



Universidad Nacional  
**Federico Villarreal**

Vicerrectorado de  
**INVESTIGACIÓN**

Facultad de  
**INGENIERÍA GEOGRÁFICA,  
AMBIENTAL Y ECOTURISMO**

**ANÁLISIS NUMÉRICO DEL IMPACTO FÍSICO EN  
LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DEBIDO AL  
DESAGÜE DE MINA DEL PROYECTO MINERO  
PAMPA DEL PONGO**

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo

**AUTOR (A)**

Ramos Pérez, Frank

**ASESOR (A)**

Sánchez Carrera, Dante Pedro

Lima - Perú  
2016

**UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA AMBIENTAL Y  
ECOTURISMO**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA**



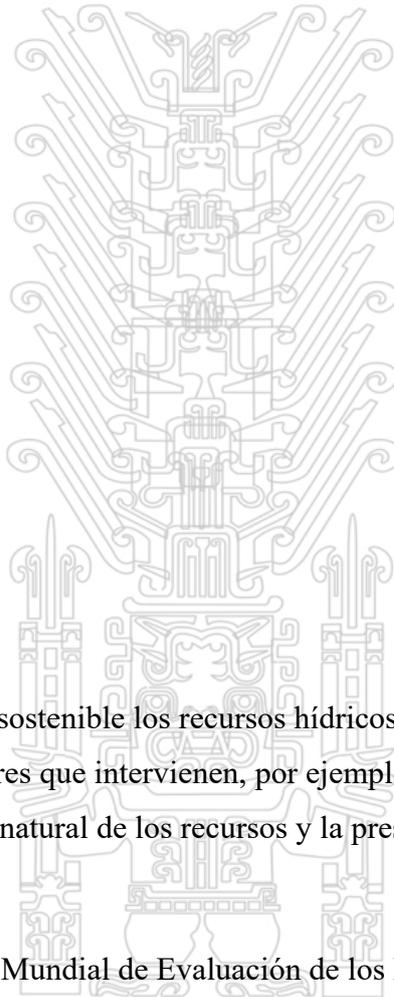
**“ANÁLISIS NUMÉRICO DEL IMPACTO FÍSICO EN LAS AGUAS  
SUBTERRÁNEAS DEBIDO AL DESAGÜE DE MINA DEL PROYECTO  
MINERO PAMPA DEL PONGO”**

Tesis presentado por el: **Bachiller Frank Ramos Pérez**

Para obtener el título Profesional de: **Ingeniero Geógrafo**

**LIMA, PERÚ**

**2015**



## **PENSAMIENTOS**

“Usar de forma sostenible los recursos hídricos supone un reto debido a los muchos factores que intervienen, por ejemplo los cambios en el clima, la variabilidad natural de los recursos y la presión debida a las actividades humanas;”

(Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos, WWAP)

“El agua es el alma madre de la vida y la matriz, no hay vida sin agua.”

(Albert Szent Gyorgi)

## DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres, Maribel y Paulino, quienes me apoyaron todo el tiempo y durante todos estos años, por su entera confianza, amor y paciencia.

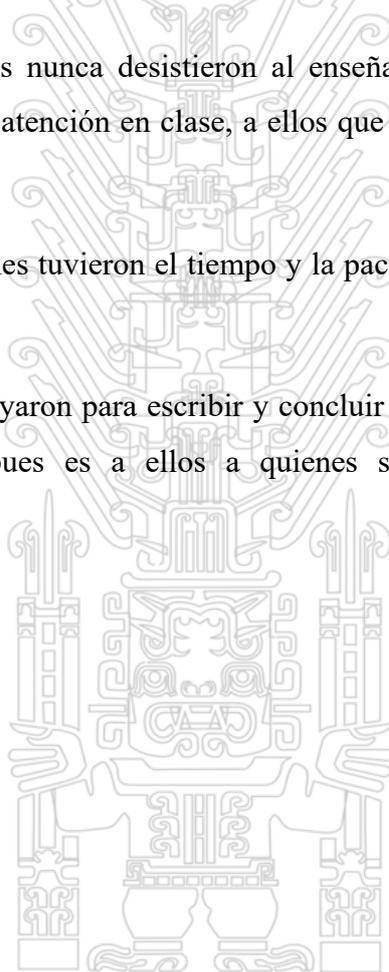
A mi esposa Luz Elvira quien me apoyó y alentó para continuar, cuando parecía que ya no podía mas, por el gran apoyo emocional durante el tiempo en que escribía esta tesis.

A mi hermano Luis Franco por su comprensión y cariño.

A mis maestros quienes nunca desistieron al enseñarme, aun sin importar que muchas veces no ponía atención en clase, a ellos que continuaron depositando su esperanza en mí.

A los informantes quienes tuvieron el tiempo y la paciencia de estudiar mi tesis y aprobarlo.

A todos los que me apoyaron para escribir y concluir esta tesis. Para ellos es esta dedicatoria de tesis, pues es a ellos a quienes se las debo por su apoyo incondicional.

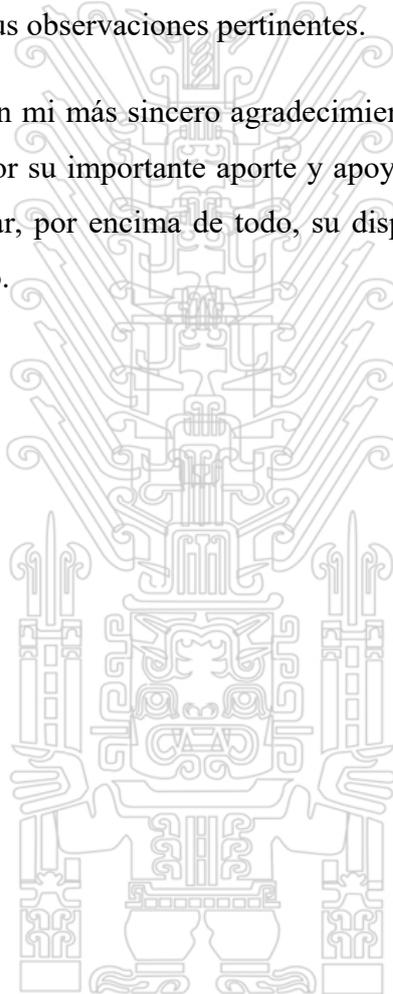


## AGRADECIMIENTOS

Debo agradecer de manera especial y sincera a la empresa JINZHAO MINING PERU S.A. por haberme permitido desarrollar mi inquietud profesional y colaborar en el análisis numérico de impactos físicos al agua subterránea del proyecto minero Pampa del Pongo.

A mi asesor y revisores del presente trabajo, Ingenieros José Tomás Mendoza García y Dante Sánchez Carrera, por sus sugerencias en la elaboración del presente trabajo y por sus observaciones pertinentes.

Quiero expresar también mi más sincero agradecimiento a mi amigo el Ingeniero Arturo García Girón, por su importante aporte y apoyo activo en el desarrollo de esta tesis. Debo destacar, por encima de todo, su disponibilidad y paciencia que hizo posible este trabajo.



## RESUMEN

El análisis numérico del impacto físico en las aguas subterráneas debido al desagüe de mina del Proyecto Minero Pampa del Pongo, considera la recopilación de investigaciones hidrogeológicas, modelos geológicos, correlaciones litológicas de los materiales, inventario de fuentes de agua, propiedades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas de la zona de estudio e investigaciones geofísicas; para modelar la situación actual y futura mediante softwares especializados como el MODFLOW (Modular Finite Difference Groundwater Flow Model).

El análisis numérico comprende un desarrollo progresivo de diferentes etapas que inicia desde la recopilación bibliográfica y revisión cartográfica hasta la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual con el fin de construir un modelo numérico consistente y adecuado para generar distintas simulaciones predictivas y sirvan como una herramienta de gestión para una buena toma de decisiones.

Para ello se realizó la recopilación de investigaciones hidrogeológicas en la zona de estudio para la elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual consistente, elegir el código de modelamiento y la construcción del modelo numérico para luego calibrarlo seguido de su análisis de sensibilidad, luego de determinar si el modelo numérico es adecuado se procedió a realizar las simulaciones predictivas con la finalidad de tener una herramienta de gestión.

De esta manera se pudo concluir que no habrá un impacto significativo en los acuíferos cercanos al proyecto producto del desagüe del Tajo a cielo abierto del Proyecto Minero Pampa del Pongo.

### **Palabras Clave**

Análisis Numérico, Modelo Numérico, MODFLOW, Tajo a Cielo Abierto, Pampa del Pongo, Modelo Hidrogeológico Conceptual.

## ABSTRACT

Numerical analysis of the physical impact on groundwater due to mine dewatering, Mining Project Pampa del Pongo, consider gathering hydrogeological investigations, geological modeling, lithological correlations of materials, inventory of sources of water, hydraulic properties of hydrogeological units of the study area and geophysical investigations; to model the current and future situation by specialized software as MODFLOW (Finite Difference Modular Groundwater Flow Model).

The numerical analysis includes a progressive development of stages that starts from the bibliography and map revision to the development of the conceptual hydrogeological model in order to build a consistent and adequate numerical model to generate different predictive simulations and serve as a management tool for good decision-making.

For this collection hydrogeological investigations conducted in the study area for the development of a consistent conceptual hydrogeologic model, choose the code modeling and construction of numerical model to calibrate then followed by its sensitivity analysis, then determine whether the numerical model is suitable we proceeded to perform predictive simulations in order to have a management tool.

Thus it was concluded that there will not be a significant impact on the nearby aquifers due to mine dewatering of the Mining Project Pampa del Pongo.

### **Keywords:**

Numerical Analysis, Numerical model, MODFLOW, open pit, Pongo Pampa, hydrogeological Conceptual Model.

**TABLA DE CONTENIDOS**

CAPÍTULO I: ASPECTOS METODOLÓGICOS .....	3
1.1 ANTECEDENTES .....	3
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
1.2.1 Descripción del Problema .....	5
1.2.2 Formulación del Problema .....	6
1.3 OBJETIVOS.....	7
1.3.1 Objetivo General.....	7
1.3.2 Objetivos Específicos.....	7
1.4 HIPÓTESIS .....	7
1.5 VARIABLES.....	7
1.6 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	8
1.6.1 Justificación .....	8
1.6.2 Importancia .....	8
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	9
2.1 BASES TEÓRICAS .....	9
2.1.1 Modelización de las Aguas Subterráneas.....	9
2.1.2 Drenaje de Minas .....	20
2.2 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS .....	30
2.3 MARCO LEGAL .....	36
CAPÍTULO III: MATERIALES, EQUIPOS Y MÉTODOS .....	38
3.1 MATERIALES.....	38
3.1.1 Equipos.....	38
3.1.2 Instrumentos.....	38
3.2 MÉTODOS.....	39
3.2.1 Método de la Investigación .....	39
3.2.2 Diseño y Nivel de Investigación .....	39

3.2.3	Muestra.....	39
3.2.4	Procedimiento .....	39
CAPÍTULO IV: DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....		43
4.1	UBICACIÓN Y ACCESOS .....	43
4.2	COMPONENTES FÍSICOS.....	43
4.2.1	Clima y Meteorología .....	43
4.2.2	Geología .....	58
4.2.3	Hidrología .....	70
CAPÍTULO V: RESULTADOS.....		85
5.1	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA .....	85
5.1.1	Conductividad Hidráulica .....	85
5.1.2	Litología de los Piezómetros.....	87
5.1.3	Mediciones de Niveles de Agua Subterránea.....	88
5.1.4	Flujo del Agua Subterránea.....	88
5.1.5	Gradiente Hidráulico.....	89
5.2	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL.....	90
5.2.1	Unidades Hidrogeológicas .....	91
5.2.2	Zonas de Recarga y Descarga.....	92
5.2.3	Tipos de Acuíferos y Características del Flujo de Agua Subterránea	93
5.3	MODELO HIDROGEOLÓGICO NUMÉRICO.....	95
5.3.1	Construcción del Modelo .....	95
5.3.2	Calibración del Modelo en Estado Estacionario .....	100
5.3.3	Análisis de Sensibilidad del Modelo Calibrado en Régimen Estacionario .....	103
5.4	MODELO NUMÉRICO EN RÉGIMEN TRANSITORIO Y ANÁLISIS DE EFECTOS .....	104
5.4.1	Tasa de Desagüe.....	105

5.4.2	Efectos al Nivel de Agua Subterránea .....	106
5.4.3	Desagüe y Recuperación del Agua Subterránea en el Tajo .....	109
CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....		111
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		113
7.1	Conclusiones .....	113
7.2	Recomendaciones .....	113
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		114

## ÍNDICE DE TABLAS

Nº	Descripción	Pag.
1-1.	Variables de la Hipótesis .....	7
2-1.	Características de la Permeabilidad Intrínseca y la Conductividad Hidráulica .....	12
4-1.	Estaciones Meteorológicas Regionales.....	45
4-2.	Estaciones Meteorológicas Locales .....	45
4-3.	Estaciones Meteorológicas utilizadas para el análisis de Temperatura .....	46
4-4.	Temperatura Promedio Mensual.....	46
4-5.	Temperaturas Máximas Promedio Mensuales.....	47
4-6.	Temperaturas Mínimas Promedio Mensuales.....	48
4-7.	Temperaturas Máximas y Mínimas Registradas en las Estaciones Puerto Lomas y Pampa del Pongo.....	49
4-8.	Estaciones Meteorológicas Utilizadas .....	52
4-9.	Precipitación Total Mensual Promedio .....	53
4-10.	Pp Total Mensual (mm) – Estación Pampa del Pongo .....	55
4-11.	Pp Total Mensual (mm) – Estación Puerto lomas .....	56
4-12.	Estaciones Meteorológicas Utilizadas .....	57
4-13.	Evaporación Total Mensual (mm) .....	58
4-14.	Unidades Estratigráficas y Litodémicas .....	60
4-15.	Unidades Geomorfológicas Identificadas.....	66
4-16.	Inventario de Quebradas – Mayo 2012.....	71

