA MINA REINA DE ORO) FROM VETAS SANTANDER " is oriented to the calculation of the water footprint of the mine; this project aims, through metallurgical knowledge to analyze in detail the disruption that generates the concentration and recovery of gold in the tributaries of waters which are in the community of Vetás in Santander. In the process of determining the water footprint, some analysis were developed, such as x-ray fluorescence, which provided in percentage and quantitative way, the elements that compose the gold ore. The determination of the different flows in the system, involved tests as moisture, which consisted of heating for 1 day at the same temperature of 100 ° Celsius, four pre-weighed samples of ore milled, and after the time described, there were weighted again and by means of the present equations, the water volume present in the ore was determined. This value is related to the filling times of the mineral to the mill and it was obtained to deduce the flow from the circuit. Analysis such as atomic absorption allowed to infer that the tributaries of water discharged at the end of the process were contaminated with high concentrations of iron as required by the national environmental standard 0631 from March 17, 2015.

*Degree Work

**Physicochemical Engineering Faculty. School of Metallurgical Engineering and Materials Science.
Director: Walter Pardavé Livia

INTRODUCCIÓN

El oro es un metal que ha servido durante lo largo de la historia como una forma de representar la economía en diversas civilizaciones, característica que todavía está vigente. Su nombre deriva de “aurum”, que significa aurora. Se caracteriza por su alta resistencia a la corrosión y por su blandura, circunstancia que se expresa en su maleabilidad. El oro también es un buen conductor de calor y electricidad. Se trata de un elemento muy útil por su gran resistencia

Sin embargo, la concentración del oro trae consigo una problemática ambiental pues en él se utilizan sustancias químicas tales como el mercurio y cianuro las cuales causan graves efectos tanto en las vidas de los trabajadores como en el ecosistema cercano.

Aunque el mercurio en la nación colombiana está prohibido y se busca su total erradicación conforme a la ley 1658 del 15 de julio del 2013; Como ya se ha dicho este elemento y el cianuro son sustancias químicas aun utilizadas y esenciales para los sectores de la minería artesanal ya que pueden separar y extraer el oro de las rocas en las que se encuentra. El mercurio se adhiere al oro, formando una amalgama que facilita su separación de la roca, arena u otro material y el cianuro acompleja al oro y lo lleva a una solución acuosa.

En el departamento de Santander hay un municipio que se ha convertido en un pionero en la extracción de este metal, dicho municipio es Vetas. Vetas tiene varias sociedades mineras que en la actualidad trabajan en la obtención del oro. En este presente artículo se tomará como referencia la minera REINA DE ORO, la cual no es ajena a lo presentado anteriormente.

Por ende, el principal objetivo de este proyecto es el análisis de la “Huella Hídrica en la cuenca del río Vetas”, proyecto que es desarrollado por la empresa minera en conjunto con la escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial De

Santander U.I.S. durante el presente año 2015 y el cual pretende evaluar el impacto de esta actividad en el recurso hídrico.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los factores que la sociedad mundial enfrenta con gran insistencia en la actualidad es la reducción de la contaminación ambiental, desde los hogares hasta las grandes industrias se están tomando medidas para determinar la cantidad de agua que se está utilizando para el desarrollo y obtención de nuestras vidas y de todos los productos que se nos ofrece en el mercado comercial en todos los campos.

La huella hídrica es un indicador de uso de agua que tiene en cuenta tanto el uso directo como indirecto por parte de un consumidor o productor. La huella hídrica de un individuo, comunidad o comercio se define como el volumen total de agua dulce que se utiliza para producir los bienes y servicios consumidos por el individuo o comunidad, así como los producidos por los comercios [1]. En el 2002 el profesor Arjen Hoekstra de UNESCO-IHE fue el pionero en aglomerar los diferentes conceptos y concentrar la relación del uso del agua en un determinado proceso mediante lo conocido como huella hídrica, en el 2009 la ISO determinó una norma que encierra los requisitos, principios y directrices que encierra la huella hídrica la cual fue nombrada como ISO 14046:2014 - Gestión Ambiental - Huella Hídrica.

El río Vetás es una corriente de agua que se encuentra localizada en el departamento de Santander. El río Vetás hace parte de uno de los afluentes que desembocan en el río Suratá el cual es uno de los abastecedores de agua en el área metropolitana de Bucaramanga, además de ser el afluente base, que suministra la totalidad del líquido necesario para los diferentes procesos de recuperación de oro de la EMPRESA MINERA REINA DE ORO, pero en estos momentos los residuos resultantes de dichos procesos son nuevamente vertidos a este río.

Por estas razones se hace necesario estudiar esta problemática y por medio de la implementación de la norma Internacional ISO 14046:2014 determinar la huella hídrica del sistema y en conjunto con la norma ISO 14040 realizar un análisis del ciclo de vida del sistema para conocer el grado de contaminación de las aguas vertidas nuevamente al río Vetas y analizar si los componentes químicos presentes en el agua se encuentran dentro las normas establecidas, para dar un informe a la mina del estado actual de la huella hídrica y el nivel de contaminación presente en las aguas vertidas y con esto presentar alternativas que puedan ser más amigables con los ecosistemas adyacentes .

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General

- Determinar la huella hídrica a la Empresa Minera Reina de oro, basados en el consumo de agua y sus vertidos, tomando en cuenta los afluentes del Río Vetas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar el diagnóstico del consumo de agua en las operaciones unitarias de beneficio en la empresa Reina de Oro, mediante el balance de materia.
- Identificar el impacto de los vertidos generados en la planta industrial en los afluentes del Río Vetas.
- Determinar el valor de la Huella Hídrica de la planta industrial, mediante el análisis del Ciclo de Vida.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Huella hídrica: A nivel industrial la huella hídrica es una herramienta que nos permite saber el consumo y la contaminación del agua presente en la producción o recuperación de un producto. Este parámetro determina el volumen total de agua dulce utilizado directa o indirectamente para producir un determinado producto (en nuestro caso la recuperación y concentración de oro).

2.1.1 Clasificación de la Huella Hídrica

Esta huella está formada por 3 componentes, si seleccionamos la recuperación de oro como parámetro a estudiar esta clasificación sería:

2.1.1.1 Agua azul. Se define como el volumen de agua dulce consumida de los ecosistemas hídricos del planeta (Río Vetas) para ser usada como aglomerante en los procesos de molienda (conminución), en las etapas de lixiviación y el flujo de retorno perdido

2.1.1.2 Agua verde. Es la precipitación que llega al suelo y que no se pierde por escorrentía, almacenándose temporalmente en la parte superior del suelo o la vegetación. Se define como el volumen de agua de lluvia consumida durante el proceso de producción

2.1.1.3 Agua gris. Es un indicador del grado de contaminación del agua dulce en la recuperación del metal de interés. Se define como el volumen de agua dulce que se necesita para asimilar la carga contaminante, basados en las normas vigentes de calidad ambiental del agua [2].

2.2 Operaciones del beneficio de minerales que consumen agua o generan vertidos

2.2.1 Concentración: Es la separación del mineral o metal de interés de la ganga o material estéril. Para estos procesos se aprovechan las propiedades físicas

(densidad, magnetismo, etc.) o fisicoquímicas de los minerales o metales, siendo los procesos más comunes los siguientes [3]:

2.2.1.1 Gravimétrica. Aprovecha la diferencia de densidades del material a separar, utiliza una gran cantidad de agua

2.2.1.2 Flotación. Utiliza un proceso físico-químico complejo para la separación de material

2.2.1.3 Magnética. Se vale de la atracción de ciertos minerales hacia un campo magnético [4]

2.2.2 Molienda: La molienda es una de las actividades más costosas del beneficio de minerales y resulta en partículas muy finas que pueden permitir la liberación del metal, pero también una liberación más completa de los contaminantes cuando estos toman la forma de relaves [3].

2.2.3. Espesamiento: El espesamiento ocurre por sedimentación de las partículas. El tamaño de las partículas tiene que ser evaluado en las operaciones desde molienda, evitando exceso de molienda y de atricción de partículas a fin de obtener buena eficiencia en el desaguado. Las partículas finas tienen bajas velocidades de sedimentación y bajas velocidades de filtración [5]

2.3. Análisis del ciclo de vida (ACV) es una herramienta metodológica, que aborda todos los aspectos ambientales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, lo cual comprende las actividades de adquisición de la materia prima, extracción, producción, utilización, reciclado y por último la disposición final [6]. Este análisis recopila y evalúa las entradas y salidas de un sistema.

Aunque su aplicación en Colombia no es muy amplia, algunas universidades del país han realizado algunos proyectos y publicado material al respecto. Esta situación obedece a que sólo de manera reciente se ha iniciado la consolidación de una masa crítica de investigadores alrededor de estos temas [7].