4-17. Campañas de Aforos durante Julio 2010 y Agosto 2012.....	72
4-18. Campaña de Aforos AMEC.....	72
4-19. Estaciones Pluviométricas Regionales.....	76
4-20. Estación Hidrométrica Bella Unión.....	76
4-21. Pp Media Mensual (mm) .....	77
4-22. Pp Media a 3500 msnm .....	78
4-23. Caudales Medios Mensuales (m <sup>3</sup> /s) – Estación Bella Unión.....	78
4-24. Pp max. En 24h – Estación San Juan de Marcona.....	80
4-25. Pp max. en 24h – Estación Chaparra .....	80
4-26. Resultados de la Prueba de Bondad de Ajuste – San Juan de Marcona .....	81
4-27. Resultados de la Prueba de Bondad de Ajuste - Chaparra.....	81
4-28. Pp max. Con Periodo de Retorno – Estación San Juan de Marcona .....	82
4-29. Pp max. Con Periodo de Retorno – Estación Chaparra .....	82
4-30. Coordenadas de los Puntos de Drenaje.....	83
4-31. Caudales Máximos.....	83
4-32. Balance Hídrico Climático .....	84
5-1. Formación Geológica Correspondiente al Piezómetro Instalado .....	87
5-2. Rango de Niveles y Elevaciones del Nivel Freático (N.F.).....	89
5-3. Gradientes Hidráulicos de Varias Zonas del Sitio.....	89
5-4 Características Hidráulicas de las Unidades Hidrogeológicas.....	92
5-5. Discretización Vertical .....	97
5-6. Unidades Hidrogeológicas.....	98
5-7. Resumen de Análisis Estadístico de las Conductividades Hidráulicas.....	98
5-8. Objetivos de Calibración .....	101
5-9. Análisis Estadístico de la Calibración del Modelo Numérico en Estado Estacionario.....	102
5-10. Conductividades Hidráulicas Calibradas y Utilizadas en el Modelo.....	103
5-11. Tasa de Desagüe durante los Años de Operación.....	105

## ÍNDICE DE FIGURAS

Nº	Descripción	Pag.
2-1.	Ley de Darcy.....	10
2-2.	Discretización Espacial de un Sistema Acuífero .....	16
2-3.	Sistema de Celda de Bloque Centrado.....	16
2-4.	Flujo Entrando a la Celda i, j, k desde la Celda i, j-1, k .....	18
2-5.	Celda i, j, k e índices utilizados para sus seis celdas vecinas .....	18
2-6.	Construcción de un Modelo Numérico Hidrogeológico.....	19
2-7.	Efectos del Descenso de N.F. debido al Drenaje de Minas .....	29
3-1.	Metodología para Elaborar un Modelo Numérico Hidrogeológico.....	42
4-1.	Variación Mensual de la Temperatura Promedio del Aire .....	47
4-2.	Variación Mensual de la Temperatura Máxima Promedio .....	48
4-3.	Variación Mensual de la Temperatura Mínimas Promedio .....	49
4-4.	Variación Diaria de la T° Promedio (°C) de la Estación Puerto Lomas.....	50
4-5.	Variación Diaria de la T° Prom. (°C) de la Estación Pampa del Pongo.....	51
4-6.	Variación Mensual de la Pp Total de las Estaciones San Juan de Marcona, Huarato y Chaparra .....	54
4-7.	Variación Mensual de la Pp Total de las Estaciones Lomas, Acarí, Copara y Yauca .....	54
4-8.	Variación Mensual de la Pp Total de la Estación Otaca.....	55
4-9.	Variación Mensual de la Pp Total – Estación Pampa del Pongo.....	56
4-10.	Variación Mensual de la Pp Total – Estación Lomas .....	56
4-11.	Variación Mensual de la Evaporación (mm) .....	58
4-12.	Columna Geológica Generalizada .....	61
4-13.	Dominios Geotectónicos del area de Estudio .....	64
4-14.	Sección Geológica Esquemática (Sin Escala) que explica la disposición de las principales estructuras en relación con las unidades geológicas. ....	64
4-15.	Diagrama Hídrico – Subcuenca Jahuay .....	73
4-16.	Diagrama Hídrico – Subcuenca Sacaco.....	73
4-17.	Correlación Precipitación - Altitud.....	77
4-18.	Variación Mensual de los Caudales Medios (m <sup>3</sup> /s) Estación Bella Unión..	79
4-19.	Variación de los Parámetros .....	84
5-1.	Hidrograma del Nivel del Agua.....	88

5-2. Modelo Hidrogeológico Conceptual.....	91
5-3. Discretización Vertical del Modelo Numérico en 11 Capas.....	97
5-4. Correlación de Cargas Observadas vs. Simuladas.....	102
5-5. Análisis de Sensibilidad Conductividad Hidráulica Horizontal .....	104
5-6. Descenso del Nivel Freático en la Zona del Acuífero Jahuay .....	107
5-7. Descenso del Nivel Freático en la Zona Agrícola de Bella Unión .....	108
5-8. Descenso del Nivel Freático en la Zona Costera .....	109
5-9. Desagüe y Recuperación del Agua Subterránea .....	110

### ÍNDICE DE ECUACIONES

Nº	Descripción	Pag.
2-1.	Ecuación diferencial del movimiento del agua subterránea .....	9
2-2.	Ecuación diferencial del regimen transitorio.....	10
2-3.	Ecuación diferencial del regimen estacionario.....	10
2-4.	Ley de Darcy.....	10
2-5.	Ecuación de la Conductividad Hidráulica .....	11
2-6.	Ecuación del Flujo de Darcy.....	12
2-7.	Velocidad del Agua Subterránea .....	13
2-8.	Ecuación Diferencial Parcial .....	15
2-9.	Ecuación de Continuidad en una celda.....	17
2-10.	Ecuación de Entrada en la Celda.....	17
4-1.	Ecuación de Caudal Máximo.....	82

### ÍNDICE DE MAPAS

Nº	Descripción	Pag.
01:	Mapa de Ubicación.	
02:	Mapa de Unidades Geológicas.	
03:	Mapa de Unidades Geomorfológicas.	

04: Mapa de Geodinámica Externa.

- 05: Mapa de Inventario de Fuentes de Agua ALEPH – SNC LAVALIN.
- 06: Mapa de Inventario de Fuentes de Agua AMEC.
- 07: Mapa de Subcuencas Hidrográficas.
- 08: Mapa de Estaciones Meteorológica e Hidrométricas.
- 09: Mapa de Área de Drenaje para Caudales Máximos.
- 10: Mapa de Ubicación de Pozos y Piezómetros.
- 11: Mapa de Isopiezas.
- 12: Mapa de Sección Hidrogeológica A-A’.
- 13: Mapa de Sección Hidrogeológica B-B’.
- 14: Mapa de Sección Hidrogeológica C-C’.
- 15: Mapa del Dominio y Discretización de la Grilla del Modelo Numérico.
- 16: Mapa de Zonas de Conductividad Hidráulica en el Modelo Numérico – Capa 1.
- 17: Mapa de Zonas de Conductividad Hidráulica en el Modelo Numérico – Capa 2.
- 18: Mapa de Zonas de Conductividad Hidráulica en el Modelo Numérico – Capa 3.
- 19: Mapa de Zonas de Conductividad Hidráulica en el Modelo Numérico – Capa 4.
- 20: Mapa de Zonas de Conductividad Hidráulica en el Modelo Numérico – Capa 5.
- 21: Mapa de Zonas de Conductividad Hidráulica en el Modelo Numérico – Capa 6.
- 22: Mapa de Zonas de Conductividad Hidráulica en el Modelo Numérico – Capa 7.
- 23: Mapa de Zonas de Conductividad Hidráulica en el Modelo Numérico – Capa 8.
- 24: Mapa de Zonas de Conductividad Hidráulica en el Modelo Numérico – Capa 9.

- 25: Mapa de Zonas de Conductividad Hidráulica en el Modelo Numérico – Capa 10.
- 26: Mapa de Zonas de Conductividad Hidráulica en el Modelo Numérico – Capa 11.
- 27: Mapa de Zonas de Recarga en el Modelo Numérico – Capa 1.
- 28: Mapa de Zonas de Dren en el Modelo Numérico – Capa 6.
- 29: Mapa de Zonas de Dren en el Modelo Numérico – Capa 7.
- 30: Mapa de Zonas de Dren en el Modelo Numérico – Capa 8.
- 31: Mapa de Zonas de Dren en el Modelo Numérico – Capa 9.
- 32: Mapa de Zonas de Dren en el Modelo Numérico – Capa 10.
- 33: Mapa de Zonas de Dren en el Modelo Numérico – Capa 11.
- 34: Mapa de Zonas de Carga Constante en el Modelo Numérico – Capa 1.
- 35: Mapa de Zonas de Carga Constante en el Modelo Numérico – Capa 2.
- 36: Mapa de Ubicación de Pozos, Piezómetros de Calibración y Contornos de Nivel del Agua Subterránea en Estado Estacionario.
- 37: Mapa de Contornos de Descenso del Agua Subterránea en Régimen Transitorio – Año 4.
- 38: Mapa de Contornos de Descenso del Agua Subterránea en Régimen Transitorio – Año 10.
- 39: Mapa de Contornos de Descenso del Agua Subterránea en Régimen Transitorio – Año 15.
- 40: Mapa de Contornos de Descenso del Agua Subterránea en Régimen Transitorio – Año 20.
- 41: Mapa de Contornos de Descenso del Agua Subterránea en Régimen Transitorio – Año 29.

## INTRODUCCIÓN

Las actividades mineras pueden generar diversos efectos o problemas en las aguas subterráneas de los acuíferos circundantes, tanto a escala local, como también a escala regional, en lo que respecta a la calidad como a la cantidad de este recurso.

Estos problemas pueden ser, por ejemplo, cuando en las inmediaciones del proyecto minero exista un nivel de agua subterránea que dificulte con la profundización del tajo, y se necesita reducirlo, para hacer posible la extracción del mineral o como medida de seguridad para que no afecte la estabilidad en sus taludes.

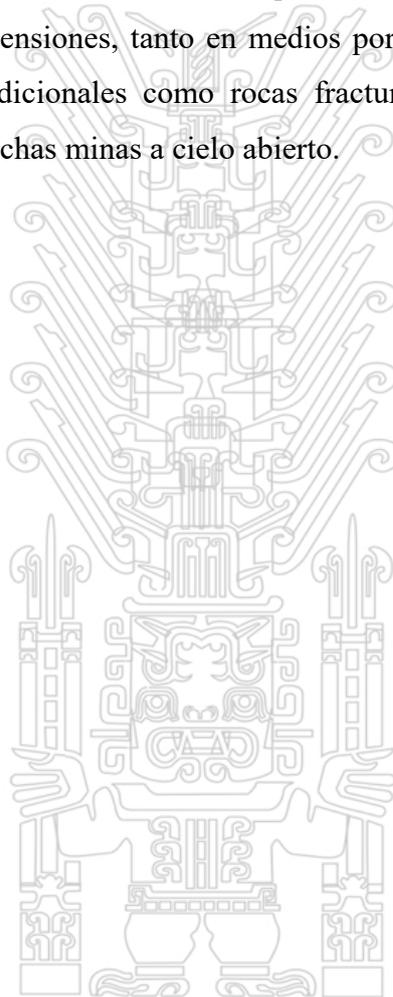
Otro problema a considerar es que el desagüe artificial de minas puede provocar un descenso considerable o abatimiento del nivel freático, lo cual, además de otros efectos, puede degradar seriamente o eliminar ecosistemas circundantes tales como bofedales, vegetación endémica, manantiales, quebradas, ríos, etc; también se pueden encontrar impactos que se producen al drenar el agua de la zona de la mina los cuales podrían descender los niveles en pozos cercanos de comunidades o poblaciones circundantes, los que pueden ser utilizados para diversos fines como consumo humano o agrícola.

Sin embargo mediante un manejo técnico del agua subterránea a través de estudios especializados es posible analizar todos los aspectos relevantes a la extracción, tratamiento, uso y preservación de este medio, para que de esta manera se pueda identificar los riesgos actuales y los potenciales daños a los flujos naturales propuestos por las actividades mineras, y sirva de esta forma como un plan estratégico a lo largo de las diferentes etapas del ciclo de vida de la mina identificando riesgos y estrategias de mitigación.

El presente trabajo se encuentra ubicado en la Pampa del Pongo (costa sur del Perú), entre los distritos de Bella Unión y Lomas en el departamento de Caravelí, región Arequipa; el cual es un proyecto minero de extracción de mineral de hierro de propiedad de Jinzhao Mining Perú S.A. que tendrá una vida útil de 33 años, 4 años en la etapa de construcción y 29 años en la etapa de operación.

Una de las principales motivaciones de esta tesis, es evaluar el impacto físico causado en las aguas subterráneas, cercanas al tajo minero, por el drenaje del mismo en la etapa de operación, para lo cual se utilizan softwares comerciales (MODFLOW) y una adecuada representación del tajo y de los efectos que éste provoca en los niveles de agua del acuífero.

En esta tesis se utilizarán herramientas computacionales de uso común en hidrología Subterránea como el MODFLOW, softwares comerciales basados en diferencias finitas, mundialmente utilizados para la simulación del flujo de agua subterránea en tres dimensiones, tanto en medios porosos tradicionales como en medios porosos no tradicionales como rocas fracturadas. Esto último es muy común en el caso de muchas minas a cielo abierto.



## CAPÍTULO I: ASPECTOS METODOLÓGICOS

### 1.1 ANTECEDENTES

La revisión de información se llevó a cabo mediante la compilación de información existente relacionada a la cantidad de agua superficial y subterránea, geología, geofísica, para la construcción del modelo en 3D e información hidrogeológica para determinar los parámetros hidráulicos del acuífero, tanto en la misma zona de estudio así como de lugares cercanos o que compartan ciertas características ambientales. Esta información se utilizó en la calibración del modelo.

La siguiente información fue compilada:

- ✓ INRENA (2004). “Realizó el **Estudio de Balance Hídrico Superficial de la Cuenca del Río Acari**”, cuyo objetivo fue la de realizar el Estudio Hidrológico Superficial de la Cuenca del Río Acari, determinando la disponibilidad hídrica de la cuenca y de las subcuencas o tributarios importantes; así como determinar la demanda hídrica de las diferentes comisiones de regantes que se encontraban en dicha cuenca, además realizó el balance hídrico para cada sector de riego dentro de la cuenca de estudio y la determinación de la capacidad de almacenamiento de la cuenca colectora.
- ✓ INRENA (2007). “Elaboró el **Estudio Hidrogeológico del Valle de Nazca**”, la finalidad de dicho estudio fue evaluar el estado actual de los recursos hídricos almacenados en el acuífero del Valle de Nazca, con el propósito de que su uso sea una de las alternativas atenuantes al déficit del recurso de agua existente.
- ✓ MINEM (2010). “Aprobación del **Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto de Explotación Mina Justa**”, proyecto de explotación de cobre perteneciente a la empresa Marcobre S.A.C. ubicado en el distrito de San Juan de Marcona, provincia de Nazca, departamento de Ica. La finalidad de dicho estudio fue evaluar y describir las características actuales del área de estudio y la evaluación de los impactos productos de los nuevos componentes mineros establecidos en el estudio a nivel ambiental y social.

- ✓ SNC LAVALIN (2011). “Realizó el **Informe de Línea Base Física, informe Hidrogeológico Pampa del Pongo**”, cuyo objetivo fue determinar las características físicas del área del proyecto así como identificar las fuentes de agua subterráneas aledañas al proyecto, determinando la geometría del reservorio acuífero, tanto lateral como vertical, además de determinar la calidad del recurso hídrico subterráneo y superficial.
- ✓ BISA (2012). “Elaboró el Modelamiento Geológico, Geotécnico y Cálculo de Recursos de Hierro de Pampa del Pongo; además del Informe Geológico de la campaña de perforación 2012”, en el mencionado estudio se definió la estratigrafía y secuencia estratigráfica del área de estudio, así como se definió los tipos de rocas ígneas volcánicas, subvolcánicas y plutónicas, definiendo la secuencia de intrusiones y su asociación con la ocurrencia de magnetita, complementando el modelo de evolución geológica y tectónica para el yacimiento Pampa del Pongo.
- ✓ ALEPH ASOCIADOS (2012). “Realizó el **Estudio Hidrogeológico del Proyecto Minero Pampa del Pongo**”, en esta ocasión la empresa realizó la evaluación de los recursos hídricos de la zona de estudio, caracterizó localmente la configuración litológica y estructural del lugar, determinó los parámetros de recarga del acuífero, sus direcciones de flujo; así como la elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual para poder simular el flujo de agua subterránea en el entorno de trabajo y los posibles impactos generados.
- ✓ BRADLEY Y MDH (2014). “Elaboró el **Análisis de Estabilidad Física Proyecto Pampa del Pongo**”, cuyo objetivo se orienta a la estabilidad contra deslizamientos, corrimientos o problemas de derrumbes ya sea superficial o profundos dentro del área de estudio basándose en criterios utilizados en el diseño mediante la aplicación de metodologías de análisis y diseño para obras de ingeniería geotécnica.
- ✓ AMEC PERÚ S.A. (2014). “Elaboró el **Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Minero Pampa del Pongo**”, su contenido presenta un resumen del marco legal aplicable, la descripción del Proyecto, la definición de las áreas de estudio y las áreas de influencia, los resultados de los estudios de línea base y la evaluación de los posibles impactos

ambientales y sociales, las medidas de control y mitigación propuestas en el plan de manejo ambiental y social, y el plan de cierre conceptual y valorización económica, según el marco del Artículo 16 del R.M. 304-2008-EM-DM y los Términos de Referencia Comunes para los EIA detallados de proyectos mineros a nivel de factibilidad del Anexo 1 de la R.M. N° 092-2014-MEM-DM.

## **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.2.1 Descripción del Problema**

En la actualidad se observa que las actividades mineras a cielo abierto pueden generar diversos problemas o efectos en las aguas subterráneas de los acuíferos que la rodean, tanto a escala local, como también a escala regional, en lo que respecta a la calidad como a la cantidad de esta agua. Estos problemas van conllevados cuando en las inmediaciones del proyecto minero exista un nivel de agua subterránea que interfiera con la profundización del tajo abierto y se necesite reducirlo para hacer posible la extracción del mineral o como medida de seguridad para que no afecte la estabilidad en sus taludes.

El proyecto minero Pampa del Pongo es un proyecto de extracción de mineral de hierro de propiedad de Jinzhao Mining Perú S.A. que tendrá una vida útil de 33 años, 4 años en la etapa de construcción y 29 años en la etapa de operación; además de 2 años de cierre y post cierre, dentro del cual se proyecta la construcción de un tajo a cielo abierto, el cual tendrá una profundidad media de 840 m. y un diámetro mayor de 2.6 Km.

El problema radica en que el tajo a cielo abierto generará un impacto en forma de descenso o abatimiento del nivel freático producto del desagüe artificial de este componente, además de drenar los niveles de agua subterránea en pozos cercanos, presentes en el acuífero Jahuay ubicado aproximadamente a 6 km al noroeste del tajo, el cual es utilizado para proporcionar agua para la mina de Shougan; pozos del acuífero aluvial en la zona de Bella Unión, ubicada aproximadamente a 20 km al sur del tajo, utilizado para proporcionar agua para riego de terrenos agrícolas; y pozos en el acuífero de la zona costera, cerca al océano pacífico aproximadamente

Sin embargo mediante un manejo técnico del agua subterránea a través de un análisis numérico es posible analizar y modelar todos los aspectos relevantes a la extracción, tratamiento, uso y preservación de este medio antes de que ocurra, para que de esta manera se pueda identificar los riesgos actuales y los potenciales daños a los flujos naturales propuestos por el proyecto, y sirva de esta forma como un plan estratégico a lo largo de las diferentes etapas del ciclo de vida de la mina identificando riesgos y estrategias de mitigación.

En esta tesis se utilizaron herramientas computacionales de uso en hidrología subterránea como el MODFLOW SURFACT y MODFLOW USG, *softwares* comerciales basados en diferencias finitas, mundialmente utilizados para la simulación del flujo de agua subterránea en tres dimensiones, tanto en medios porosos tradicionales como en medios porosos no tradicionales como rocas fracturadas. Esto último es muy común en el caso de muchas minas a cielo abierto.

## **1.2.2 Formulación del Problema**

### **1.2.2.1 Problema Principal**

¿Cómo afectará el área de influencia del cono de depresión, producto del abatimiento causado por el desagüe del tajo a cielo abierto proyectado durante la fase de operación y cierre del proyecto minero Pampa del Pongo, a los acuíferos Jahuay, Bella Unión y Zona costera?

### **1.2.2.2 Problema Secundario**

¿Cuánto será la tasa de desagüe durante la fase de operación del tajo?

¿Cuánto será el descenso total del nivel freático ocasionado por el desagüe de mina?

¿Cuál es el área de influencia del cono de depresión causado por el desagüe del tajo a cielo abierto durante la etapa de operación?

¿En que año el llenado del tajo a cielo abierto alcanzará su cota de equilibrio?

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo General

Evaluar la influencia del cono de depresión producto del abatimiento causado por el desagüe del tajo a cielo abierto proyectado durante la fase de operación y cierre del proyecto minero Pampa del Pongo y su impacto a los acuíferos Jahuay, Bella Unión y Zona costera.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- ✓ Determinar la tasa de desagüe durante la fase de operación del tajo a cielo abierto.
- ✓ Determinar el descenso total del nivel freático ocasionado por el desagüe del tajo a cielo abierto.
- ✓ Determinar el área de influencia del cono de depresión causado por el desagüe del tajo durante la etapa de operación.
- ✓ Determinar en qué año el llenado del tajo a cielo abierto alcanzará su cota de equilibrio.

## 1.4 HIPÓTESIS

La influencia del cono de depresión producto del abatimiento causado por el desagüe del tajo a cielo abierto proyectado del proyecto minero Pampa del Pongo durante la fase de operación y cierre afectará a los acuíferos Jahuay, Bella Unión y Zona costera.

## 1.5 VARIABLES

En la Tabla N°1-1, en el enunciado de la hipótesis se identifican:

Tabla N° 1-1. Variables de la Hipótesis

Hipótesis	Variables		Indicadores
	Dependientes	Independientes	
La influencia del cono de depresión producto del abatimiento causado por el desagüe del tajo a cielo abierto proyectado del	Acuíferos Jahuay, Bella Unión y Zona costera.	Influencia del cono de depresión producto del abatimiento causado por el	Conductividad hidráulica Niveles piezométricos

<p>proyecto minero Pampa del Pongo durante la fase de operación y cierre afectará los acuíferos Jahuay, Bella Unión y Zona costera.</p>		<p>desagüe del tajo a cielo abierto proyectado durante la fase de operación y cierre del proyecto minero Pampa del Pongo</p>	<p>Litología</p> <p>Unidades hidrogeológicas</p> <p>Unidades climáticas y meteorológicas</p> <p>Modelo numérico en diferencias finitas</p> <p>Modelo numérico en régimen estacionario y transitorio</p>
---	--	--	---

*Fuente:Elaboración Propia*

## **1.6 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

### **1.6.1 Justificación**

El presente estudio se justifica como una alternativa de uso para evaluar los impactos generados por tajos a cielo abierto en escenarios futuros a su realización, en el cual se podrán modelar diferentes escenarios y de esta manera poder evaluar los riesgos y proponer medidas óptimas de mitigación ante posibles eventualidades. Su uso significaría una herramienta poderosa en la toma de decisiones y formaría parte del plan estratégico de la empresa.

### **1.6.2 Importancia**

El presente documento se podrá usar como guía o de consulta, en el cual se encuentre recopilada la información necesaria para evaluar el impacto físico en las aguas subterráneas causado por el tajo a cielo abierto, basado en investigaciones serias que puedan ser fundamentadas con documentos e información especializada del lugar en el tema de drenaje de minas en la etapa de operación y cierre.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1 BASES TEÓRICAS

#### 2.1.1 Modelización de las Aguas Subterráneas

El movimiento del agua subterránea en 3 dimensiones, a través de un medio poroso se representa por la ecuación diferencial siguiente:

**Ecuación N° 2-1. Ecuación diferencial del movimiento del agua subterránea**

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + Q = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

$$\sum FLUJOS_{ENTRANTES} - \sum FLUJOS_{SALIENTES} = \Delta ALMACENAMIENTO$$

Donde:

$K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$ : Valores de la conductividad hidráulica a lo largo de los 3 ejes ortogonales del espacio, X, Y y Z. ( $L T^{-1}$ ).

$h$ : Carga potenciométrica (L).

$Q$ : Flujo por unidad de volumen, representa las fuentes y/o sumideros ( $T^{-1}$ ).

$S_s$ : Almacenamiento específico del medio poroso ( $L^{-1}$ ).

$t$ : Tiempo (T).

Por consiguiente, la ecuación fundamental representa matemáticamente una conclusión lógica:

- ✓ La diferencia entre la cantidad de agua que entra y sale por las caras de un cubo poroso ideal (por razones de las diferencias de nivel piezométrico entre este cubo y las zonas del acuífero inmediatas), más las entradas de agua exteriores al sistema, tiene que ser igual a la variación del almacenamiento, es decir, a lo que se llena o vacía dicho cubo.

Es evidente que se expresa de una manera muy simple, pero puede ser útil para

La ecuación puede resultar de difícil o imposible solución, según sean las condiciones de contorno, y es aplicable a los problemas generales de movimiento del agua en los acuíferos. Se definen dos tipos de régimen, en función de que exista o no variación en el almacenamiento del medio poroso.

Régimen Transitorio: en el que tenemos variación con el tiempo.

### Ecuación N° 2-2. Ecuación diferencial del regimen transitorio

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + Q = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Régimen Permanente: en el que no existe variación con el tiempo, por lo que el segundo término de la ecuación fundamental es cero.

### Ecuación N° 2-3. Ecuación diferencial del regimen estacionario

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0$$

#### 2.1.1.1 Ley de Darcy

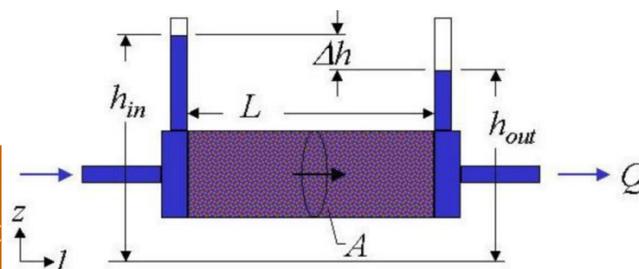
El ingeniero francés Henry Darcy, observó que el flujo laminar de un fluido (para densidad y temperatura constante) entre dos puntos de un medio poroso era proporcional al gradiente hidráulico ( $dh/dl$ ).

La ecuación que representa el Flujo a través de un medio poroso, es conocida como Ley de Darcy (1856) y se expresa:

### Ecuación N° 2-4. Ley de Darcy

$$Q = -K.A. \frac{\partial h}{\partial l}$$

Figura N° 2-1. Ley de Darcy



Donde:

Q: Caudal ( $L^3T^{-1}$ ).

K: Conductividad Hidráulica ( $LT^{-1}$ ).

A: Área transversal al flujo ( $L^2$ ).

h: Carga Hidráulica (L).

l: Distancia entre dos puntos (L).

el signo negativo (-) es un convencionalismo, para indicar que el flujo es hacia fuera.

La conductividad para un medio, es función de las características del medio y del fluido.

#### **Ecuación N° 2-5. Ecuación de la Conductividad Hidráulica**

$$K = \frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu}$$

Donde:

K: Permeabilidad intrínseca del medio poroso ( $L^2$ ).