2.3.1 Análisis del ciclo de vida de la cuna a la puerta (cradle -to-gate)

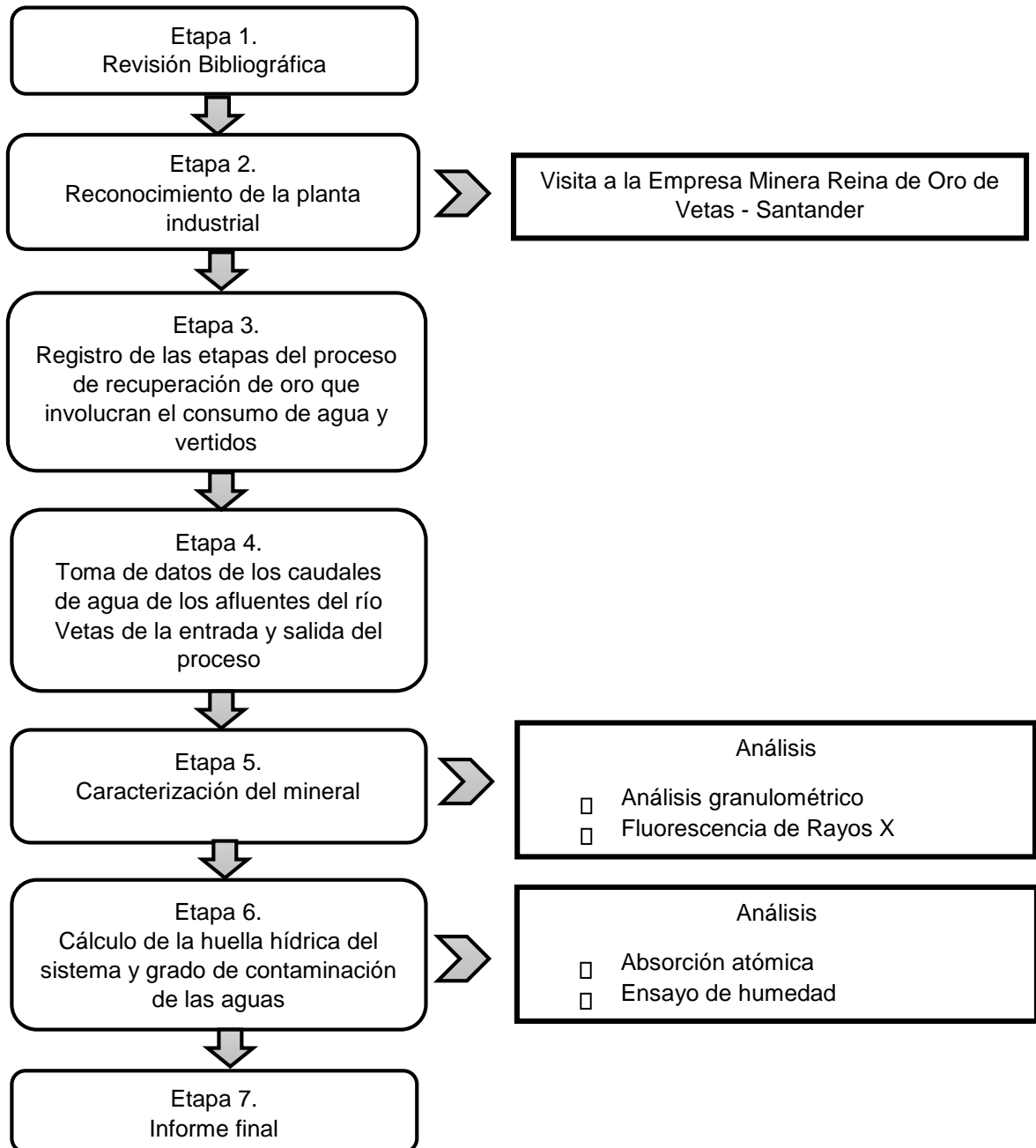
Cuando el alcance del sistema se limita a las entradas/salidas desde que se obtienen las materias primas hasta que el producto se pone en el mercado (a la salida de la planta de fabricación/montaje), se le denomina como “de la cuna a la puerta” [8].

El inventario de la cuna a la puerta o cradle to gate, también conocido como B2B (business to business), es un inventario parcial que incluye todas las emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero) en el ciclo de vida de un producto desde el comienzo del ciclo de vida, hasta el punto de distribución al consumidor, incluyendo las emisiones de procesos controlados por la empresa que reporta. Desde el punto de vista de la empresa que reporta, la evaluación de la cuna a la puerta incluye datos de emisiones históricos, pero excluye estimaciones de emisiones futuras después de que el producto es vendido al consumidor, es decir no se evalúan los procesos posteriores [8].

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de los objetivos planteados en el proyecto se presenta a continuación el esquema general de la metodología implementada.

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología experimental.



3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El concepto de Huella Hídrica fue creado en 2002 por el profesor ARJEN HOEKSTRA DE UNESCO-IHE quien fue el pionero en aglomerar los diferentes conceptos y concentrar la relación del uso del agua en un determinado proceso mediante lo conocido como huella hídrica.

En el año 2008, Hoekstra y Chapagain demostraron que la visualización de uso del agua utilizada en el procesamiento de los productos podía ayudar a una mejor comprensión del carácter global del agua dulce y la cuantificación de los efectos de consumo y el comercio en el uso de los recursos de agua.

El concepto de Huella Hídrica fue refinado y los métodos de contabilidad se establecieron en una serie de publicaciones realizadas POR ASHOK KUMAR CHAPAGAIN Y ARJEN HOEKSTRA EN EL INSTITUTO UNESCO-IHE para la Educación. Las publicaciones más detalles sobre cómo calcular las huellas del agua es el informe de 2004 sobre la 'huella hídrica de las naciones de la UNESCO-IHE' [7].

La cooperación entre las instituciones globales líderes en el campo ha llevado a la creación de la WATER FOOTPRINT NETWORK EN 2008 que tiene como objetivo coordinar los esfuerzos para desarrollar y difundir el conocimiento sobre los conceptos de huella hídrica, métodos y herramientas.

Los siete socios fundadores de la red de la Huella Hídrica son: el Instituto UNESCOIHE para la Educación relativa al Agua, la Universidad de Twente (Países Bajos), la Organización Mundial para la Protección del Medio Ambiente -WWF-, la Fundación Agua Neutral, el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible, la Corporación Financiera Internacional (parte del Grupo del Banco Mundial) y la Sociedad del Agua de los Países Bajos [8].

En el 2009 la ISO determinó una norma que encierra los requisitos, principios y directrices que encierra la huella hídrica la cual fue nombrada como ISO 14046:2014 - Gestión Ambiental - Huella Hídrica.

El municipio de Segovia Antioquia fue el promotor de la realización de la huella hídrica en Colombia, en el año 2013.

3.2 RECONOCIMIENTO DE LA PLANTA INDUSTRIAL

Para poder llevar a cabo el proyecto de investigación y hacer los diferentes análisis, se hizo una visita a la empresa minera reina de oro de Vetas Santander, en donde se observó el proceso que se llevaba a cabo para la obtención del oro.

En el Anexo A se pueden observar las fotos que permiten describir visualmente el enfoque, localización y distribución de las diferentes etapas que componen a la mina y de los afluentes que la surten.

3.3 REGISTRO DE LAS ETAPAS DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE ORO QUE INVOLUCRAN EL CONSUMO DE AGUA Y VERTIDOS

Las etapas comprendidas en la recuperación de oro de la Mina Reina De Oro, inician con la etapa de molienda, como base principal debido a que el objetivo inicial es poder llegar a la granulometría necesaria para liberar el elemento de interés y poder separarlo de la ganga, de la mano de este proceso y de manera consecutiva se halla la concentración y separación por mesa Wilfley aprovechando la gravedad. En esta etapa se habla principalmente de los tipos con movimiento longitudinal vibratorio, donde las partículas de mineral se diferencian formando bandas en abanico, según su peso específico y su granulometría.

Con estos procesos y debido a la alta libertad presentada por el oro en el mineral, se logran obtener los concentrados de oro libre en alta cantidad, los cuales en conjunto con el restante oro concentrado que se halla en los medios del sistema.

3.4 TOMA DE DATOS DE LOS CAUDALES DE AGUA DE LOS AFLUENTES DEL RÍO VETAS DE LA ENTRADA Y SALIDA DEL PROCESO

Los datos correspondientes a los diferentes caudales presentes en los circuitos del sistema, fueron tomados con base a la división previa realizada a la mina en tres zonas las cuales son zona inicial, zona número dos y zona número tres. Estos valores fueron tomados en las unidades de $\frac{L}{Min}$, esto debido a los elementos utilizados en la toma de los mismos, los cuales fueron recipientes de plásticos cilíndricos con volumen definido y un cronometro de mano calibrado. La división de las zonas se realizó con el objetivo de poder analizar con mayor claridad los valores correspondientes en cada franja.

3.5 CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL AURÍFERO DE LA MINA REINA DE ORO

Se realizaron los análisis de granulometría y fluorescencia de rayos x, para poder conocer más a fondo las características que presenta el mineral aurífero de la mina. De esta manera se pudo conocer cuáles metales presentes en el mineral podrían alterar las condiciones de los afluentes finales del proceso y el grado de libertad del metal.

3.5.1 ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

La técnica constituyó un período de gran importancia en el cálculo de la huella hídrica, ya que permitió conocer cuantitativamente cada uno de los elementos que constituyen el mineral y poder reconocer cuáles de estos afectan en mayor o menor medida las condiciones del agua según las características individuales y la cantidad presente de los mismos.

3.5.2 ANÁLISIS DE GRANULOMETRÍA

Por medio de este ensayo se logró identificar los rangos de tamaños de las partículas que ingresan a las etapas de concentración provenientes del molino. A su vez permitió observar que el porcentaje de sólidos suspendidos en los afluentes finales, son nulos.

3.6 CÁLCULO DE LA HUELLA HÍDRICA DEL SISTEMA Y GRADO DE CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS

La evaluación de la huella hídrica concentra una gama de actividades que parcializarán los procesos de la mina Reina De Oro y con esto se podrán evaluar la sostenibilidad ambiental dentro de las actividades llevadas a cabo con base en la metodología planteada; De acuerdo con las especificaciones dadas por el manual “THE WATER FOOTPRINT ASSESSMENT MANUAL” y el **Manual de Evaluación de la huella hídrica** se desarrollaron todas las ecuaciones y argumentos teóricos que relacionan la determinación de cada parámetro de la huella hídrica.

3.6.1 CÁLCULO DE LA HUELLA HÍDRICA AZUL

“La huella hídrica azul se refiere al consumo de los recursos de agua azul (agua superficial y subterránea) a lo largo de la cadena de suministro de un producto. “El consumo” se refiere a la pérdida de agua de la masa de agua disponible del suelo de la superficie en un área de captación. Las pérdidas se producen cuando el agua se evapora, vuelve a otra zona de captación o al mar o se incorporan al producto.” [Manual de la huella hídrica].

En el cálculo de este parámetro para nuestro estudio, se seccionó el diagrama de flujo de la mina en tres zonas: la zona inicial la cual comprendió los fluidos de entrada al sistema del molino y el mismo en sí, la zona número 2 integró las mesas

Wilfley de la mina de la mano de la recolección de los vertientes y la última zona encierra la distribución final de los residuos del proceso.

Con el objetivo de poder tomar cada flujo presente y determinar así el desarrollo del mismo en cada sub sistema; A su vez debido al desarrollo de explotación de la compañía, el cual es variable de acuerdo a las condiciones de trabajo del medio y de los jefes encargados se estimó una base estándar promedio de 10 toneladas día como producción general de la mina, debido a los datos presentados por los turnos al mando.

A continuación se presenta la tabla que presenta la determinación de la producción.

Tabla 1. Determinación de la producción total de mineral que se lleva a cabo en la estimación de oro de la Mina Reina de Oro en toneladas secas/día.

Número de turnos definidos para la producción de la mina por semana	Producción de la mina (Toneladas secas/día)	Producción de la mina (Toneladas secas / mes)	Producción de la mina (Toneladas secas/año)
Turno N.1 Ing.	12	360	4032
Turno N.2 Ing.	9	270	3240
Turno N.3 Ing.	11.5	345	4140
Turno N.4 Ing.	8	240	2880
Promedio de producción	10.13	303.75	3573
Producción Total en cifras concretas	10	304	3573

Fuente: Autores

3.6.2 CÁLCULO DE LA HUELLA HÍDRICA VERDE

Para nuestro estudio este parámetro fue omitido teniendo en cuenta el diseño estructural de la mina, la cual se encuentra techada de modo que no hay cabida al ingreso de aguas provenientes de precipitaciones.

3.6.3 CÁLCULO DE LA HUELLA HÍDRICA GRIS

“La huella hídrica gris de una fase del proceso es un indicador del grado de contaminación del agua dulce que se puede asociar con tal fase del proceso. Se define como el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar la carga de contaminantes comparado con las concentraciones normales y las normas de calidad de agua. El concepto de huella hídrica gris ha crecido a partir del reconocimiento de que la medida de la contaminación del agua se puede expresar en términos del volumen de agua que se requiere para diluir los contaminantes de tal manera que se conviertan en inofensivos” [9].

Los cálculos de huella hídrica gris se realizan con las normas ambientales de calidad del agua para el cuerpo de agua dulce que las reciben, es decir, las normas con respecto a las concentraciones máximas permisibles [9]. La cuantificación de la huella hídrica gris se basa en la relación entre el cociente de la carga contaminante por la diferencia entre la cantidad estándar de calidad de agua de este contaminante (C_{max} , la concentración máxima aceptable, en masa / volumen) y su concentración natural en la etapa inicial en la cuenca (C_{nat} , en masa / volumen), lo cual expresado matemáticamente es (1):

$$HHG: \frac{\text{Carga contaminante} \left(\frac{\text{masa}}{\text{tiempo}} \right)}{C_{max} \left(\frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}} \right) - C_{nat} \left(\frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}} \right)} \quad (1)$$

Con base en lo presentado para la determinación de la huella hídrica gris del proceso de recuperación de oro de la mina Reina De Oro, se requirió conocer los estándares de la norma. La resolución que rige la nación colombiana es la 0631 del 17 de marzo del 2015, la cual resuelve que: “Los parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas – ARnD a cuerpos de aguas superficiales de

actividades de minería. Los parámetros fisicoquímicos que se deberán monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas – ARnD a cuerpos de aguas superficiales de las actividades de minería, están consignados en el Anexo C [10]

Los elementos seleccionados para los análisis y determinación del grado de cumplimiento con la resolución ambiental 0631 serán designados de acuerdo a los resultados tenidos del análisis de fluorescencia de rayos X al mineral, y también de acuerdo al grado de variación que estos ocasionan a las propiedades físicas del agua en su vertiente final al Río Vetas.

3.7 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA CUNA A LA PUERTA

El análisis de ciclo de vida de nuestro estudio comprendió el impacto en el gasto de agua en el desarrollo de la obtención del mineral de oro, este deterioro ambiental que produce la extracción del mineral solo será analizado hasta su obtención primaria básica la cual encierra el mineral de oro como elemento precioso sin ninguna transformación posterior a un objeto de valor superior como joyas, elementos electrónicos, entre otros. Por ende el análisis de ciclo de vida de la mina Reina de Oro describe el desarrollo fluvial de los caudales presentes en todas las etapas de modo tal que los parámetros de la huella hídrica que mejor se relacionan con el ACV es la HHA y la HHG debido a que el proceso comprende vertidos que contribuyen a la contaminación de los afluentes finales que involucran un gasto de agua externo para la regulación de dicho elemento en los residuos; de esta manera el análisis estableció que el proceso afecta el entorno ecológico.

De otra parte, la determinación del diagrama de procesos de balance de agua de la mina, arrojó que el gasto base de agua se encuentra dentro de valores tolerables para estos casos.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Antes de iniciar con los análisis de resultados, es importante mencionar que no se han identificado estudios en gran medida para este mismo mineral (oro) a nivel nacional que permita comparar los resultados preliminares obtenidos. Solo se ha logrado saber de un caso en específico en el municipio de Segovia (Antioquia, Colombia) el cual presenta condiciones de desempeño de los procesos muy diferentes al del municipio de Vetas, pero que puede ayudar a comprender el consumo colombiano de agua que se da en el campo de la minería de oro.

Comparando los resultados de la Huella Hídrica Azul del oro, del municipio de Vetas con las del municipio de Segovia – Antioquía, se registra que diariamente presenta en promedio una HHA igual a $58.69 \frac{m^3}{Kg}$ lo que conlleva a una producción anual en Segovia cercana a los 3,421.00 kg de oro anualmente, al registrar que la HHA para este sector al año es de 200,778.49 m^3 de agua totales, ahora si bien, analizando la mina Reina de Oro se sabe que en promedio gastó $6.85 \frac{m^3}{Ton\ seca}$, si la ley del mineral para este sector es de $0.0314 \frac{kg}{Ton\ seca}$, se puede decir que la empresa gasta en promedio diariamente 21.79415183 m^3 y anualmente obtiene una recuperación de oro cercana en promedio a los 114.76 Kg, esto permite calcular que en el año la mina santandereana consume alrededor de un total de 7954.87 m^3 lo que indica que el gasto santandereano en relación al antioqueño es mucho más bajo, esto debido a la estandarización de los procesos y la desigualdad en la cantidad de mineral que se procesó en ambas compañías, las cuales es muy bajo el grado de recuperación de oro del municipio de Vetas comparado con el municipio de Segovia.

Junto con este parámetro cabe resaltar que es más abrumador el análisis cuando se toman los valores estimados para la HHG en la minería antioqueño debido a que esta sin lugar a dudas presenta valores cercanos a los 870.45 millones de m^3 de agua anualmente debido a que en sus etapas de concentración se lleva a cabo el proceso de amalgamación el cual al no estar controlado acumula grandes

cantidades de mercurio lo que conlleva a un alto gasto del líquido para lograr controlar el impacto ambiental del proceso.

En la mina Reina de oro los procesos de amalgamación y cianuración no son utilizados, aunque la recuperación del metal de la mina Reina de Oro, se sabe que con los procesos llevados a cabo por la empresa carecen de etapas que concentren mineral que se halla en un tamaño más fino y por ende estos son vertidos por las colas, no cabe duda que esto hace a la mina amigable con el medio ambiente. Con respecto a los ensayos realizados en la investigación se destaca el desarrollo del análisis de fluorescencia de rayos X, el análisis de granulometría, el análisis de absorción atómica y el ensayo de humedad.

Los resultados que se obtuvieron en el proyecto se presentan a continuación.

4.1 CAUDALES

Las cifras de los caudales tomados se observan en las siguientes tablas.

Tabla 2. Datos zona inicial

Número de muestras	Peso Del mineral (gr)	Caudal Pulpa de salida a la mesa Wilfley 1 L/min	Peso Pulpa de salida a la mesa Wilfley 2 L/min
1	20,01	51.282	44.776
2	18,98	51.724	54.054
3	18,86	58.252	41.379
4	18,99	63.158	41.096

Fuente: Autores

Tabla 3. Zona 2, Mesa Wilfley 1

Número de muestras	Corriente 2	Corriente 3	Corriente 6	Corriente 12	Corriente 10	Corriente 8
1	44.776	11.613	51.282	75	33.333	9.6
2	39.474	15.652	51.724	80	34.483	9.6
3	45.454	11.25	58.252	75	31.250	9.6
4	35.714	14.118	63.158	83.333	31.579	9.6
5	44.117	11.077	—	75	32.258	—
6	40.541	9.6	—	65.217	31.579	—
7	42.254	10	—	80	32.609	—
8	39.975	10.286	—	66.667	31.915	—
9	41.096	9.730	—	65.934	32.967	—
10	41.667	13.585	—	75	32.609	—

Fuente: Autores

Donde:

Corriente 2: Toma de Caudales proveniente de la laguna, entrante a la mesa en la etapa inicial para el lavado de la pulpa ($\frac{L}{min}$)

Corriente 3: Toma de Caudales proveniente de la laguna, entrante la mesa en la etapa final para el lavado de las colas y medios ($\frac{L}{min}$)

Corriente 6: Toma de caudales de la pulpa proveniente del molino ($\frac{L}{min}$)

Corriente 12: Toma de Caudales de las colas del sistema ($\frac{L}{min}$)

Corriente 10: Toma de caudales de los medios del sistema ($\frac{L}{min}$)

Corriente 8: Toma de caudales de los concentrados del sistema (% de humedad)

Tabla 4. Zona 2, Mesa Wilfley 2

Número de muestras	Corriente 4	Corriente 5	Corriente 7	Corriente 13	Corriente 11	Corriente 9
1	58.252	32.967	44.776	63.158	42.857	9.6
2	48.781	32.609	54.054	85.714	42.254	9.6
3	51.282	35.294	41.379	73.171	44.118	9.6
4	45.455	31.915	41.096	85.714	46.154	9.6
5	45.113	33.708	—	68.966	43.478	9.6
6	43.478	31.579	—	86.957	37.5	—
7	54.545	31.250	—	72.289	37.975	—
8	51.282	32.258	—	81.081	44.118	—
9	45.802	31.250	—	76.923	42.254	—
10	54.545	34.091	—	68.966	41.667	—

Fuente: Autores

Donde:

Corriente 4: Toma de Caudales proveniente de la laguna, entrante a la mesa en la etapa inicial para el lavado de la pulpa ($\frac{L}{min}$)

Corriente 5: Toma de Caudales proveniente de la laguna, entrante la mesa en la etapa final para el lavado de las colas y medios ($\frac{L}{min}$)

Corriente 7: Toma de Caudales de la pulpa proveniente del molino ($\frac{L}{min}$)

Corriente 13: Toma de Caudales de las colas del sistema ($\frac{L}{min}$)

Corriente 11: Toma de Caudales de los medios del sistema ($\frac{L}{min}$)

Corriente 9: Toma de Caudales de los concentrados del sistema (% de humedad)

Tabla 5. Datos zona 3.