$\rho$ : Densidad del fluido ( $ML^{-3}$ ).

$\mu$ : Viscosidad dinámica del fluido ( $ML^{-1}T^{-1}$ ).

g: Aceleración de la gravedad ( $LT^{-2}$ ).

La permeabilidad intrínseca de un medio poroso depende de la forma y diámetro de los poros del suelo.

Existen numerosas expresiones analíticas para establecer la permeabilidad intrínseca a partir del empaquetado de los granos, de la forma y del tamaño (Fair y Hatch, 1933).

Krumbein (1943) usó el cuadrado del diámetro medio de los granos de un suelo para establecer k.

En la tabla N° 2-1 se muestran valores característicos para la permeabilidad intrínseca (k) y para la conductividad hidráulica (K).

**Tabla N° 2-1. Características de la Permeabilidad Intrínseca y la Conductividad Hidráulica**

<b>Material</b>	<b>Permeabilidad Intrínseca K (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Conductividad Hidráulica K (cm/s)</b>
Arcilla	$10^{-6} - 10^{-3}$	$10^{-9} - 10^{-6}$
Limos Limos arenosos	$10^{-3} - 10^{-1}$	$10^{-6} - 10^{-4}$
Arenas Limosas Arenas Finas	$10^{-2} - 1$	$10^{-5} - 10^{-3}$
Arenas Graduadas	$1 - 10^2$	$10^{-3} - 10^{-1}$
Gravas Graduadas	$10 - 10^3$	$10^{-2} - 1$

Para conocer la velocidad, debe dividirse el flujo por el área de paso del mismo:

**Ecuación N° 2-6. Ecuación del Flujo de Darcy**

$$v = \frac{Q}{A} = -K \frac{\partial h}{\partial l}$$

Ésta velocidad es conocida como descarga específica o flujo de Darcy. La descarga específica es una velocidad aparente que representa la velocidad del agua en movimiento a través de un acuífero por un conducto completamente abierto. La sección transversal A, no está completamente abierta, ya que está ocupada por los granos del suelo.

La velocidad del agua subterránea se obtiene dividiendo la descarga efectiva por la porosidad efectiva del medio poroso:

**Ecuación N° 2-7. Velocidad del Agua Subterránea**

$$v = \frac{Q}{n_e A} = -\frac{K \partial h}{n_e \partial l}$$

Donde:

$n_e$ : Porosidad Efectiva del medio poroso.

**2.1.1.2 Modelo Numérico Utilizado para la Simulación de Drenaje de Minas**

La simulación del agua subterránea que fluye a través de los acuíferos y unidades geológicas es una herramienta clave para la predicción, manejo y control de los recursos hídricos. En la actualidad, existen diversos programas comerciales que permiten realizar la modelación de los flujos subterráneos. El objetivo fundamental de la modelación numérica del drenaje de un tajo minero es evaluar el impacto físico causado en las aguas subterráneas cercanas debido al drenaje del tajo, para lo cual se utilizan softwares comerciales y una adecuada representación del tajo y de los efectos que éste provoca en los niveles de agua del acuífero. Para lograr los objetivos anteriormente mencionados se utilizan herramientas computacionales de uso común en hidrogeología como el MODFLOW, softwares comerciales basados en diferencias finitas, mundialmente utilizados para la simulación del flujo de agua subterránea en tres dimensiones tanto en medios porosos tradicionales como en medios porosos no tradicionales como rocas fracturadas. Esto último es muy común en el caso de muchas minas a cielo abierto. Estas herramientas computacionales están diseñadas para el uso de hidrogeólogos experimentados y requieren de información que debe provenir de estudios hidrogeológicos tradicionales.

**MODFLOW (Modular Finite Difference Groundwater Flow Model)**

**Descripción del MODFLOW**

El modelo MODFLOW simula en tres dimensiones el flujo subterráneo en medios porosos y utiliza una estructura modular que permite entender mejor el modelo y

modificarlo si es necesario. Fue desarrollado por el Servicio Geológico de los EE.UU. a mediados de la década del 70 y está escrito en FORTRAN. Utiliza el método de diferencias finitas para resolver un sistema de ecuaciones basadas en la fórmula de Darcy, que explica el movimiento de un fluido en un medio poroso saturado (McDonald M. y Harbaugh W., 1988). Simula también las condiciones estacionarias. Los ejes principales de conductividad hidráulica se alinean con las coordenadas direccionales asumiendo que el agua tiene densidad constante. Se evalúa la derivada temporal utilizando la aproximación diferencial. Los pozos, los ríos, los drenes, la evapotranspiración y la recarga son simulados como condiciones de borde y son representados como elementos donde se conoce el nivel de energía o nivel de agua. Los acuíferos se representan por aproximación tridimensional. Los nodos de esta aproximación pueden cambiar de confinados a no confinados y recíprocamente, en el desarrollo del proceso informático.

La estructura modular consiste en un programa principal y una serie de subrutinas independientes llamadas módulos. Los módulos están agrupados en paquetes. Cada paquete se encarga de una característica específica del sistema hidrológico que será simulado, como flujos de ríos o flujos hacia drenajes, o de un método específico de resolución de la ecuación lineal que describe el flujo del sistema. La división del programa en módulos permite al usuario examinar características específicas del modelo independientemente. También se facilita el desarrollo de nuevas capacidades, ya que los nuevos paquetes pueden ser añadidos al programa sin modificar los paquetes existentes.

### **Entradas y Salidas del MODFLOW**

Los datos de entradas del programa son los parámetros hidrogeológicos del acuífero, las condiciones de borde y las condiciones iniciales. El ingreso es realizado desde archivos de texto con los datos en un orden predefinido. La entrada de datos corresponde con la estructura de la malla. Muchos usuarios utilizan programas separados para discretizar los datos en la forma requerida. Sin embargo, estos programas no se incluyen como parte del MODFLOW.

La salida primaria del modelo es el nivel de agua en cada nodo. En adición, se calcula un balance hídrico y el flujo en cada celda del modelo se almacena en un

archivo. Los programas soporte que se utilizan para analizar y presentar la salida no están incluidos en el MODFLOW.

### **Modelo Matemático del MODFLOW**

El movimiento tridimensional del agua subterránea de densidad constante a través de un material de medio poroso puede describirse por la ecuación diferencial parcial.

#### **Ecuación N° 2-8. Ecuación Diferencial Parcial**

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + Q = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Donde:

$K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$ : Valores de la conductividad hidráulica a lo largo de los 3 ejes ortogonales del espacio, X, Y y Z. ( $LT^{-1}$ ).

$h$ : Carga potenciométrica (L).

$Q$ : Flujo por unidad de volumen, representa las fuentes y/o sumideros ( $T^{-1}$ ).

$S_s$ : Almacenamiento específico del medio poroso ( $L^{-1}$ ).

$t$ : Tiempo (T).

En general  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$  pueden ser funciones del espacio y  $W$  puede ser función del tiempo y del espacio. La ecuación describe el flujo de agua subterránea en condiciones de no-equilibrio, en un medio heterogéneo y anisotrópico, siempre que los ejes de coordenadas estén alineados con los ejes principales de la conductividad hidráulica.

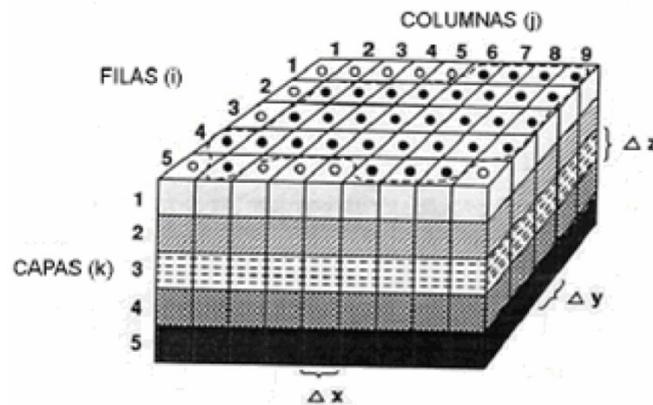
La Ecuación 2-8 junto con las condiciones de borde de flujo y/o niveles de agua y las condiciones iniciales de borde, constituyen la representación matemática del sistema de flujo de aguas subterráneas. Para resolver esta ecuación, el MODFLOW utiliza el método de diferencias finitas, donde el sistema continuo descrito por la ecuación es reemplazado por un set finito de puntos discretos en el

calculados de la diferencia en valores de carga hidráulica en esos puntos. El proceso lleva a sistemas simultáneos de ecuaciones de diferencias algebraicas lineales; su solución entrega valores de carga en puntos y tiempos específicos. Estos valores constituyen una aproximación a la distribución continua de cargas hidráulicas variando en el tiempo que entregaría una solución analítica de la ecuación diferencial parcial de flujo.

### Discretización Temporal

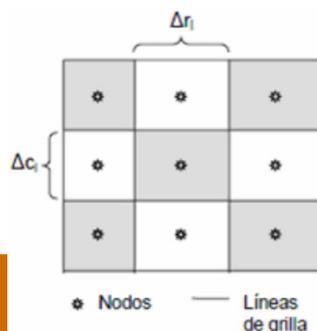
Un sistema acuífero real es representado por medio de un arreglo de bloques llamados celdas, cuyas ubicaciones se describen en términos de filas, columnas y capas como se puede observar en la figura N° 2-2.

**Figura N° 2-2. Discretización Espacial de un Sistema Acuífero**



Dentro de cada celda hay un punto llamado nodo, en el cual se calcula la carga (h). El MODFLOW define la configuración de celdas respecto a la ubicación de los nodos (bloque centrado).

**Figura N° 2-3. Sistema de Celda de Bloque Centrado**



El tiempo es discretizado en períodos de tiempos definidos por el usuario, los que a la vez se subdividen en pasos de tiempo de longitud creciente, definidos según una progresión geométrica en la que el usuario también define el factor multiplicador.

### **Ecuaciones de Diferencias Finitas**

La ecuación de flujo del agua subterránea en la forma de diferencias finitas se obtiene al aplicar la ecuación de continuidad en una celda. Considerando que la densidad del agua se mantiene constante se obtiene la Ecuación N° 2-9, la cual es análoga a la Ecuación N° 2-8:

#### **Ecuación N° 2-9. Ecuación de Continuidad en una celda**

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta h_t}{\Delta t} \Delta V_c$$

Donde:

$Q_i$ : tasas de flujo entrando y/o saliendo de la celda [ $L^3T^{-1}$ ]

$S_s$  : almacenamiento específico en la formulación de diferencias finitas [ $L^{-1}$ ]

$\Delta V_c$  : volumen de la celda [ $L^3$ ]

$\Delta h_t$  : variación de la carga en un intervalo de tiempo  $\Delta t$  [ $L$ ]

En el caso del flujo entrando en la celda  $i, j, k$  en la dirección de la fila, desde la celda  $i, j-1, k$  (Figura N° 2-4), éste se expresa según se muestra en las siguientes ecuaciones.

#### **Ecuación N° 2-10. Ecuación de Entrada en la Celda**

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \Delta C_i \Delta v_k \frac{h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}}{\Delta r_{j-1/2}}$$

$$q_{i,j-1/2,k} = CR_{i,j-1/2,k} (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})$$

$$CR_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \frac{\Delta C_i \Delta v_k}{\Delta r_{j-1/2}}$$

Donde:

$h_{i,j,k}$  : carga hidráulica o nivel de agua en el nodo  $i, j, k$  [L]

$q_{i,j-1/2,k}$  : descarga volumétrica entre las caras  $i, j, k$  e  $i, j-1, k$  [ $L^3T^{-1}$ ]

$KR_{i,j-1/2,k}$  : permeabilidad en la dirección de la fila entre los nodos  $i, j, k$  e  $i, j-1, k$  [ $LT^{-1}$ ]

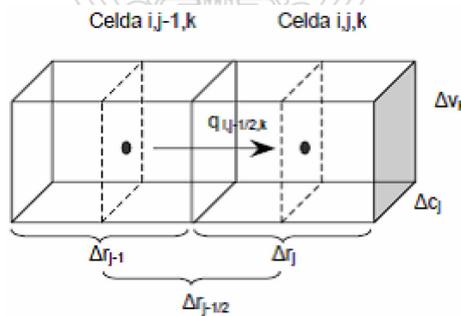
$\Delta c_i \Delta v_k$  : área de la cara de la celda normal a la dirección de flujo [ $L^2$ ]

$\Delta r_{j-1/2}$  : distancia entre los nodos  $i, j, k$  e  $i, j-1, k$  [L]

$CR_{i,j-1/2,k}$  : conductancia en la fila  $i$  y estrato  $k$  entre los nodos  $i, j-1, k$  e  $i, j, k$  [L]

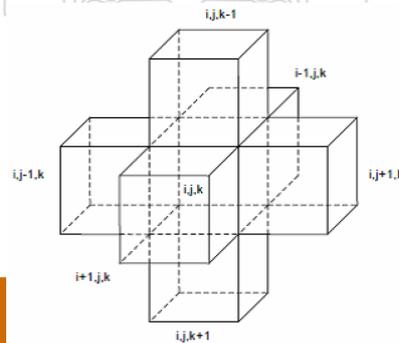
En la Figura N° 2-5 se muestra un esquema de una celda de diferencias finitas y los índices utilizados para identificar a sus seis celdas vecinas.

**Figura N° 2-4. Flujo Entrando a la Celda  $i, j, k$  desde la Celda  $i, j-1, k$**



Fuente: USGS

**Figura N° 2-5. Celda  $i, j, k$  e índices utilizados para sus seis celdas vecinas**

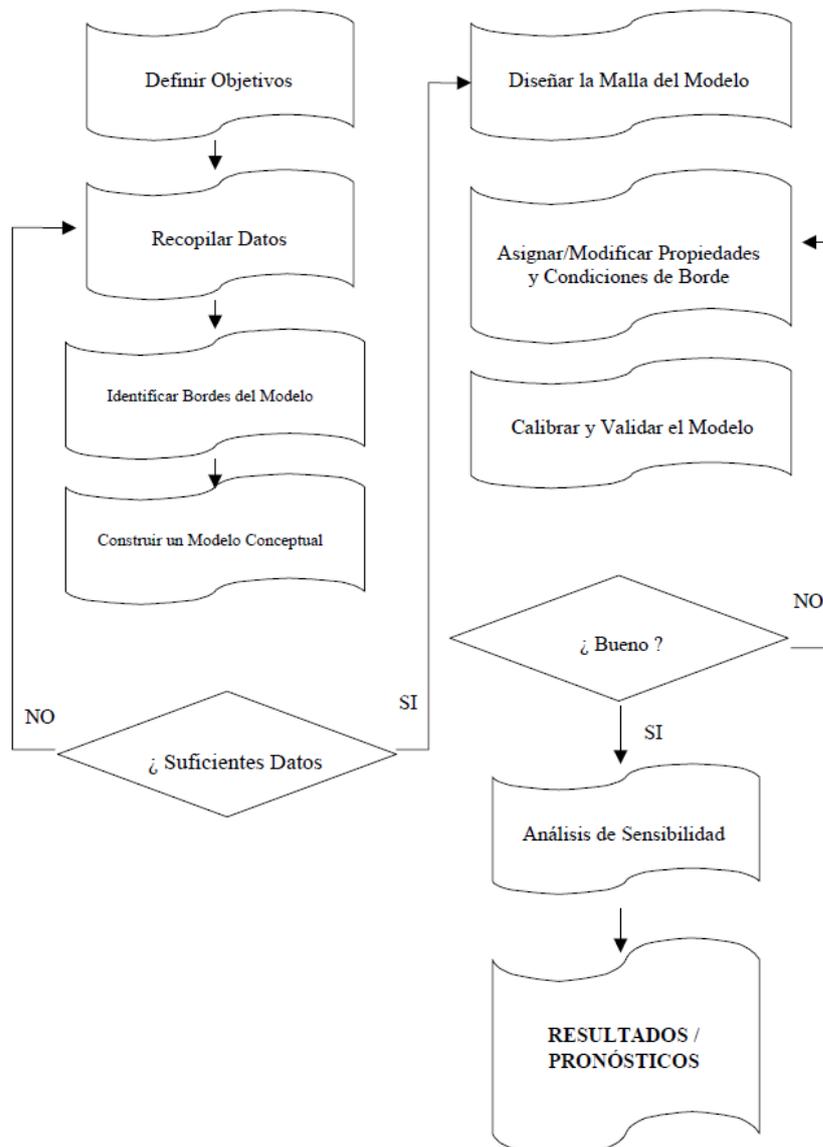


### 2.1.1.3 Construcción del Modelo Numérico

La modelización numérica es una representación matemática aproximada de la hidrogeología de un determinado lugar. Para ello se utilizan programas informáticos más o menos complejos que resuelven la ecuación fundamental del flujo de las aguas subterráneas en medios porosos y en 3 dimensiones, en base a observaciones reales del emplazamiento a modelizar.

La construcción de un modelo matemático para definir la hidrogeología de un acuífero debe seguir los siguientes pasos fundamentales que aparecen en la Figura N° 2-6.:

**Figura N° 2-6. Construcción de un Modelo Numérico Hidrogeológico**



## **2.1.2 Drenaje de Minas**

La extracción y el procesamiento de los minerales es un requisito indispensable para el estilo de vida de todas las sociedades avanzadas, al grado que mantener una oposición total a la minería resulta difícil, inclusive para los grupos antimineros más radicales. La dominante influencia de la minería en la vida urbana se puede apreciar claramente al observar los materiales que nos rodean y al cuestionarse el origen de éstos.

A grandes rasgos la minería se clasifica como subterránea y superficial, esto depende de la forma y ubicación del cuerpo mineralizado. A continuación se realiza una descripción de las minas subterráneas y a cielo abierto.

La definición de minas subterráneas, se refiere a cualquier mina, en la cual los mineros y/o la maquinaria tengan que trabajar bajo una cubierta de suelo o roca. De las diversas actividades involucradas en la minería subterránea, dos de ellas tienen una notoria influencia en el movimiento del agua de mina durante y después de la actividad minera:

- ✓ El desarrollo y el mantenimiento de los accesos subterráneos (para humanos, maquinaria, servicios secundarios y ventilación).
- ✓ La extracción del mineral, asociada al manejo subterráneo de desechos de rocas (escombros).

La forma en que estas dos actividades son desarrolladas causa consecuencias, a corto y largo plazo, en el comportamiento de los sistemas hidrológicos e hidrogeológicos cercanos a la zona de la actividad minera.

Los accesos a las minas subterráneas se realizan a través de túneles, los cuales varían en su inclinación desde horizontales hasta verticales. Los accesos más comunes son los socavones o galerías, túneles verticales, semi-verticales e inclinados.

En cuanto a las técnicas de extracción del mineral en minas subterráneas, existen dos principales métodos de extracción: cuando la zona productiva es esencialmente estratiforme y existe poca inclinación, se utilizan métodos de extracción horizontal y si la zona productiva se encuentra en un sector

considerablemente inclinado (como en venas hidrotermales o depósitos de lodo) o el yacimiento tiene una forma irregular con una extensión vertical considerable, entonces se utilizan métodos de extracción “stopping” (cámaras subterráneas).

La definición de minas superficiales, se refiere a cualquier mina cuyo proceso extractivo se realiza en la superficie de la tierra. A partir de los años 1940, la fabricación de maquinaria adecuada para la excavación de minas a cielo abierto, como las palas dragalinas y las volquetas, las convirtió en una alternativa de explotación minera bastante más factible. De acuerdo al SIGMEM 2008, 245 unidades mineras utilizaban el método de explotación a través de minería superficial y 130 unidades mineras mediante minería subterránea.

En todas las minas superficiales existen tres actividades fundamentales:

- La extracción de la sobrecarga (excavación de los depósitos no económicos que recubren el mineral).
- Extracción del mineral.
- Restauración y/o abandono de la mina superficial.

Las minas superficiales son clasificadas de acuerdo a la realización de estas actividades. La siguiente clasificación de minas superficiales fue dada por Hartman (1987).

Las minas a cielo abierto, o también conocidas como minas tajo abierto, son minas superficiales, en las cuales la sobrecarga es removida de la zona de explotación y colocada en botaderos. El mineral es extraído a través de bancos horizontales escalonados. Generalmente la explotación de minas a cielo abierto se realiza, cuando la sobrecarga sobre el yacimiento es pequeña.

Debido a la escasez de sobrecarga para rellenar las minas a cielo abierto, muchas de estas minas en la etapa de abandono forman “pit lakes”, exceptuando aquellas que se encuentran en zonas áridas. Los “pit lakes” difieren radicalmente de los lagos naturales, puesto que los primeros se caracterizan por tener diámetros pequeños en relación a su profundidad (Miller et al., 1996), en cuanto los lagos

limnológicas importantes, particularmente en relación a la estratificación estacional (en términos de temperatura, densidad y salinidad), que a su vez afecta la dinámica de la calidad del agua.

Las explotaciones al descubierto, se emplean con frecuencia para extraer carbón y lignito. La principal diferencia entre estas minas y las minas a cielo abierto, es que el material de desecho extraído para descubrir el yacimiento, en lugar de transportarse a botaderos, se vuelve a dejar en la cavidad creada por la explotación reciente. Por lo tanto, las minas van avanzando poco a poco, rellenoando el terreno y devolviendo a la superficie en la medida de lo posible el aspecto que tenía antes de comenzar la extracción. Al contrario de una mina a cielo abierto, que suele hacerse cada vez más grande, una explotación al descubierto alcanza su tamaño máximo en muy poco tiempo.

Cuando se completa la explotación, la cavidad que queda se puede convertir en un lago o rellenarse con el material procedente de la excavación.

La minería hidráulica, es una técnica de minería que emplea la presión del agua para desincrustar el material rocoso, o mover sedimentos. Esta técnica fue bastante utilizada en los Estados Unidos, para la explotación de minerales durante la fiebre del oro en California en la segunda mitad del siglo XIX. La minería hidráulica había sido previamente desarrollada por los romanos.

Se estima que más del 70% de todo el material excavado en las operaciones mineras a nivel mundial son desechos mineros (Hartman, 1987). A comienzos del siglo XXI, más del 99% de los desechos mineros estaban siendo generados por minas superficiales, lo cual está fuera de proporción en relación a su nivel de producción de mineral (80%). Estos datos implican que la minería subterránea es más eficiente en el manejo de su producción de desechos.

Todas las minas a cielo abierto y subterráneas que son explotadas por debajo del nivel del agua requieren algún tipo de drenaje. El diseño de cualquier sistema de drenaje requiere la necesidad de estimar el volumen de agua a ser extraído de la mina.

En las minas a cielo abierto de suelos muy permeables y saturados, es muy importante tener en cuenta que se requerirá una fase de bombeo intensivo durante las primeras etapas de la operación, hasta que los niveles de aguas subterráneas se hayan deprimido lo suficiente para permitir el acceso a la mina. El caudal de bombeo durante las primeras etapas removerá agua del almacenamiento subterráneo y en muchos casos este caudal será mayor al requerido para mantener constante los niveles de aguas necesarios para el resto de la etapa de operación de la mina.

La principal forma de ingreso de agua a las minas activas es la infiltración o como se la conoce en inglés “seepage”. Las infiltraciones son áreas de ingreso difuso de agua a través del fondo de las excavaciones o a lo largo de contactos geológicos en las minas a cielo abierto y subterráneas.

Los ingresos de agua a través de infiltraciones pueden ser imperceptiblemente lentos, aunque la cantidad total de agua puede ser muy grande en total.

En las minas a cielo abierto, la precipitación directa en el tajo debe ser considerada en la planificación del sistema de drenaje para asegurar su correcto funcionamiento.

En muchas partes del mundo, se encuentran depósitos de minerales valiosos subyaciendo cuerpos de agua, como ríos, lagos, humedales, acuíferos y océanos. En el caso de las de minas subterráneas debajo de cuerpos de agua considerables, éstas pueden ser explotadas sin inducir hacia ellas la entrada de agua. Esto no es factible, en el caso de las minas a cielo abierto, puesto que para ser explotadas es necesario drenar el cuerpo de agua. Los siguientes problemas se asocian comúnmente a la presencia de cantidades excesivas de agua en las minas a cielo abierto:

- ✓ La incomodidad de los mineros de trabajar en áreas húmedas.
- ✓ El costo y la desventaja asociada a conducir el agua al sistema de drenaje principal.
- ✓ Los costos de drenaje por bombeo.
- ✓ La dificultad de operar equipo automatizado en suelos blandos debido al agua.

- ✓ La necesidad de usar explosivos a prueba de agua (mayor costo).
- ✓ La desestabilización de los taludes y pisos debido al agua.

### **2.1.2.1 Impactos Ocasionados por la Actividad Minera**

A partir de los años 1960, los posibles impactos ambientales de la minería han sido más polémicos, al punto que las desaprobaciones ambientales han sido frecuentemente el principal obstáculo para el desarrollo de nuevas minas o de la ampliación de las existentes (Beynon et al., 2000). El incremento en la polémica sobre los impactos ambientales de la minería es debido a la combinación de varios factores, entre los cuales cabe mencionar los siguientes:

- ✓ El incremento de la conciencia medio ambiental en todos los sectores de la sociedad en los años 1980 y 1990.
- ✓ El agotamiento de los recursos minerales en zonas mineras, llevando esto a la exploración de nuevas zonas que hasta la fecha eran prístinas, incluyendo áreas de conservación emblemáticas, como bosques nativos o reservas indígenas.
- ✓ El incremento de minas a cielo abierto, las cuales se diferencian de las minas subterráneas por tener mayor impacto visual.
- ✓ Un sin número de incidentes de contaminación, ocasionados por minas activas o abandonadas, los cuales han ocurrido en todos los continentes (UNEP, 1996; ICOLD, 2001).

En paralelo con el crecimiento de la desaprobación ambiental de la minería, las industrias mineras han desarrollado sistemas de gestión ambiental en sus actividades de operación y restauración para disminuir los posibles impactos ambientales causados por la industria.

Indudablemente, el agua es el principal medio receptor de los contaminantes asociados a la minería, pero no el único. También la actividad minera puede afectar negativamente otros elementos del medio ambiente. Algunos de los posibles impactos no acuáticos se mencionan a seguir:

- ✓ Alteraciones directas en el paisaje, ocasionado por las minas a cielo abierto, botaderos y la subsidencia en la superficie de las minas subterráneas.
- ✓ Contaminación del aire por la dispersión del polvo, emisión de gases de la maquinaria de las minas y las plantas procesadoras de los minerales.
- ✓ Alteración en la vida de los habitantes cercanos debido al ruido y a las vibraciones producidas por las actividades mineras.

Las actividades mineras pueden causar impactos que alteran los flujos de aguas superficiales y subterráneas a escala local y regional. Los impactos negativos causados por la minería están asociados a manejos inadecuados del agua de mina y a infraestructuras inadecuadas.

Es importante recalcar que no todas las aguas de mina tienen mala calidad, alguna de ellas tienen impactos positivos en el medio acuático. A continuación se nombran algunos de estos impactos positivos:

- ✓ Un número considerable de aguas de mina tienen una calidad suficientemente buena, que inclusive pueden ser utilizadas para abastecimiento de agua potable (Banks et al., 1996) y muchas más pueden ser usadas para actividades industriales o para riego de cultivos (Reddy et al., 2000).
- ✓ La descarga de agua de mina en los cauces superficiales produce dilución de las aguas servidas descargadas en éstos, que de no ser así se encontrarían considerablemente contaminadas.
- ✓ Existen aguas de minas que contienen metales disueltos en concentraciones que permiten la extracción de los mismos como un beneficio.

Dejando de lado los impactos positivos de las aguas de mina, la minería puede producir impactos positivos en las aguas de acuíferos contiguos. Por ejemplo, se ha demostrado que la minería subterránea puede incrementar la permeabilidad de acuíferos de areniscas (Booth et al., 1998).