Número de muestras tomadas	Corriente 16	Corriente 14	Corriente 15
1	133.333	9.6	9
2	150	9.6	9
3	125	9.6	9
4	125	9.6	9
5	96.774	—	—
6	136.364	—	—
7	130.435	—	—
8	120	—	—
9	88.235	—	—
10	86.957	—	—

Fuente: Autores

Donde:

Corriente 16: Caudal De Salida al río Vetas Procedente del proceso ($\frac{l}{min}$)

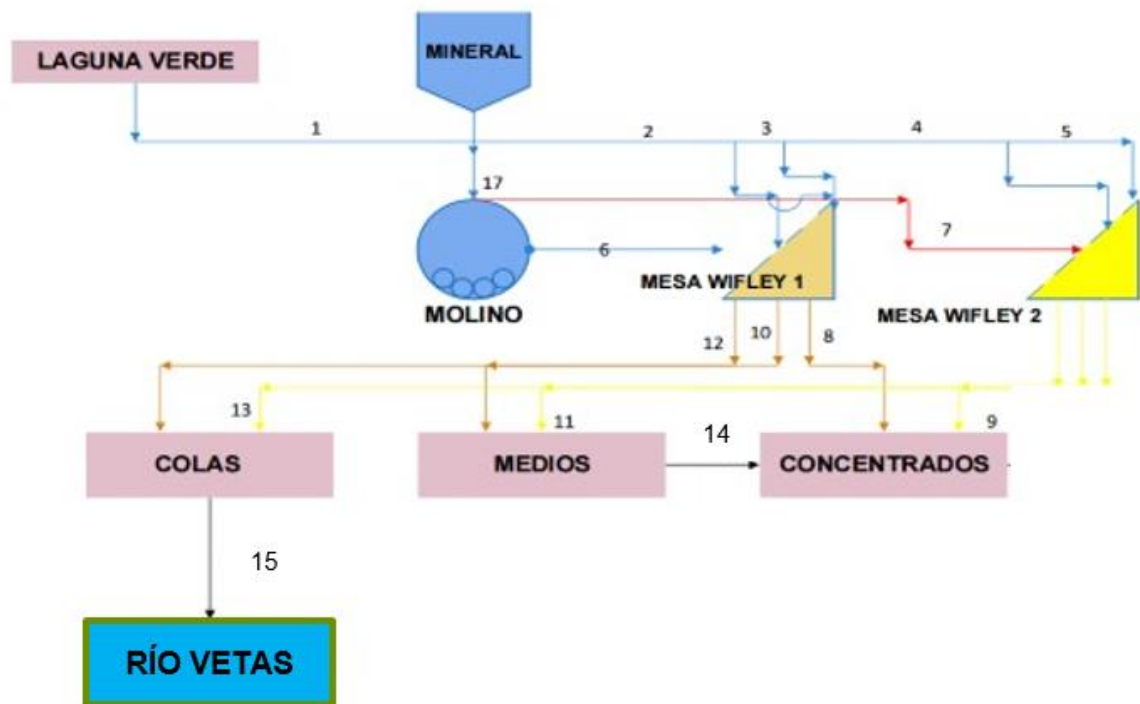
Corriente 14: Caudal del concentrado recuperado por las mesas Wilfley 1 y 2 del sistema (% de humedad)

Corriente 15: Caudal del concentrado recuperado por los medios del sistema (% de humedad)

4.2. CÁLCULO LLEVADO A CABO EN LA DETERMINACIÓN DE LOS SUB PARÁMETROS DE LA HUELLA HÍDRICA AZUL.

4.2.1 ZONA INICIAL

Figura 2. Diagrama general de la Mina Reina de Oro.



Fuente: Autores

Tabla 6. Descripción de las variables que conforman los circuitos presentados en el diagrama del proceso de balance de agua de la mina Reina de Oro.

Número de circuito	Caudal Pasante por el circuito en ($\frac{m^3}{hora}$)	Nombre del circuito
1	7.58	caudal que ingresa al proceso laguna verde
2	2.47	Caudal 1 Proveniente laguna verde entrante a la mesa wilfley 1,etapa inicial
3	0.70	Caudal 2 proveniente laguna verde entrante a la mesa wilfley 1,etapa final
4	2.99	Caudal 3 proveniente laguna verde, entrante a la mesa wilfley 2 , etapa inicial
5	1.97	Caudal 4 proveniente laguna verde entrante a la mesa wilfley 2, etapa final
6	3.36	Caudal de la pulpa de salida a la mesa wilfley 1
7	2.79	Caudal de la pulpa de salida a la mesa wilfley 2
8	$8.85 \cdot 10^{-6}$	Caudal del concentrado de la mesa wilfley 1
9	$1.20 \cdot 10^{-5}$	Caudal del concentrado de la mesa wilfley 2
10	1.95	Caudal de los medios de la mesa wilfley 1
11	2.6	Caudal de los medios de la mesa wilfley 2
12	4.48	Caudal de las colas de la mesa wilfley 1
13	4.58	Caudal de las colas de la mesa wilfley 2
14	$3.21 \cdot 10^{-5}$	Caudal del concentrado final del proceso
15	$1.12 \cdot 10^{-5}$	Caudal del concentrado recuperado de los medios
16	7.15	Caudal de salida al río Vetas
17	$1.12 \cdot 10^{-5}$	Caudal de entrada de agua por medio del mineral

4.2.1.1 DETERMINACIÓN DE LOS FLUIDOS

La toma de los caudales se realizó para el fluido tomado de la laguna, el mineral y el molino. Esto se llevó a cabo por medio de una serie de recipientes previamente seleccionados de material plástico y con un determinado volumen (L), también por medio de un cronómetro se tomaron las medidas de los tiempos de llenado de los recipientes (minutos). Para las muestras analizadas del mineral sólido (en roca), la determinación del caudal se llevó a cabo por medio de un previo análisis del porcentaje de humedad presente en las muestras y con este valor se calculará el volumen de agua presente en el mineral y en relación de este valor con el tiempo de producción dado por la compañía se obtendrá el respectivo caudal de la cantidad de agua presente en cada flujo del sistema. Los caudales de las pulpas que provienen del molino hacia las mesas wilfley fueron llevados a las normas estandarizadas ($\frac{m^3}{hora}$). La cantidad de agua proveniente de las lagunas no se podrá determinar en esta parte del análisis debido a la falta de parámetros, por ende al determinar las otras dos sub zonas se podrá calcular este valor y así poder determinar con base en este dato la huella hídrica azul de este subsistema. A continuación se presenta un ejemplo de la conversión de unidades realizadas a cada toma para llegar a las medidas estandarizadas por la normas ISO 14001 ($\frac{m^3}{hora}$)

El ejemplo presentado es tomado de un dato del porcentaje de humedad realizado al mineral de entrada y con el cual halleemos el caudal correspondiente en las unidades normativas.

4.2.1.2 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD

El contenido de humedad es usualmente reportado como el por ciento de humedad relativa, el cual es igual a la masa de agua por unidad de masa de suelo seco al horno. Este se define como (2):

$$\% \text{ porcentaje de humedad} = \frac{\text{peso del mineral húmedo} - \text{peso del mineral seco}}{\text{peso del mineral húmedo}} * 100 \quad (2)$$

Con base en la ecuación anterior el porcentaje de humedad para el dato tomado es:

$$\% \text{ porcentaje de humedad} = \frac{20.01(g) - 18.5841(g)}{20.01(g)} * 100$$

$$\% \text{ porcentaje de humedad} = 7.125937031$$

4.2.1.3 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL

Con base en el porcentaje obtenido, se deduce que por cada 100 g de mineral, hay presentes 7.125937031 g de agua. Para estimar el volumen de agua presente en el sistema se llevó a cabo una relación de densidad con los datos presentes (3):

$$\text{Densidad del agua} = \frac{1g}{ml} \quad (3)$$

Entonces:

$$\text{Volumen de agua} = \frac{7.13 g}{\frac{1g}{ml}}$$

$$\text{Volumen de agua} = 7.13 ml$$

Con respecto a la cantidad de mineral que entra al molino, se deduce dicho valor de la producción mostrada anteriormente y teniendo en cuenta que el horario laboral de la mina es de 8 horas diarias, se determinó que al sistema ingresa (4):

$$\text{CANTIDAD DE MINERAL} = \frac{10000000g}{\text{dia}} * \frac{1 \text{ dia}}{8 \text{ hora}} * \frac{1 \text{ hora}}{3600s} * \frac{1s}{100 \text{ min}}$$

(4)

$$\text{CANTIDAD DE MINERAL QUE INGRESA} = \frac{3.47 g}{\text{minuto}}$$

Con los datos obtenidos se procederá a determinar el caudal en las unidades estándar de la norma (5):

$$7.13 \text{ ml} * \frac{3.47 \text{ g}}{\text{minuto}} * \frac{1 * 10^{-6} (\text{m}^3)}{1(\text{ml})} * \frac{1 \text{ CS}}{0.01 (\text{Seg})} * \frac{1(\text{s})}{0.0003 (\text{hora})} = 8.91 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{hora}} \right) \text{ Por g de Mineral}$$

(5)

El caudal obtenido por tonelada de mineral es igual a (6):

$$8.91 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \text{ Por g} * \frac{1 \text{ Tonelada seca}}{1000000 \text{ g}} = 8.91 * 10^{-6} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{hora}} \right) \text{ por tonelada seca de mineral.}$$

(6)

A continuación, se muestran los datos tomados en las líneas que componen la zona inicial en las medidas normalizadas.

Tabla 7. Determinación de los caudales que comprenden el circuito de molienda en la etapa inicial de conminución del sistema en $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{hora}} \right)$

Número de muestras tomadas	Circuito 17	Circuito 6	Circuito 7
1	8.91*10 ⁻⁶	3.09	2.69
2	1.02*10 ⁻⁵	3.09	3.19
3	9.27*10 ⁻⁶	3.51	2.48
4	8.93*10 ⁻⁶	3.77	2.79
Total (Promedio)	1.16*10 ⁻⁵	3.36	2.79

Fuente: Autores

Donde:

Circuito 17: Caudal de entrada de agua por medio del mineral $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{hora}} \right)$

Circuito 6: Caudal de la pulpa de salida a la mesa wilfley número 1 $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{hora}} \right)$

Circuito 7: Caudal de la pulpa de salida a la mesa wilfley número 2 ($\frac{m^3}{hora}$)

Tabla 8. Porcentaje de error presentado por los equipos utilizados en la toma de caudales en la etapa inicial de conminución 1.

% de error del sistema	Error de la balanza (gramos)		Error en la medida del tiempo (minutos)
Valor	0.001		0.001
Error Total ($\frac{m^3}{H}$)	3.60*10 ⁻⁷		
Caudal Total ($\frac{m^3}{H}$)	Caudal de entrada de agua por medio del mineral	Pulpa de salida a la mesa wilfley número 1	Pulpa de salida a la mesa wilfley número 2
	1.12 * 10 ⁻⁵	3.36	2.79

Fuente: Autores

4.2.2 ZONA NÚMERO 2

4.2.2.1 DETERMINACIÓN DE LOS FLUIDOS

La toma de los caudales se realizó para la pulpa proveniente del molino, los sistemas de entrada de agua a las mesas Wilfley y los concentrados, medios y colas de cada mesa (ver figura 2). En esta zona la toma de la cantidad de los caudales se determinó de la misma manera que en la zona anterior; por ende las unidades y la conversación de las mismas para llevarlas a las estandarizadas por la norma ISO 14000 se desarrollaron en una secuencia igual a la realizada anteriormente. Vale la pena aclarar que la cantidad de solidos suspendidos en estos fluidos es nula para algunos casos (aguas entrantes de la laguna) y muy baja para los restantes (colas, medios) a excepción de los concentrados y las pulpas del molino, por ende se realizaron ensayos de humedad solo a los concentrados del proceso. Los valores de los concentrados por cuestiones de seguridad son entregados por la empresa y no fueron analizados en la investigación (el valor entregado por la empresa para el

porcentaje de humedad del concentrado obtenido por medio de la recuperación de las mesas wilfley es de 9.6%).

A continuación, se presenta la tabla de los fluidos tomados para la mesa wilfley número 1

Tabla 9. Determinación de los caudales que comprenden el circuito de la mesa Wilfley número 1

Número de muestras tomadas	Circuito 2	Circuito 3	Circuito 6	Circuito 12	Circuito 10	Circuito 8
1	2.69	0.69	3.09	4.49	1.99	1.04*10 ⁻⁵
2	2.37	0.94	3.09	4.79	2.06	1.04*10 ⁻⁵
3	2.71	0.67	3.51	4.49	1.87	1.04*10 ⁻⁵
4	2.14	0.85	3.77	4.99	1.88	1.04*10 ⁻⁵
5	2.63	0.66	—	4.49	1.94	—
6	2.43	0.58	—	3.91	1.89	—
7	2.54	0.59	—	4.79	1.97	—
8	2.28	0.62	—	3.99	1.91	—
9	2.45	0.58	—	3.96	1.99	—
10	2.50	0.82	—	4.49	1.96	—
PROMEDIO	2.47	0.70	3.36	4.48	1.95	1.04*10 ⁻⁵

Fuente: autores

Donde:

Circuito 2: Caudal 1 proveniente de la laguna, entrante a la mesa en la etapa inicial para el lavado de la pulpa ($\frac{m^3}{h}$)

Circuito 3: Caudal 2 proveniente de la laguna, entrante la mesa en la etapa final para el lavado de las colas y medios ($\frac{m^3}{h}$)

Circuito 6: Caudal de la pulpa proveniente del molino ($\frac{m^3}{hora}$)

Circuito 12: Caudal de las colas del sistema ($\frac{m^3}{hora}$)

Circuito 10: Caudal de los medios del sistema ($\frac{m^3}{hora}$)

Circuito 8: Caudal de los concentrados del sistema ($\frac{m^3}{hora}$)

Tabla 10. Porcentaje de error presentado por los equipos utilizados en la toma de los caudales de la mesa Wilfley número 1

% de error del sistema	Error en la medida del tiempo (minutos)					
Valor	0.001					
Caudal Total ($\frac{m^3}{h}$)	2.47	0.70	3.36	4.48	1.95	8.85*10 ⁻⁶

Fuente: Autores

4.2.3. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DE LA MESA WILFLEY NÚMERO 1

Para hallar el caudal de entrada de la mesa Wilfley 1, se utilizó la siguiente ecuación (7):

$$\boxed{\text{CAUDAL DE ENTRADA} = \text{Circuito 2} + \text{Circuito 3} + \text{Circuito 6}} \quad (7)$$

Reemplazando obtenemos que el caudal en ($\frac{m^3}{hora}$) es igual a

$$\text{CAUDAL DE ENTRADA} = 2.47 + 0.70 + 3.36$$

$$\text{CAUDAL DE ENTRADA} = 6.54$$

$$\boxed{\text{CAUDAL DE SALIDA} = \text{Circuito 12} + \text{Circuito 10} + \text{Circuito 8}} \quad (8)$$

Sustituyendo obtenemos que el caudal en ($\frac{m^3}{hora}$) es igual a:

$$\text{CAUDAL DE SALIDA} = 4.48 + 1.95 + 8.85 * 10^{-6}$$

$$\text{CAUDAL DE SALIDA} = 6.42$$

El caudal obtenido para estos sistemas anteriormente fue llevado al tiempo de producción diaria para su cálculo final:

$$\boxed{\text{Caudal de entrada} = 6.54 * \frac{m^3}{hora} * 8 \text{ horas}} \quad (9)$$

$$\text{Caudal de entrada} = 52.30 * \frac{m^3}{dia}$$

$$\boxed{\text{Caudal de salida} = 6.42 * \frac{m^3}{hora} * 8 \text{ horas}} \quad (10)$$

$$\text{Caudal de salida} = 51.39 * \frac{m^3}{dia}$$

$$HHA = \frac{\text{caudal de entrada} - \text{caudal de salida}}{\text{producción}} \quad (11)$$

$$HHA = \frac{52.30 \frac{m^3}{\text{día}} - 51.39 \frac{m^3}{\text{día}}}{10 \frac{\text{Ton seca}}{\text{día}}}$$

$$HHA(\text{zona dos})_{\text{sub 1}} = 0.09 m^3$$

A continuación, se presenta la tabla de los fluidos tomados para la mesa wilfley número 2

Tabla 11. Determinación de los caudales que comprenden el circuito de la mesa Wilfley número 2

Número de muestras tomadas	Circuito 4	Circuito 5	Circuito 7	Circuito 13	Circuito 11	Circuito 9
1	3.49	1.99	2.69	3.79	2.59	$1.19 * 10^{-5}$
2	2.93	1.97	3.19	5.14	2.57	$1.19 * 10^{-5}$
3	3.08	2.12	2.48	4.39	2.67	$1.19 * 10^{-5}$
4	2.73	1.91	2.79	5.14	2.79	$1.19 * 10^{-5}$
5	2.712	2.03	—	4.14	2.63	—
6	2.61	1.89	—	5.22	2.29	—
7	3.27	1.90	—	4.34	2.73	—
8	3.08	1.95	—	4.86	2.67	—
9	2.75	1.90	—	4.62	2.55	—
10	3.27	2.04	—	4.14	2.52	—
PROMEDIO	2.99	1.97	2.79	4.58	2.60	$1.19 * 10^{-5}$

Fuente: Autores

Donde:

Circuito 4: Caudal 3 proveniente de la laguna entrante a la mesa en la etapa inicial para el lavado de la pulpa ($\frac{m^3}{H}$)

Circuito 5: Caudal 4 proveniente de la laguna entrante la mesa en la etapa final para el lavado de las colas y medios ($\frac{m^3}{H}$)

Circuito 7: Caudal de la pulpa proveniente del molino ($\frac{m^3}{H}$)

Circuito 13: caudal de las colas del sistema ($\frac{m^3}{hora}$)

Circuito 11: caudal de los medios del sistema ($\frac{m^3}{hora}$)

Circuito 9: caudal de los concentrados del sistema ($\frac{m^3}{hora}$)

Tabla 12. Porcentaje de error presentado por los equipos utilizados en la toma de los caudales de la mesa Wilfley número 2

% de error del sistema	Error en la medida del tiempo (minutos)					
Valor	0.001					
Caudal Total ($\frac{m^3}{H}$)	2.99	1.97	2.79	4.58	2.60	$1.19 * 10^{-5}$

Fuente: Autores

4.2.4 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DE LA MESA WILFLEY NÚMERO 2

Para hallar el caudal de entrada de la mesa Wilfley 2, se utilizó la ecuación (12):

CAUDAL DE ENTRADA ($\frac{m^3}{hora}$) = Circuito 4+ Circuito 5 + Circuito 7
--

(12)

Reemplazando los parámetros medidos por sus correspondientes valores obtenemos que el caudal de entrada en $\left(\frac{m^3}{hora}\right)$ es igual a

$$Caudal\ de\ entrada = 2.99 + 1.97 + 2.79$$

$$Caudal\ de\ entrada = 7.75$$

CAUDAL DE SALIDA $\left(\frac{m^3}{H}\right) = \text{Circuito 13} + \text{Circuito 11}$ + Circuito 9
--

(13)

Reemplazando los parámetros por los valores obtenidos se puede determinar que el caudal de salida en $\left(\frac{m^3}{H}\right)$ es igual a:

$$Caudal\ de\ salida = 4.58 + 2.60 + 1.19 * 10^{-5}$$

$$Caudal\ de\ salida = 7.18$$

El caudal tenido para estos sistemas anteriormente será llevado al tiempo de producción diaria para su cálculo final:

$Caudal\ de\ entrada = 7.75 * 8 \frac{horas}{dia}$
--

(14)

$$Caudal\ de\ entrada = 61.99 \frac{m^3}{dia}$$

$Caudal\ de\ salida = 7.18 \frac{m^3}{hora} * 8 \frac{horas}{dia}$
--

(15)

$$Caudal\ de\ salida = 57.42 \frac{m^3}{dia}$$

$$\boxed{HHA = \frac{\text{Caudal de entrada} - \text{Caudal de salida}}{\text{producción}}} \quad (11)$$

$$HHA = \frac{61.99 \frac{m^3}{\text{día}} - 57.42 \frac{m^3}{\text{día}}}{10 \frac{Tn \text{ seca}}{\text{día}}}$$

$$HHA(\text{zona dos})_{\text{sub 2}} = 0.46 \text{ m}^3$$

$$\boxed{HHA(\text{zona dos}) = 0.09 \text{ m}^3 + 0.46 \text{ m}^3} \quad (16)$$

$$(\text{zona dos}) = 0.55 \text{ m}^3$$

4.3 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DE ENTRADA AL PROCESO DE MOLIENDA (ZONA INICIAL) CON BASE EN UN BALANCE DE FLUJOS CON LOS DATOS OBTENIDOS DE LA ZONA 2 Y LA ENTRADA GENERAL DEL FLUJO AL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE ORO

Tabla 13. Determinación del caudal que ingresa al proceso general proveniente de la laguna verde

Número de muestras tomadas	Circuito 1 ($\frac{m^3}{h}$)
1	12.86
2	13.33
3	17.14
4	12.41
5	14.41
6	12.86
7	15.65
8	17.99
9	11.99
10	14.39
PROMEDIO	15.72

Fuente: Autores

Donde:

Circuito 1: caudal que ingresa al proceso general proveniente de la laguna verde.