Los impactos de la minería en el ambiente hídrico se producen en diferentes etapas de la actividad minera:

Tesis publicada con autorización del autor  
No olvide citar esta tesis

**UNFV**

- ✓ El proceso de la minería por si mismo.
- ✓ Las operaciones del proceso del mineral.
- ✓ El drenaje de la mina para hacer posible la explotación del mineral
- ✓ La filtración de líquido lixiviado contaminado de las pilas de lixiviación y de los relaves.
- ✓ La inundación de las áreas de explotación minera, después de que las mismas han cesado.
- ✓ La descarga de agua no tratada después de que la inundación fue completada.

El proceso de la minería por si mismo, principalmente afecta al ambiente hídrico debido a la alteración de la hidrología preexistente. A continuación se mencionan los principales impactos ocasionados por las minas subterráneas y las minas a cielo abierto en los recursos hídricos superficiales y subterráneos.

#### **2.1.2.2 Impactos en Sistemas Hídricos Superficiales**

Los impactos en los cursos de aguas superficiales debido a las minas subterráneas se producen, cuando un cauce es directamente interceptado por labores de minas subterráneas que han sido inadvertidamente conducidos hacia la superficie por debajo de un cauce o por fracturas causadas por la subsidencia de suelos.

A pesar de que las fracturas y labores se encuentren obstruidos durante muchos años y ya no sean evidentes, éstos seguirán desviando la escorrentía superficial hacia las minas subterráneas por muchas más décadas.

Los impactos de las excavaciones de los tajos de las minas a cielo abierto en los sistemas hídricos superficiales son a menudo menos sutiles que los de las minas subterráneas, siendo los principales impactos: la intercepción de cauces naturales por los tajos mineros y la pérdida de áreas naturales de escorrentía.

Donde los cauces superficiales atraviesan el tajo minero, normalmente los cauces originales serán desviados alrededor del perímetro del tajo durante la explotación minera por las siguientes razones:

- ✓ Si los cauces no son desviados, éstos adicionarán agua al tajo que deberá ser drenada. Como los costos del drenaje del tajo pueden representar una

gran proporción del total de los costos de operación, tiene sentido prevenir la incorporación de aguas superficiales en el tajo.

- ✓ Si las aguas superficiales pasan a través de la zona de explotación del tajo minero, éstas se contaminarán y deberán ser tratadas para cumplir con los requerimientos de las normas de descarga de agua.
- ✓ Si se permite el ingreso de agua de los cauces hacia el tajo, la continuidad natural del cauce original será completamente perdida, pudiendo producir graves consecuencias en la flora y fauna del mismo.

### **2.1.2.3 Impactos en Recursos Hídricos Subterráneos**

Los impactos en las aguas subterráneas ocasionados por la excavación de las minas subterráneas se relacionan concretamente con la deformación de los estratos cercanos a la excavación y los efectos que éstos producen en las propiedades hidráulicas y el comportamiento hidrogeológico del suelo. En algunos casos las permeabilidades del suelo o roca se ven incrementadas y en otros reducidas, permitiendo el mayor o menor ingreso de agua en la excavación, respectivamente. En términos de sistemas de aguas subterráneas, la explotación de minas subterráneas de considerable profundidad en acuíferos someros, resulta en la disminución del nivel del agua en el acuífero (Booth y Spande, 1992; Zipper et al. 1997). En algunos casos el nivel del agua en el acuífero se recupera al cesar la explotación minera (Booth y Spande, 1992), mientras que en otros casos la disminución del nivel del agua es permanente (Booth et al., 1998). Las minas a cielo abierto involucran la excavación y manipulación de roca antes intacta, produciendo la pérdida de almacenamiento en la zona no saturada debido a la remoción de roca e impactos del tajo minero sobre las rocas o suelos cercanos al mismo. Los impactos de las minas a cielo abierto sobre las rocas o suelos cercanos a las mismas, puede ser considerado menos severo que el ocasionado por las minas subterráneas, simplemente porque las minas a cielo abierto son excavadas al lado de los estratos. Sin embargo, las minas a cielo abierto pueden inducir incrementos considerables de la permeabilidad de suelos o rocas situados inmediatamente alrededor del tajo. Esto puede ser atribuido principalmente a dos procesos:

- ✓ Incrementos en la permeabilidad debido a los procesos de voladura, los cuales se realizan para facilitar la excavación del tajo.
- ✓ La extracción de bancos (escalones en que usualmente se realizan las labores de excavación), los cuales inducen a fracturamientos en los estratos situados inmediatamente alrededor del tajo minero.

Aunque las zonas de fracturamiento en las paredes del tajo son limitadas, se puede esperar que incrementen la permeabilidad alrededor de la mina a cielo abierto. Resultados de campañas de terreno y modelaciones de una mina en Virginia West sugieren que las conductividades hidráulicas en las zonas de fractura en las paredes del tajo eran dos órdenes de magnitud mayor que las que presentaba el suelo antes de la excavación del tajo (Hawkins, 1994). La presencia de zonas de alta permeabilidad puede contribuir al desarrollo de condiciones de flujo turbulento de aguas subterráneas en los alrededores del tajo (Dudgeon, 1985a, 1985b, 1997). Esto puede causar importantes consecuencias en la evaluación del impacto del drenaje del agua subterránea. Los procesos de los minerales, en general en el ambiente hídrico tienden a ser localizados y de magnitud limitada. La razón para ello, es que tanto el minero como el encargado de los recursos hídricos, comparten el interés en común de evitar que agua fresca ingrese a la zona de la actividad minera, puesto que de ocurrir esto ambas partes se ven afectadas. El impacto ocasionado por el drenaje de la minas varía desde impactos insignificantes en el caso de minas superficiales pequeñas (Streetley, 1998; Wardrop et al., 2001) hasta grandes disminuciones del nivel del agua subterránea y de aguas superficiales. A continuación se presentan los posibles impactos que el drenaje de minas puede ocasionar.

#### **2.1.2.4 Impactos en la Cantidad de Agua**

El drenaje de minas inevitablemente ocasiona el descenso del nivel de agua en los alrededores de la mina. Las consecuencias del descenso son conceptualmente los mismos que los ocasionados por el bombeo de aguas subterráneas (p. ej., para abastecimiento de agua potable) y por lo tanto, pueden ser analizados análogamente. Existe bastante literatura de los impactos de pozos de extracción de aguas subterráneas para el abastecimiento de agua potable sobre los recursos

Tesis publicada con autorización del autor. Ninguno de los análisis más recientes ha  
No olvide citar esta tesis

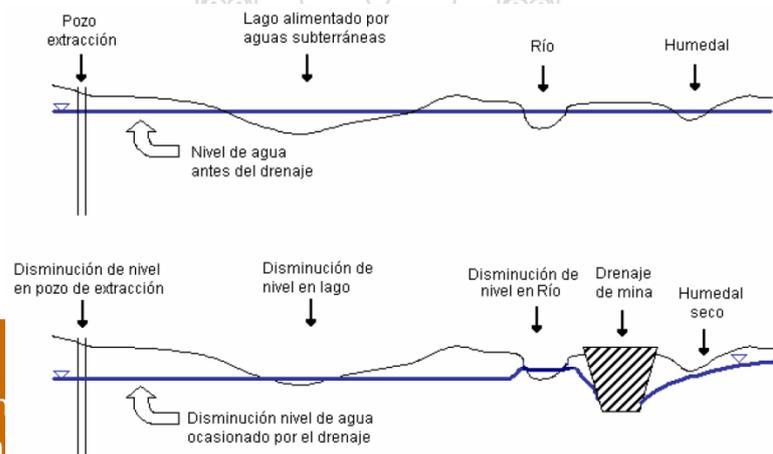
**UNFV**

cambiado los principios básicos enunciado por Theis (1940), quien señaló que cualquier extracción de agua subterránea ocasionará alguna o la combinación de las siguientes consecuencias:

- ✓ Decrecimiento en el volumen de almacenamiento natural del agua subterránea.
- ✓ Incremento en el caudal de recarga del agua subterránea.
- ✓ Decrecimiento en el caudal de descarga natural del agua subterránea.

La particularidad de los sistemas de drenaje de minas está en la maximización deliberada del decrecimiento en el volumen de almacenamiento natural de agua subterránea. Los decrecimientos en el almacenamiento se manifiestan en el descenso del nivel de agua. El descenso del nivel de agua provoca consecuencias socio-ambientales, las cuales no son todas negativas. Un aspecto negativo del descenso de los niveles de agua es que puede dejar pozos de extracción preexistentes secos. Esto también puede conducir al desecamiento de lagos (Figura N° 2-7), siendo algunos de alto valor ecológico y por ende, produciendo un grave impacto. Por otro lado, el secado de tierras anegadas puede ser ventajoso para la agricultura. El descenso de los niveles de agua, en áreas donde anteriormente la escorrentía superficial estaba por encima del suelo saturado, puede inducir a mayor recarga subterránea. El agua también puede ser inducida hacia el subsuelo desde cauces superficiales (Figura N° 2-7). En casos extremos, el drenaje puede conducir al secado completo o parcial de cauces superficiales durante todo el año o parte de éste.

**Figura N° 2-7. Efectos del Descenso de N.F. debido al Drenaje de Minas**



El decrecimiento en la descarga natural desde los acuíferos, es probablemente el impacto más común ocasionado por el drenaje de minas. El drenaje de minas puede ocasionar el secado de vertientes en acuíferos de roca sedimentaria y también puede reducir los caudales de descarga natural en cauces superficiales (Hobbs y Gunn, 1998). En muchos casos, las reducciones de los niveles en los cauces superficiales son compensadas con descargas de agua extraída de la mina en el proceso de drenaje.

## **2.2 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS**

**Acuicludo:** Es una formación geológica poco permeable, que conteniendo agua en su interior incluso hasta la saturación, no la transmite, por lo tanto no es posible su explotación. Generalmente los acuicludos son depósitos subterráneos de arcilla. *Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.02.*

**Acuífero:** Es aquel estrato o formación geológica permeable que permite la circulación y el almacenamiento del agua subterránea por sus poros o grietas. Dentro de estas formaciones podemos encontrarnos con materiales muy variados como gravas de río, limo, calizas muy agrietadas, areniscas porosas poco cementadas, arenas de playa, algunas formaciones volcánicas, depósitos de dunas e incluso ciertos tipos de arcilla. El nivel superior del agua subterránea se denomina nivel freático, y en el caso de un acuífero libre, corresponde al nivel freático. *Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.02.*

**Acuífero Confinado:** Son aquellos que están recubiertos por un terreno impermeable. El agua se encuentra a una presión superior a la atmosférica. Cuando se perfora un pozo en este tipo de acuíferos el agua asciende por él hasta alcanzar una altura que se denomina nivel piezométrico. En este caso, la roca permeable queda confinada por encima y por debajo en terrenos impermeables. Todo el espesor del acuífero está saturado de agua y la presión de agua en los poros o fisuras es mayor que la atmosférica. *Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile.*

*Pag.02.*

Tesis publicada con autorización del autor  
No olvide citar esta tesis

**UNFV**

**Acuífero Libre:** Son aquellos en los cuales existe una superficie libre de formaciones impermeables, el agua encerrada en ellos se encuentra a presión atmosférica. La superficie del agua será el nivel freático y podrá estar en contacto directo con el aire o no, pero lo importante es que no tenga por encima ningún material impermeable. En estos acuíferos, al perforar pozos que los atraviesen total o parcialmente, el agua alcanza un nivel que sería el mismo que tendría dentro de la formación geológica, es decir el nivel freático (nivel real) coincide con el nivel piezométrico (nivel ideal que alcanzaría el agua a presión atmosférica). Existe una zona impermeable que sirve de base a una zona permeable saturada de agua. Más arriba, existe una franja permeable. En los acuíferos libres se habla de espesor saturado, que será menor o igual que el espesor del estrato o formación geológica correspondiente. **Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.02.**

**Acuíferos Semiconfinados:** Son aquellos en los que el agua se encuentra a presión, igual que en los confinados (dicho más exactamente: su límite superior está a una presión superior a la atmosférica), pero alguna de las capas que lo confinan no es perfectamente impermeable y permite alguna filtración que contribuye en cierta proporción al caudal que se extrae del acuífero semiconfinado. Este tipo de acuíferos son mucho más frecuentes que los confinados, ya que en rocas sedimentarias son más abundantes las formaciones poco permeables que las absolutamente impermeables; aunque la permeabilidad de la capa confinante sea muy baja, siempre cederá una cierta cantidad de agua al acuífero semiconfinado. **Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.02.**

**Acuífugo:** Son las formaciones que no pueden almacenar agua, ni transmitirla, como ocurre por ejemplo a los granitos no fisurados. **Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.02.**

**Acuitardo:** Es una formación geológica semipermeable, que conteniendo apreciables cantidades de agua la transmiten muy lentamente, por lo que no son aptos para el emplazamiento de captaciones de aguas subterráneas, sin embargo

bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical de otros acuíferos. **Jorge Oyarzún M. (2009). *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.02.***

**Aforo:** Medida de Caudal (de un río, manantial, etc.). **Jorge Oyarzún M. (2009). *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.02.***

**Anisotropía:** Cualidad de los materiales en los que el comportamiento varía según la dirección considerada. En el caso de las aguas subterráneas es especialmente importante la anisotropía que consiste en la existencia de valores significativamente diferentes de conductividad hidráulica horizontal y vertical. **Jorge Oyarzún M. (2009). *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.02.***

**Balance Hídrico (de un acuífero):** Cuantificación de las cantidades de agua recibidas o aportadas en un periodo determinado por un acuífero, expresada en forma de ecuación, de tal modo que la diferencia entre las entradas y las salidas debe ser igual a la variación de las reservas (del agua almacenada) en el periodo considerado. **Jorge Oyarzún M. (2009). *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.03.***

**Conductividad Hidráulica:** La conductividad hidráulica representa la mayor o menor facilidad con la que el medio deja pasar el agua a través de él por unidad de área transversal a la dirección del flujo. Tiene las dimensiones de una velocidad ( $L T^{-1}$ ) y modernamente se distinguen dos tipos: la conductividad hidráulica darciana o lineal, KD y la conductividad hidráulica turbulenta, KT. **Jorge Oyarzún M. (2009). *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.03.***

**Coeficiente de Almacenamiento:** Relación entre el volumen de agua liberado por una columna de acuífero de superficie unidad, cuando el nivel piezométrico desciende una unidad, y un volumen unitario de acuífero. En los acuíferos confinados este valor depende muy directamente de la compresibilidad y la expansibilidad del agua y del medio acuífero y del espesor de éste. En los acuíferos libres, el coeficiente de almacenamiento equivale en la práctica a la

porosidad eficaz. *Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.03.*

**Cono de Abatimiento:** Estas extracciones de agua implican un descenso del nivel freático en los alrededores del pozo o desagüe de pozo dando lugar al llamado cono de abatimiento o cono de depresión cuyo tamaño depende de la cantidad de agua extraída por unidad de tiempo. Si se produce una sobreexplotación del pozo, el cono de depresión irá aumentando de tamaño progresivamente de modo que pueden secarse algunos pozos situados en los alrededores del cono de abatimiento. *Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.03.*

**Curvas Equipotenciales:** Las líneas equipotenciales, curvas que unen puntos con igual potencial hidráulico (en la sección vertical o en la horizontal) y, por tanto, representan la altitud o cota absoluta de la superficie freática (o de la superficie piezométrica en general). *Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.03.*

**Discretización:** La discretización es un proceso matemático mediante el cual vamos a obtener resultados aproximados de la ecuación diferencial del problema. *Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.03.*

**Gradiente Hidráulico:** El agua subterránea se mueve en la dirección en que decrece el potencial hidráulico total, de manera que si se mantienen constantes todos los demás factores, la cuantía del movimiento de aquélla en el seno de la zona saturada depende del gradiente hidráulico. El gradiente hidráulico (i) se define como la pérdida de energía experimentada por unidad de longitud recorrida por el agua; es decir, representa la pérdida o cambio de potencial hidráulico por unidad de longitud, medida en el sentido del flujo de agua. *Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.04.*

**Isopieza o Línea Isopiezométrica:** Éste término se utiliza a menudo como equivalente a la curva de nivel de la superficie piezométrica. Sin embargo tal

presión“, carácter que realmente es propio de cualquier línea situada sobre la superficie piezométrica, dado que todos los puntos de ésta se encuentran a presión atmosférica. Por esta razón las curvas de nivel de la superficie piezométrica deben ser denominadas mas propiamente como hidroisohipsas. **Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.04.**

**Manantial:** Un manantial o naciente es una fuente natural de agua que brota de la tierra o entre las rocas. Puede ser permanente o temporal. Se origina en la filtración de agua, de lluvia o de nieve, que penetra en un área y emerge en otra de menor altitud, donde el agua no está confinada en un conducto impermeable. **Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.07.**

**Mina a Cielo Abierto:** Se llaman minas a cielo abierto, y también minas a tajo (o tajo) abierto, a las explotaciones mineras que se desarrollan en la superficie del terreno, a diferencia de las subterráneas, que se desarrollan bajo ella. Para la explotación de una mina a cielo abierto, a veces, es necesario excavar, con medios mecánicos o con explosivos, los terrenos que recubren o rodean la formación geológica que forma el yacimiento. Estos materiales se denominan, genéricamente, estéril, mientras que a la formación a explotar se le llama mineral. El estéril excavado es necesario apilarlo en escombreras fuera del área final que ocupará la explotación, con vistas a su utilización en la restauración de la mina una vez terminada su explotación. Las minas a cielo abierto son económicamente rentables cuando los yacimientos afloran en superficie, se encuentran cerca de la superficie, con un recubrimiento pequeño o la competencia del terreno no es estructuralmente adecuada para trabajos subterráneos (como ocurre con la arena o la grava). Cuando la profundidad del yacimiento aumenta, la ventaja económica del cielo abierto disminuye en favor de la explotación mediante minería subterránea. **Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.07.**

**Modelo Conceptual:** Representación teórica simplificada de la realidad de un sistema acuífero; la elaboración de un modelo exige definir la estructura del sistema (límites, características geométricas, etc.) y formular las leyes que relacionan las entradas del sistema y sus respuestas (salidas), de acuerdo con los

parámetros que intervienen en dichas relaciones. **Jorge Oyarzún M. (2009).** *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.07.*

**Modelo Numérico:** El término se refiere generalmente a un modelo consistente en la formulación matemática de las relaciones entre las impulsiones y las respuestas del sistema (entradas – salidas), teniendo en cuenta los parámetros físicos del acuífero. Un modelo de este tipo consigue simular, con auxilio del tratamiento de datos del ordenador, el comportamiento del acuífero frente a diferentes actuaciones o escenarios sobre el mismo. **Jorge Oyarzún M. (2009).** *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.07.*

**Piezómetro:** Pozo o sondeo utilizado para medir la altura piezométrica en un punto dado de un acuífero. **Jorge Oyarzún M. (2009).** *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.13.*

**Porosidad Eficáz:** Relación entre el volumen de agua gravífica (agua que una roca o sedimento puede liberar por efecto exclusivamente de la gravedad) y el volumen total de la roca o sedimento. **Jorge Oyarzún M. (2009).** *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.13.*

**Potencial Hidráulico:** Si se construye un pozo hasta una profundidad dada dentro de la zona saturada del sustrato y se instala la rejilla o tubería filtrante exclusivamente en ese punto, el agua ascenderá por el interior de la tubería del pozo hasta una altura determinada, en que se encuentre en equilibrio con la presión atmosférica. Dicha altitud o cota absoluta corresponde al potencial hidráulico de ese punto, y físicamente representa, en altura, la energía de que dispone el agua en el punto considerado del subsuelo. **Jorge Oyarzún M. (2009).** *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.13.*

**Transmisividad:** La transmisibilidad o transmisividad hidráulica de un acuífero es la tasa de flujo bajo un determinado gradiente hidráulico a través de una unidad de anchura de acuífero de espesor dado, y saturado. Es el producto del espesor saturado de dicho acuífero y la conductividad hidráulica (K). Se mide en una unidad de superficie dividido en una unidad de tiempo. Tiene dimensiones:

[m<sup>2</sup>]/[día] o L<sup>2</sup>\*T<sup>-1</sup>. En otras palabras, transmisividad (T), es el volumen de agua que atraviesa una banda de acuífero de ancho unitario en la unidad de tiempo y bajo la carga de un metro. Es representativa de la capacidad que tiene el acuífero para ceder agua. Se pueden distinguir dos tipos de transmisividad: la transmisibilidad darciana o lineal, TD (TD = m\*KD) y la transmisibilidad turbulenta, TT (TT = m\*KT). Diversos experimentos<sup>1</sup> han demostrado que la conductividad hidráulica darciana no sólo depende de las características del medio, sino también de las del fluido (su viscosidad y peso específico), por lo que se estableció una relación entre KD, las propiedades del fluido y una característica intrínseca del medio que es independiente del fluido que circula a través de él. Esa característica se denomina permeabilidad intrínseca o geométrica y se representará por el símbolo k. *Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.18.*

**Recarga Artificial:** Procedimiento por el que se inyecta o añade en un acuífero agua desde la superficie. Puede realizarse por distintos métodos, ya sea favoreciendo la infiltración en su superficie (método solo aplicable a acuíferos libres) o procediendo a inyectar en una perforación (en acuíferos confinados es la única solución viable). *Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.19.*

**Zona No Saturada:** Es la zona comprendida entre las superficie del terreno y el nivel piezométrico, en la que los poros que existen en la roca o en el suelo contienen agua, a presión inferior a la atmosférica, además de aire y otros gases. *Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.20.*

**Zona Saturada:** Zona de un acuífero en las que los poros están ocupados en su totalidad por agua. *Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.20.*

### 2.3 MARCO LEGAL

Reglamento de Protección y Gestión Ambiental para las Actividades de Explotación, Beneficio, Labor General, Transporte y Almacenamiento Minero.

Tesis publicada con autorización del autor  
Decreto Supremo N° 040-2014-EM.  
No olvide citar esta tesis

UNFV

- ✓ Términos de referencia comunes para los Estudios de Impacto Ambiental Detallados (Categoría III) de Proyectos de Explotación, Beneficio y Labor General Mineros Metálicos a Nivel de Factibilidad.
- ✓ Términos de referencia comunes para los Estudios de Impacto Ambiental Detallados (Categoría III) de Proyectos de Aprovechamiento de Materiales de Construcción, Industriales u Otros Mineros No Metálicos a Nivel de Factibilidad.
- ✓ Términos de referencia comunes para los Estudios de Impacto Ambiental Semidetallados (Categoría II) de Proyectos de Aprovechamiento de Materiales de Construcción, Industriales u Otros Mineros No Metálicos a Nivel de Factibilidad.
- ✓ Términos de referencia comunes para los Estudios de Impacto Ambiental Detallados (Categoría III) de Proyectos de Almacenamiento de Minerales y/o Concentrados de Minerales a Nivel de Factibilidad.
- ✓ Términos de referencia comunes para los Estudios de Impacto Ambiental Semidetallados (Categoría II) de Proyectos de Almacenamiento de Minerales y/o Concentrados de Minerales a Nivel de Factibilidad.
- ✓ Términos de referencia comunes para los Estudios de Impacto Ambiental Detallados (Categoría III) de Proyectos de Transporte Minero No Convencional a Nivel de Factibilidad.
- ✓ Términos de referencia comunes para los Estudios de Impacto Ambiental Semidetallados (Categoría II) de Proyectos de Transporte Minero No Convencional a Nivel de Factibilidad.
- ✓ Términos de referencia comunes para los Estudios de Impacto Ambiental Detallados (Categoría III) de Proyectos de Línea de Transmisión Eléctrica para Operación Minera a Nivel de Factibilidad.
- ✓ Términos de referencia comunes para los Estudios de Impacto Ambiental Detallados (Categoría III) de Proyectos de Acueducto y Planta Desalinizadora para Operación Minera a Nivel de Factibilidad.
- ✓ Términos de referencia comunes para los Estudios de Impacto Ambiental Semidetallados (Categoría II) de Proyectos de Acueducto y Planta Desalinizadora para Operación Minera a Nivel de Factibilidad.

## **CAPÍTULO III: MATERIALES, EQUIPOS Y MÉTODOS**

### **3.1 MATERIALES**

- ✓ Pruebas hidráulicas de los piezómetros inventariados en el área de estudio.
- ✓ Características del comportamiento hidráulico de la zona de estudio.
- ✓ Inventario de fuentes de agua del área de estudio.
- ✓ Estudio geológico de la zona de estudio.
- ✓ Medición del nivel freático estático en los pozos inventariados.
- ✓ Carta Nacional de la zona de estudio a una escala 1/100 000 (IGN), 31m San Juan, 31n Acarí y 32n Yauca.
- ✓ Revisión bibliográfica compilada de los estudios realizados en el área y lugares cercanos.

#### **3.1.1 Equipos**

- ✓ 01 Computadora Intel core i7 - Elaboración de mapas, redacción del trabajo de investigación, procesamiento del modelo numérico.
- ✓ ArcGis 9.3 - Elaboración de mapas y análisis de interpolaciones.
- ✓ Autocad Civil 2014 - Construcción del DEM, secciones transversales y longitudinales.
- ✓ Modflow Surfact, Leapfrog Hydro, Groundwater Vistas – Elaboración del modelo conceptual y numérico hidrogeológico.
- ✓ Impresora Multifuncional HP 2050 – Impresión en alta calidad del trabajo de investigación.
- ✓ Escáner HP 300 – Escaneo de mapas e información piezométrica.

#### **3.1.2 Instrumentos**

- ✓ 01 Gpsmap Garmin 60CSx – Geoposicionamiento de los puntos del inventario de fuentes de agua superficial y subterráneo, además de zonas propensas a recarga.
- ✓ 01 Cinta de Nivel de Agua “Level Tape 200” - Mediciones de nivel freático estático en los pozos inventariados.
- ✓ 01 Picota ESTWING modelo E3-22P - Recolección de muestras de roca.

## **3.2 MÉTODOS**

### **3.2.1 Método de la Investigación**

El método de la investigación es deductivo porque parte de lo general a lo particular, es estadístico ya que se tiene una secuencia de procedimientos para el manejo de los datos cualitativos y cuantitativos de la investigación, es cartográfico ya que se realiza un reconocimiento del entorno territorial a través de la construcción de mapas y permitir un mejor entendimiento de la realidad, es inductivo porque va de lo particular a lo general.

### **3.2.2 Diseño y Nivel de Investigación**

El diseño de la investigación es de tipo no experimental transeccional, debido a que la investigación se analiza la realidad y se observa la situación y se recolectan datos, cuyo propósito es describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado.

La presente investigación es aplicada y correlacional/causal, porque se aplica conocimientos científicos y técnicos para el control y toma de decisiones en la actividad minera, así mismo se correlaciona información que nos permite conocer las relaciones entre las variables del estudio.

### **3.2.3 Muestra**

La muestra tomada en este trabajo de investigación correspondería a las pruebas hidráulicas recopiladas de once piezómetros instalados en la zona de estudio realizado por Amec Perú S.A. así como al inventario de fuentes de agua realizados en los acuíferos de Jahuay, de Bella Unión y de la Zona Costera; ubicados en el distrito de Bella Unión y Lomas, región Arequipa.