Tabla 14. Porcentaje de error presentado por los equipos utilizados en la toma de los caudales provenientes de la laguna verde

% de error del sistema	Error en la medida del tiempo (minutos)
Valor	0.001
Caudal Total ($\frac{m^3}{H}$)	15.72

Fuente: Autores

4.3.1 Balance de flujo de las zonas inicial y zona 2

$$\text{Circuito 1} = \text{caudal de entrada proceso de molienda (zona inicial)} + (\text{Circuito 2} + \text{Circuito 3}) + (\text{Circuito 4} + \text{Circuito 5})$$

(17)

Despejando obtenemos que:

$$\text{Caudal de entrada al proceso de molienda (zona inicial)} \left(\frac{m^3}{hora} \right) = \text{Circuito 1} - (\text{Circuito 2} + \text{Circuito 3}) + (\text{Circuito 4} + \text{Circuito 5})$$

(18)

Reemplazando los parámetros se deduce que el caudal de entrada al proceso de molienda en $\left(\frac{m^3}{hora}\right)$ es igual a:

$$\text{caudal de entrada al proceso de molienda} = 15.72 - [(2.47 + 0.70) + (2.99 + 1.97)]$$

$$\text{caudal de entrada al proceso de molienda} = 7.58$$

De acuerdo al valor obtenido se procederá a calcular el HHA (Zona inicial):

$$\text{Caudal de entrada } \left(\frac{m^3}{\text{día}}\right) = \left(7.58 \frac{m^3}{\text{hora}} * 8 \frac{\text{horas}}{\text{día}}\right) + \left(1.12 * 10^{-5} \frac{m^3}{\text{hora}} * 8 \frac{\text{horas}}{\text{día}}\right)$$

(19)

$$\text{Caudal de entrada } \left(\frac{m^3}{\text{día}}\right) = 60.64$$

$$\text{Caudal de Salida } \left(\frac{m^3}{\text{día}}\right) = \left(3.36 \frac{m^3}{\text{hora}} * 8 \frac{\text{horas}}{\text{día}}\right) + \left(2.79 \frac{m^3}{\text{hora}} * 8 \frac{\text{horas}}{\text{día}}\right)$$

(20)

$$\text{Caudal de Salida } \left(\frac{m^3}{\text{día}}\right) = 49.19$$

$$\text{HHA} = \frac{\text{Caudal de entrada} - \text{Caudal de salida}}{\text{producción}} \quad (11)$$

$$\text{HHA} = \frac{60.64 \frac{m^3}{\text{día}} - 49.19 \frac{m^3}{\text{día}}}{10 \frac{\text{Tn seca}}{\text{día}}}$$

$$\text{HHA (zona inicial)} = 1.14m^3$$

4.4 ZONA 3

4.4.1 DETERMINACIÓN DEL FLUJO

La determinación de la huella hídrica azul para esta zona se realizó bajo el análisis de los parámetros de la sumatoria de los caudales de salida obtenidos en la zona anterior para los concentrados, medios y colas de las mesas correspondientes del proceso, estos datos fueron tomados como los iniciales o de entrada de esta zona y el caudal final se determinó con los valores obtenidos de vertientes finales arrojados por el proceso al Río Vetas y el valor del porcentaje de humedad de los concentrados finales obtenidos de las etapas de recuperación de las mesas wilfley

y del concentrado recuperado de los medios (estos datos serán llevados a los respectivos caudales con base en la misma temática realizada para los valores de la zona inicial. El valor entregado de porcentaje de humedad por la empresa para el concentrado obtenido de los medios es de 9.6%) (Ver figura 2)

4.4.2 CÁLCULO DEL CAUDAL DE ENTRADA INICIAL

$$\text{Caudal de entrada del sistema } \left(\frac{m^3}{\text{día}}\right) = \text{caudal de salida (Zona 2 mesa Wilfley 1)} + \text{Caudal de salida (Zona 2 mesa Wilfley 2)} \quad (21)$$

$$\text{Caudal de entrada del sistema } \left(\frac{m^3}{\text{día}}\right) = 51.39 + 57.42$$

$$\text{Caudal de entrada del sistema } \left(\frac{m^3}{\text{día}}\right) = 108.82$$

4.4.3 CÁLCULO DEL CAUDAL DE SALIDA DE LA ZONA TRES

Para la determinación de este valor se presenta a continuación la siguiente tabla con los datos correspondientes en el cálculo hallados por un análisis estadístico.

Tabla 15. Determinación de los caudales de la etapa final del proceso en $\left(\frac{m^3}{\text{hora}}\right)$

Número de muestras tomadas	Circuito 16	Circuito 14	Circuito 15
1	7.99	$1.19 * 10^{-5}$	$1.12 * 10^{-5}$
2	8.99	$1.19 * 10^{-5}$	$1.12 * 10^{-5}$
3	7.49	$1.19 * 10^{-5}$	$1.12 * 10^{-5}$
4	7.49	$1.19 * 10^{-5}$	$1.12 * 10^{-5}$
5	5.81	---	---
6	8.18	---	---
7	7.83	---	---
8	7.19	---	---
9	5.29	---	---
10	5.22	---	---
PROMEDIO	7.15	$1.1999990 * 10^{-5}$	$1.12 * 10^{-5}$

Fuente: Autores

Donde:

Circuito 16: Caudal de salida al río Vetas procedente del proceso ($\frac{m^3}{hora}$)

Circuito 14: caudal del concentrado recuperado por las mesas wilfley 1 y 2 del sistema.

Circuito 15: caudal del concentrado recuperado de los medios.

Tabla 16. Porcentaje de error presentado por los equipos utilizados en la toma de los caudales de la zona final del proceso

% de error del sistema	Error en la medida del tiempo (minutos)		
Valor	0.001		
Caudal Total ($\frac{m^3}{H}$)	7.15	$1.19 * 10^{-5}$	$1.12 * 10^{-5}$

Fuente: Autores

El caudal de salida en ($\frac{m^3}{hora}$) es igual a:

$$\mathbf{Caudal\ de\ salida} = 7.15 + 1.19 * 10^{-5} + 1.12 * 10^{-5}$$

$$\mathbf{Caudal\ de\ salida} = 7.15 \left(\frac{m^3}{hora} \right)$$

El caudal de Salida en ($\frac{m^3}{día}$) es igual a:

$$\mathbf{Caudal\ de\ salida} = 7.15 \left(\frac{m^3}{hora} \right) * 8 \frac{hora}{día}$$

$$\mathbf{Caudal\ de\ salida} = 57.22 \frac{hora}{día}$$

$\mathbf{HHA} = \frac{\mathbf{Caudal\ de\ entrada} - \mathbf{Caudal\ de\ salida}}{\mathbf{producción}}$

(11)

$$HHA = \frac{108.81 \frac{m^3}{día} - 57.22 \frac{m^3}{día}}{10 \frac{Ton\ seca}{día}}$$

$$HHA (zona tres) = 5.16m^3$$

4.5 DETERMINACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA AZUL (HHA) TOTAL DEL PROCESO

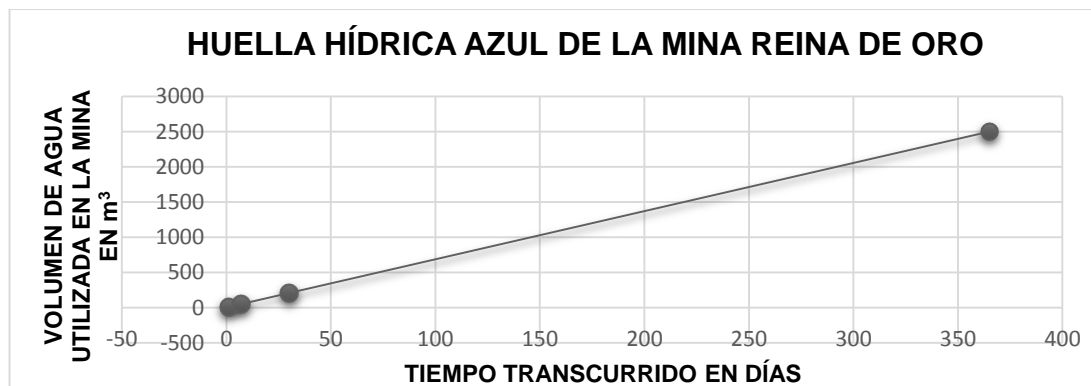
La HHA del proceso es igual a la suma de las tres sub huellas determinadas anteriormente, conforme a esto la HHA de la mina reina de oro en m^3 es:

$$\begin{aligned} HHA \text{ del proceso de recuperacion de oro de la mina reina de oro en } m^3 \\ = 1.14 + 0.55 + 5.16 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} HHA \text{ del proceso de recuperacion de oro de la mina reina de oro en } m^3 \\ = 6.85 \end{aligned}$$

Con base en el resultado obtenido y sin una futura variación de las etapas de recuperación en el proceso de la mina y para una cantidad constante de mineral extraído (10 Ton seca por día) se puede predecir el comportamiento de la huella hídrica azul con el tiempo como se muestra a continuación.

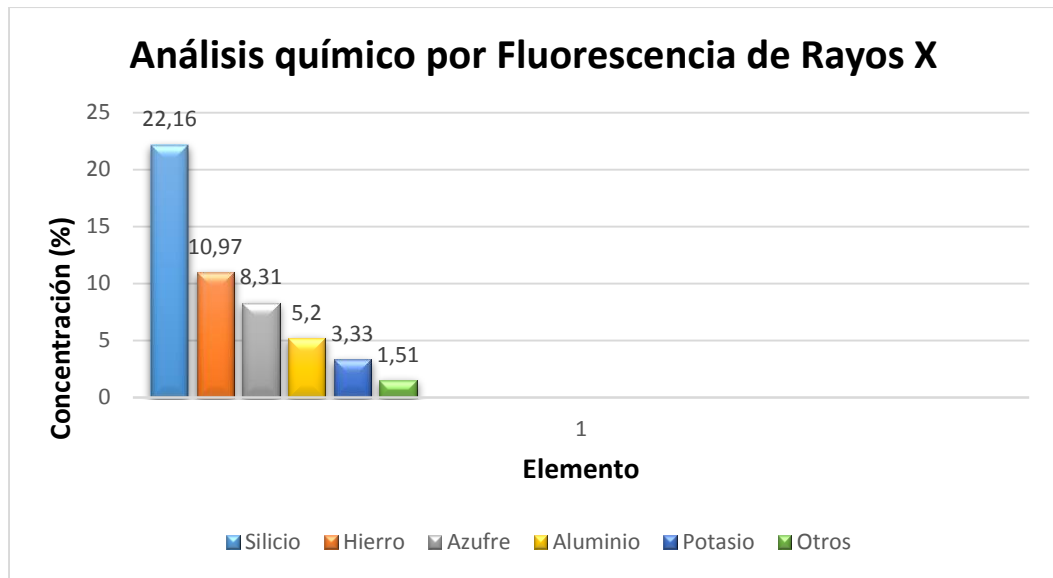
Figura 3. Variación de la Huella Hídrica Azul en el proceso de recuperación de la Mina Reina de Oro.



Fuente: Autores

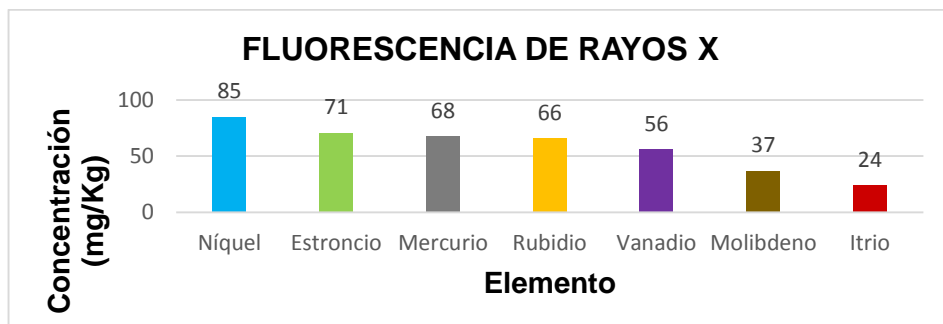
4.6 ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Figura 4. Cuantificación porcentual de los elementos de mayor cantidad de la muestra, obtenidos del análisis de Fluorescencia de Rayos X del mineral aurífero de la mina Reina De Oro.



Fuente: Autores

Figura 5. Cuantificación en mg del elemento por kilogramo de muestra de los elementos de menor cantidad obtenidos del análisis de fluorescencia de rayos X del mineral aurífero de la mina Reina De Oro



Fuente: Autores

Los elementos de Hierro, Plomo y Cobre, fueron los seleccionados conforme a lo analizado por fluorescencia de rayos X, de acuerdo a la variación de las características físicas del agua que estos elementos le ocasionan y al grado de alteración de salud que puede presentar una persona al ingerir estos elementos en exceso. En el área de la salud humana ingerir un exceso de hierro puede conducir a la hemocromatosis, una enfermedad grave que puede dañar los órganos del cuerpo. Los primeros síntomas incluyen fatiga, pérdida de peso y dolor en las articulaciones, pero si la hemocromatosis no es tratada, puede conducir a enfermedades del corazón, problemas del hígado y la diabetes. Un análisis de sangre puede identificar la sobrecarga de hierro [11].

El cobre como elemento en exceso en el agua al ser ingerido por una persona puede ocasionar en la salud humana “efectos nocivos como por ejemplo irritación de la nariz, la boca y los ojos, vómitos, diarrea, calambres estomacales, náusea y aun la muerte en altas cantidades ingeridas “[12].

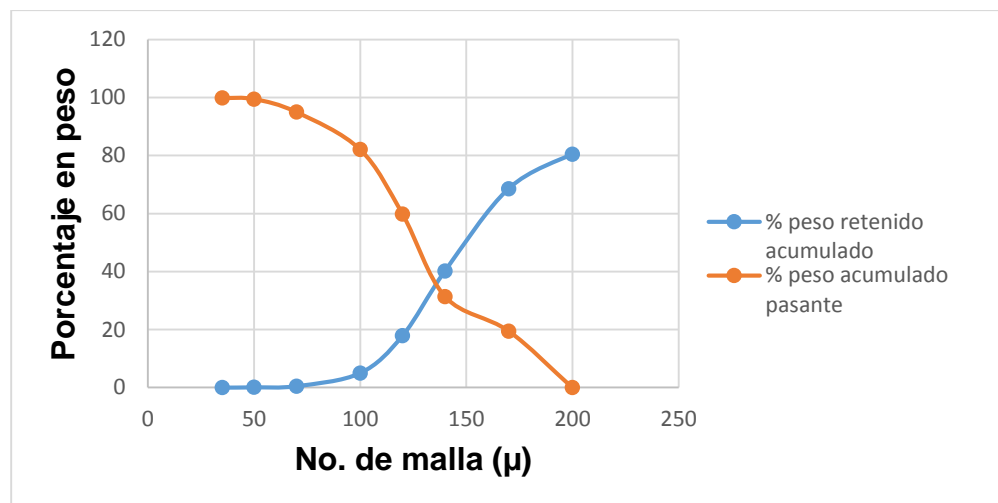
“El plomo disuelto en el agua superficial puede provocar una serie de efectos perjudiciales para la salud. El tipo y los efectos dependen de la cantidad de plomo que se haya acumulado en el organismo con el tiempo. Los efectos en la salud son daños en el cerebro y los riñones, anemia y una disminución en el peso de los recién nacidos. También existen indicios de que el plomo puede provocar un aumento de la presión sanguínea. Los síntomas de una intoxicación grave por plomo son dolores de estómago, vómitos, disminución del apetito o náuseas.” [13]

La evaluación de la cantidad presentada de estos elementos señalados en los afluentes finales vertidos al río Vetas , serán deducidas por medio del ensayo de absorción atómica el cual arrojará en ppm la cantidad presente de cada elemento en el agua final; Como verificación de la calidad del agua entrante al proceso proveniente de la laguna verde , se le realiza el mismo ensayo para conocer la cantidad inicial de estos elementos en dicho afluente y tener la certeza del aporte que hace el mineral aurífero a la contaminación posible del agua .

La figura 7, permitió deducir que según lo mostrado por el resultado del ensayo de fluorescencia de rayos X, se puede ver la presencia en su gran porcentaje de silicio (22.16%), seguido de elementos como el hierro (10.97%), azufre (8.31%), aluminio (5.2%), potasio (3.33%), entre otros. Pese a que los elementos como el plomo y cobre se hallan en un porcentaje bajo con respecto a otros como el mismo hierro o como el azufre, el cual el último también es un elemento crítico, el cobre y el plomo fueron designados para el estudio debido a las condiciones presentadas por el laboratorio de ensayo y a que su presencia en el agua trae problemáticas a la salud humana, como ya se ha mencionado anteriormente.

4.7 ANÁLISIS DE GRANULOMETRÍA

Figura 6. Distribución granulométrica del mineral inicial.



Fuente: Autores

En la figura 6, se pueden observar los rangos de tamaño que presentan los granos de la muestra al ser introducidos en el sistema acuoso, con base en esto se pudo determinar que los rangos principales presentes en la muestra van desde las 100-200 micras (μ), los cuales no afectan las condiciones de sólidos suspendidos en el afluente.

4.8 ENSAYO DE HUMEDAD

El ensayo consistió en analizar las cantidades de humedad que presentaban las muestras de mineral al ser introducidas al sistema, por medio del molino, la cual nos permitió obtener una relación de la cantidad de agua presente en el mineral y por medio de la densidad de la misma, conocer el volumen de agua que pasa al proceso por medio del mineral y así en conjunto con el tiempo que demora en descender al molino poder determinar el caudal de este circuito. Teniendo como base lo mencionado, el ensayo se llevó a cabo en el laboratorio de pirometalurgia adscrito a la escuela de Ingeniería Metalúrgica, en donde se designaron 4 muestras colocadas en 4 respectivos crisoles los cuales fueron pesados y llevados a una temperatura constante durante 24 horas. Después fueron retirados y pesados nuevamente. Luego se calculó el porcentaje de pérdida de peso el cual con base en la ecuación (23), permitió obtener el porcentaje de humedad de cada muestra y así estadísticamente determinar el valor de humedad general del mineral al momento de ingresar a la planta.

$$\% \text{ DE HUMEDAD: } \frac{\text{Peso inicial}(g) - \text{Peso final}(g)}{\text{Peso inicial}(g)} * 100$$

(22)

La ecuación (22), relaciona la variación de pesos de una muestra con respecto a la cantidad de agua que presenta la misma y calcula el porcentaje de humedad con el que cuenta la muestra.

4.9 ANÁLISIS DE ABSORCIÓN ATÓMICA

El factor de la carga contaminante, el cual hace parte del cálculo de la HHG, para las etapas de concentración de oro de la mina reina de oro será considerado de acuerdo a los resultados obtenidos por el ensayo de absorción serán relacionados con los elementos presentes en el análisis que se hallen por fuera de los rangos permisibles de la norma ambiental tenida en la investigación, esto debido a que en el proceso no se halla la presencia de mercurio ni cianuro como agentes contaminantes habituales en el medio y en ningún momento se observó en el

desarrollo del proceso los operarios introdujeran alguna sustancia o elemento físico externo que entre hacer parte del mineral.

El ensayo se realizó para los afluentes de entrada y los finales vertidos al río Surata y se encontraron que los valores de las aguas provenientes de laguna contienen concentraciones de hierro, plomo y cobre iguales a cero y los afluentes finales encierran concentraciones de hierro iguales a $9.4 \frac{mg}{L}$, de cobre iguales a $0.23 \frac{mg}{L}$ y plomo iguales a $0.19 \frac{mg}{L}$. Esto de la mano de los valores permitidos por la resolución deduce que el plomo y el cobre se hallan dentro de los rangos, mientras el hierro está muy por encima del valor máximo permisible ($2 \frac{mg}{L}$). Conforme a lo obtenido la determinación de la huella hídrica gris se realizara para el hierro como elemento contaminante del agua.

De esta manera el cálculo de la HHG para la mina reina de oro es.

$$HHG: \frac{CC \text{ EN EXCESO } \left(\frac{\text{masa}}{\text{tiempo}} \right)}{C_{max} \left(\frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}} \right) - C_{nat} \left(\frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}} \right)} \quad (23)$$

La determinación de la carga contaminante es la siguiente

$$Cc \text{ en exceso } (Fe) = 9.41 \frac{mg}{L} * \frac{1 L}{0.001 m^3}$$

$$Cc \text{ en exceso } (Fe) = 9000 \frac{mg}{m^3}$$

Si el caudal de salida al río Suratá es igual a $7.15 \frac{m^3}{hora}$

$$Cc \text{ en exceso } (Fe) = 9000 \frac{mg}{m^3} * 7.15 \frac{m^3}{hora}$$

$$Cc \text{ en exceso } (Fe) = 64.350 \frac{mg}{Hora}$$

De modo que

$$HHG: \frac{64.350 \frac{mg}{hora}}{2 \left(\frac{mg}{L} \right) - 0 \left(\frac{mg}{L} \right)}$$
$$HHG: 32175 \frac{L}{hora}$$

Llevado este valor a las unidades del caudal establecido

$$HHG: 32.175 \frac{m^3}{hora}$$

De acuerdo a lo plasmado por el manual de la huella hídrica “. Cuando el efluente contenga una carga alta de productos contaminantes, puede ocurrir que la huella hídrica gris calculada supere el caudal de los ríos existentes o flujo de agua subterránea. En este caso, la contaminación va más allá de la capacidad de asimilación del cuerpo de agua receptor.” Por ende se destaca que la huella hídrica gris pueda llegar a ser mayor que el flujo de agua existente en el sector lo que demuestra que la huella hídrica gris no indica "el volumen de agua contaminada" (porque no sería capaz de contaminar un volumen mayor que la existente). Si no que es un indicador de la gravedad de la contaminación del agua, expresada en términos del volumen de agua dulce necesaria para asimilar la carga de contaminantes existentes.

5. CONCLUSIONES

- Se logró llevar a cabo el cálculo de la huella hídrica del proceso de recuperación de oro de la mina Reina De Oro del municipio de Vetes Santander, obteniendo como resultado una HH igual a $21.79 \frac{m^3}{Ton}$, lo que demuestra que los valores determinados se hallan en rangos favorables con forme a lo entregado por otros estudios de procesos semejantes.
- A pesar que los resultados no son estadísticamente representativos, el impacto ambiental demostrado en los análisis realizados permitió observar la presencia de una contaminación ocasionada por la alta concentración de hierro disuelto. Esta inferencia se basó conforme a lo estipulado por la norma ambiental legal 0631 del 17 de marzo del 2015.
- Los resultados obtenidos por absorción atómica permitieron inferir la presencia de plomo en las aguas finales de la planta en una proporción de $0.19 \frac{mg}{l}$ los cuales se hallan dentro de la resolución ambiental .La presencia de cobre estimada por el ensayo fue de $0.23 \frac{mg}{l}$, valor que se halla también dentro de los requisitos y la medida de hierro disuelto en las aguas es igual a $9.41 \frac{mg}{l}$ cifra que se encuentra fuera lo exigido por la resolución.

6. RECOMENDACIONES

- Para complementar los valores correspondientes a la huella hídrica del proceso de recuperación de oro y tener una visión más amplia sobre el impacto ambiental de la minería de oro en el municipio de vetas Santander, es necesario evaluar aspectos como la oferta hídrica de la zona, con esto se identifica si el sector está demandando más agua de la que hay disponible, o si está afectando la disponibilidad del recurso aguas abajo donde ésta tiene otros usos. También se pueden hacer estudios de carácter social, por ejemplo valorar el número de empleos que se generan y en qué condiciones laborales, y de esta forma se analiza si la minería es una actividad sostenible desde los aspectos sociales, económicos y naturales.
- La cantidad de agua gastada en las etapas finales del proceso deben ser estudiadas con mayor profundidad, para establecer etapas adjuntas que logren recuperar una mayor cantidad de agua y así tener mejores resultados al momento de analizar las condiciones ambientales de la mina .
- La escuela de metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander debe seguir promoviendo el desarrollo de estudios que encierren el impacto ambiental de los procesos metalúrgicos, para así englobar un crecimiento en la investigación nacional que permita generar bases estadísticas del comportamiento de los procesos extractivos y desarrollar pautas que lleven a la preservación legal del ecosistema colombiano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] University of Twente, the Netherlands. Huella Hídrica. [En línea] <<http://www.huellahidrica.org/?page=files/home>>. [Citado el 15 enero del 2016].
- [2] Material didáctico sobre la huella hídrica. Documento elaborado para el Día Mundial del Agua 2012 por la Fundación Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua. [en línea] <http://www.centa.es/descargas/huellahidrica/Material_didactico_huella_hidrica.pdf>.
- [3] Guía minero ambiental. Beneficio y transformación MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA - MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. [en línea] <<http://www.minminas.gov.co/documents/10180/416798/beneficio.pdf>> [16 octubre de 2002]
- [4] Beneficio y transformación de minerales. SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO [en línea] <<http://portalweb.sgm.gob.mx/museo/es/yacimientosminerales/beneficiotransminerales>> [27 de marzo 2014]
- [5] Introducción a la Metalurgia. Ing. Arturo Lobato Flores. [en línea] <<https://www.convencionminera.com/perumin31/images/perumin/recursos/Metalurgia%20IIMP%20Introduccion%20a%20la%20metalurgia.pdf>> [marzo 2011]

- [6] Conservación y Carbono S.A.S. [En línea] <<http://www.conservacionycarbono.com/analisis-del-ciclo-de-vida/iso14040>>. [Citado enero 2016].
- [7] Evaluación del impacto ambiental de uniones roscadas en bronce mediante el análisis del ciclo de vida (ACV) de productos. Carlos Eduardo Fúquene-Retamoso, Jaime Andrés Lara-Borrero, Sandra Méndez-Fajardo [en línea] <http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-21262010000200003&script=sci_arttext> [julio-diciembre 2010]
- [8] Inventario de Emisiones de GEI para PyMEs (2009) [en línea] <<http://huelladecarbono.minenergia.cl/ciclo-vida-producto>>
- [9] The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard. Arjen Y. Hoekstra, Ashok K. Chapagain, Maite M. Aldaya and Mesfin M. Mekonnen. [En línea] <http://waterfootprint.org/media/downloads/TheWaterFootprintAssessmentManual_2.pdf> Washington, EE.UU. (2011)
- [10] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución No. 0631. Colombia, 17 de marzo de 2015.
- [11] Efectos en la salud del hierro en el agua potable. [En línea] <<http://www.livestrong.com/es/efectos-salud-del-hierro-en-el-agua-potable/>> Texas, Estados Unidos. 2014

- [12] Cobre- efectos en la salud. Jesús Marín Ruiz. [En línea] <<http://socializandovoces.blogspot.com.co/2008/02/cobre-efectos-en-lasalud.html>> Nicaragua, 2008
- [13] FACTS plomo en el agua potable. [En línea] <http://www.state.nj.us/health/eoh/hhazweb/lead_sp.pdf> New Jersey, EE.UU. 2014

BIBLIOGRAFÍA

- Inventario de Emisiones de GEI para PyMEs. [en línea] <<http://huelladecarbono.minenergia.cl/ciclo-vida-producto>>
- REVISANDO PROBLEMÁTICA MINERO-AMBIENTAL EN EL PÁRAMO DE SANTURBÁN. Camilo Rodríguez Triana. Bogotá, Colombia. 6 de abril de 2015.
- LA MINERÍA COLOMBIANA 2.010 - 2020, UNA INCOGNITA (* UNA PARTICULAR Y LIBRE VISION) Documento entregado a German Santamaría (Embajador en Portugal) para comité de empalme Gobierno Santos. Bogotá, Colombia. 2009.
- Alcaldía de Vetás – Santander. UNIDOS POR VETAS, LOGRAREMOS EL CAMBIO. Sitio oficial de Vetás en Santander, Colombia. [En línea] <<http://www.vetas-santander.gov.co/index.shtml#5>> (2010).
- Manual para la evaluación de la Huella Hídrica. Definiendo una norma global. Arjen Y. Hoekstra. 2010.
- Global water scarcity: The monthly blue water footprint compared to blue water availability for the world's major river basins. A.Y.Hoekstra, M.M. Mekonnen. September 2011.

- Evaluación multisectorial de la huella hídrica en Colombia. Resultados por subzonas hidrográficas en el marco del estudio nacional del agua 2014. Medellín, 2015.

ANEXOS

Anexo A. Etapas que componen a la mina Reina de Oro y los afluentes que la surten

Mina Reina de Oro en Vetás – Santander



Fuente: La minería Colombiana 2010 – 2020 una incógnita (* una particular y libre visión). 2009

Anexo B. Lagunas verdes, principal fuente que surte de agua a la Mina Reina de Oro de Vetás - Santander



Fuente: Alcaldía de Vetás - Santander

Anexo C. Valores permisibles según la norma ambiental 0631 del 17 de marzo del 2015.

Valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales de las actividades de minería.

PARÁMETRO	UNIDADES	EXTRACCIÓN DE CARBÓN DE PIEDRA Y LIGNITO	EXTRACCIÓN DE MINERALES DE HIERRO	EXTRACCIÓN DE ORO Y OTROS METALES PRECIOSOS
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Hidrocarburos				
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	10,00	10,00	10,00
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)		Análisis y Reporte		
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno)		Análisis y Reporte		
Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles (AOX)		Análisis y Reporte		
Compuestos de Fósforo				
Ortofosfatos (P-PO ₄ ³⁻)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno				
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO ₂ ⁻)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Iones				
Cianuro Total (CN ⁻)	mg/L	1,00	1,00	1,00
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	500,00	250,00	250,00
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	1.200,00	250,00	1.200,00
Sulfuros (S ²⁻)	mg/L	1,00	1,00	1,00
Metales y Metaloides				
Arsénico (As)	mg/L	0,10	0,10	0,10
Cadmio (Cd)	mg/L	0,05	0,05	0,05
Cinc (Zn)	mg/L	3,00	3,00	3,00
Cobre (Cu)	mg/L	1,00	1,00	1,00
Cromo (Cr)	mg/L	0,50	0,50	0,50
Hierro (Fe)	mg/L	2,00	2,00	2,00
Mercurio (Hg)	mg/L	0,002	0,002	0,002
Níquel (Ni)	mg/L	0,50	0,50	0,50
Plata (Ag)	mg/L			0,50
Plomo (Pb)	mg/L	0,20	0,20	0,20
Otros Parámetros para Análisis y Reporte				
Acidez Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Cálrica	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Color Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm)	m ⁻¹	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución No. 0631., 2015

Anexo D. Resultados análisis de absorción atómica.

IDENTIFICACIÓN EXTERNA	RESULTADOS (mg/L)			IDENTIFICACIÓN INTERNA
	Cu	Fe	Pb	
Agua de entrada al proceso	>LD	>LD	>LD	G-001-16
Agua de salida de la mina	0.23	9.41	0.19	G-002-16

Fuente: Laboratorio Planta de aceros.