### **3.2.4 Procedimiento**

Para lograr los objetivos planteados con anterioridad primero se realizó la revisión de la información disponible del área de estudio y de estudios cercanos a la zona, con la finalidad de conocer las características fisiográficas, hidrográficas, climatológicas y geológicas de la zona investigada, lo cual representa una condición indispensable para la construcción de un modelo hidrogeológico,

previamente se recopiló información de las características hidráulicas de once piezómetros instalados (pruebas de permeabilidades mediante ensayos Lugeon y ensayos Lefranc) en las formaciones hidrogeológicas aledañas al tajo a cielo abierto elaboradas por Amec Perú S.A.C., se colectó información litológica y estructural; así como la recolección de información de niveles piezométricos para evaluar las direcciones del flujo subterráneo, en el cual se monitoreó el potencial hidráulico presente. También se recolectó información sobre inventarios de fuentes de agua presentes en el entorno del área de influencia ambiental indirecta de la zona de investigación.

Con la información recopilada se procedió a elaborar un modelo de simulación hidrogeológico con la finalidad de representar matemáticamente o numérica simplificando la compleja hidrología e hidrogeología del sitio, utilizando ecuaciones que gobiernan el flujo y conservación de la masa para simular el agua en el medio poroso y fracturado.

Primero, luego de realizar la investigación bibliográfica hidrogeológica y de estudios anteriores y cercanos al lugar, se elaboró un modelo hidrogeológico conceptual a partir de la distribución de las propiedades hidráulicas de las formaciones y estructuras geológicas, además de los niveles de agua subterránea observadas; para de esta manera representar y desarrollar el modelo conceptual 3D, para lo cual se utilizó el software Leapfrog Hydro.

Segundo, luego de elaborar el modelo conceptual hidrogeológico y contar con información contundente que corrobore dicha representación de la realidad a través de una buena conceptualización del modelo hidrogeológico conceptual se procedió a seleccionar el código de modelamiento, para nuestro caso de acuerdo a la asunción de un medio poroso equivalente se procedió a la simulación mediante ecuaciones de diferencia finitas; para el modelamiento numérico se eligió el código de simulación MODFLOW USG (Panday, Sorab, Langevin, C.D., Niswonger, R.G., Ibaraki, Motomu and Hughes, J.D., 2013), y la interface Groundwater Vistas V 6.53 (Environmental Simulations, Inc.), ambos permiten flexibilidad en el diseño de la malla en zonas de ríos, fallas, alrededores de pozos o realizar discretización de capas solas, mejorando la discretización en zonas

puntuales, estas mallas pueden ser triángulos prismáticos, rectángulos o hexágonos.

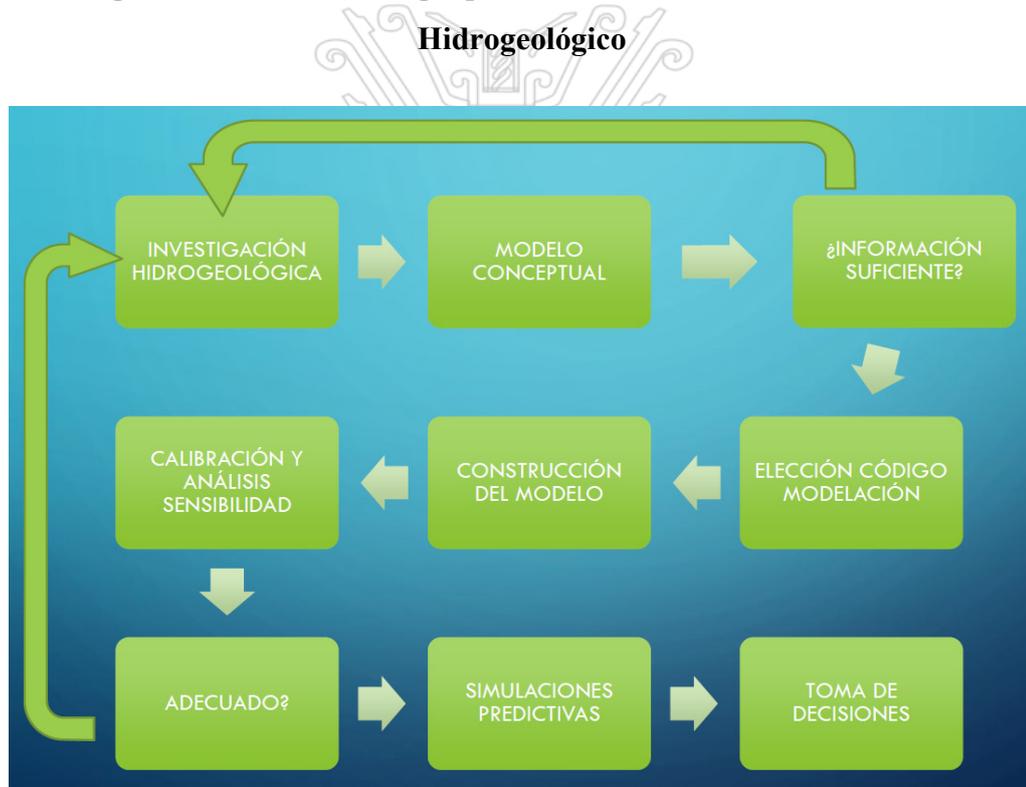
Tercero, una vez elegido el código de modelamiento se procedió a la construcción del modelo a escala regional abarcando las subcuencas de la quebrada Jahuay y Sacaco, basado en la geología regional, local e información hidrogeológica obtenida durante la fase de revisión bibliográfica. Para hacer eso, se ha utilizado la asunción de simplicidad para determinar las unidades hidrogeológicas, y así poder agrupar formaciones geológicas de características hidrogeológicas similares (propiedades y tipos de rocas iguales). En ella se determina además la discretización numérica con indicación del tipo de borde, potenciales impuestos, zonas de recarga, las propiedades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas a cada nodo del mallado (K, Ss), y los pozos de observación utilizadas para desarrollar del modelo numérico.

Cuarto, una vez realizado la construcción del modelo se procedió a la calibración del modelo en estado estacionario, el cual se basó en el cambio de las conductividades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas para obtener un mejor ajuste entre las cargas observadas y calculadas, todas estas estadísticas se basan en los valores residuales de las cargas observadas y simuladas para obtener un modelo calibrado donde el error cuadrático medio normalizado (NRMSE) debe ser menor al 10%. Luego se realizó el análisis de sensibilidad después de calibrar el modelo estacionario, con esta metodología se estima rangos de confianza para el modelo predictivo o simplemente evaluar el impacto del cambio de alguno de los parámetros hidrogeológicos (conductividad hidráulica y recarga).

Quinto, luego de que el modelo simulado sea el adecuado y represente casi la realidad del comportamiento hidrogeológico de la zona de estudio se procedió a realizar los modelos predictivos y análisis de efectos en el cual se utiliza el modelo numérico estacionario como base para desarrollar el modelo numérico en régimen transitorio, el cual permitirá predecir los impactos producidos durante la fase de operación y cierre del tajo a cielo abierto proyectado del proyecto minero Pampa del Pongo y de esta manera ayudarnos en una mejor toma de decisiones evaluando y entendiendo la dinámica del medio natural.

Sexto, Por último luego de determinar la tasa de desagüe del tajo a cielo abierto del proyecto minero Pampa del Pongo se evaluó el grado de influencia del cono de depresión producto de este desagüe a los recursos hídricos subterráneos presentes en los acuíferos de Jahuay, Bella Unión y Zona Costera durante la fase de operación y cierre. Los resultados modelados sirven como una herramienta de gestión de los recursos hídricos subterráneos con la finalidad de tomar sabias decisiones y no presentar inconvenientes en el futuro, ver Figura N° 3-1.

**Figura N° 3-1. Metodología para Elaborar un Modelo Numérico**



*Fuente: Elaboración Propia*

---

## **CAPÍTULO IV: DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

### **4.1 UBICACIÓN Y ACCESOS**

El proyecto se encuentra ubicado en la costa sur del Perú, en los distritos de Bella Unión y Lomas, Provincia de Caravelí, Región Arequipa. Limita por el sureste con el distrito de Acarí, (Región Arequipa); por el noroeste con el distrito de Marcona (Región Ica); por el suroeste el Océano Pacífico; y por el noreste con el distrito de Santa Lucía (Región Ayacucho). Se encuentra entre los paralelos 15° 19' – 15° 21' de latitud sur y los meridianos 74° 53' – 74° 48' de longitud oeste de Greenwich. La altitud del área del Proyecto varía entre los 320 m.s.n.m. y 460 m.s.n.m.

El acceso al proyecto desde Lima es a través de la Carretera Panamericana Sur hasta el kilómetro 550 y 37 a lo largo del distrito de Bella Unión. (*Ver Anexo 02 Mapas*).

### **4.2 COMPONENTES FÍSICOS**

La línea base física del proyecto tiene como objetivo describir las condiciones del área de estudio antes del desarrollo de las actividades del Proyecto. Es importante mencionar que los componentes ambientales descritos son dinámicos y por consiguiente se encuentran en constante cambio. En ese sentido, la descripción de los componentes físicos debe entenderse como la fotografía del área de estudio antes de la ejecución de las actividades del Proyecto.

Es preciso señalar que el área de estudio presenta particularidades muy marcadas, principalmente la ausencia de precipitación prácticamente durante todo el año. En ese sentido, la variación estacional en el área de estudio se ha definido sobre la base a la variación estacional de las lomas, la cual presenta dos estaciones durante el año: verano comprendido entre diciembre y marzo e invierno que abarca entre junio y setiembre.

#### **4.2.1 Clima y Meteorología**

Las características ambientales en la costa peruana están reguladas por la presencia de controladores climáticos semipermanentes tales como:

- ✓ El Anticiclón Pacífico Sur (APS);
- ✓ La Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), en la cual confluyen los vientos Alisios del Sur-Este y del Nor-Este;
- ✓ La Corriente Fría Peruana que mantiene temperaturas bajas en los estratos superficiales del mar en plena área tropical debido al fenómeno de afloramiento marino;
- ✓ La presencia de la Cordillera de los Andes que atraviesa la parte occidental del continente americano, paralela a la Costa, y que constituye una barrera natural que impide el libre paso de las masas de aire húmedo del Atlántico al Pacífico.

El departamento de Arequipa comprende regiones de costa y sierra, con una geografía caracterizada por presentar fuertes contrastes fisiográficos. En este departamento pueden distinguirse tres zonas, en las cuales las características climáticas son diferenciadas: la costa estrecha y desértica (con altitudes comprendidas entre 0 msnm y 1000 msnm), las pampas desérticas (1000 msnm a 3 800 msnm) y la sierra, con cumbres andinas (superior a 3 800 msnm).

El Proyecto se ubica en la zona costera. Esta es una franja angosta con características climáticas asociadas al litoral; lo cual le confiere condiciones de cielo nuboso y escasa o nula precipitación durante la mayor parte del año. La ausencia de sistemas de baja presión, por lo general asociados con los eventos de lluvia, favorecen estas condiciones. Las temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales a lo largo de la costa de Arequipa no presentan mucha variabilidad. A mayor distancia de las zonas costeras, y por lo tanto a mayor altitud, las temperaturas máximas promedio son más altas, y las mínimas promedio más bajas, respecto aquellas estaciones ubicadas en el mismo litoral. La alta humedad relativa favorece la cobertura de nubes tipo estratocúmulus que se presentan casi continuamente desde los meses de mayo hasta octubre. Ver Tabla N° 4-1 y Tabla N° 4-2.

**Tabla N° 4-1. Estaciones Meteorológicas Regionales**

Estación	Tipo	Estado	Ubicación Política			Ubicación Geográfica		
			Departamento	Provincia	Distrito	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altitud (msnm)
Lomas	CO	O	Arequipa	Caravelí	Lomas	15°34'06"	74°51'06"	20
San Juan de Marcona	CO	I	Ica	Nazca	Marcona	15° 22'	75° 11'	30
Yauca	CO	I	Arequipa	Caravelí	Yauca	15° 40'	74° 31'	48
Acarí	CO	I	Arequipa	Caravelí	Acarí	15° 24'	74°37'	200
Huarato	PLU	I	Arequipa	Caravelí	Acarí	15° 17'	74°34'	353
San Camilo	CO	O	Ica	Ica	Parcona	14° 05'	75° 43'	398
Copara	CO	O	Ica	Nazca	Vista Alegre	14° 58'	74°54'	600
Chaparra	CO	O	Arequipa	Caravelí	Chaparra	15°45'	73°52'	1 033
Otoca	PLU	O	Arequipa	Lucanas	Otoca	14° 29'	74°41'	1 823

Fuente: Jinzhao, 2013.

Nota: Tipo de Estación, referido a Climatológica Ordinaria (CO), Pluviométrica (PLU). Estado, referido a Operativo (O), Inoperativo (I).

**Tabla N° 4-2. Estaciones Meteorológicas Locales**

Estación	Tipo	Estado	Ubicación Política			Ubicación Geográfica		
			Departamento	Provincia	Distrito	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altitud (msnm)
Puerto Lomas	Auto	O	Arequipa	Caravelí	Lomas	15°29'56"	74°56'42"	54
Pampa del Pongo	Auto	O	Arequipa	Caravelí	Bella Unión	15°21'39"	74°50'19"	417

Fuente: Jinzhao, 2013.

Nota: Tipo de Estación, referido a Automática (Auto). Estado, referido a Operativo (O), Inoperativo (I).

#### 4.2.1.1 Análisis Meteorológico

##### *Temperatura*

La temperatura del aire, constituye el elemento climático más importante. Las variaciones que experimenta, no sólo se deben a la latitud, sino también a los contrastes entre las superficies terrestres y marítimas. Para el área del Proyecto, esta variable se encuentra influenciada por las bajas temperaturas de la corriente fría del Humboldt, así como por la circulación de masas secas y estables provenientes del Anticiclón del Pacífico Sur (APS). El comportamiento de la temperatura del aire mantiene el típico patrón estacional caracterizado por los máximos valores en la estación de verano y los mínimos en la estación de invierno.

Para analizar la temperatura se utilizaron registros de seis estaciones meteorológicas, cuyas coordenadas de ubicación y principales características se muestran en la Tabla N° 4-3. Dichas estaciones se encuentran ubicadas entre los 20 msnm y 600 msnm, e incluyen a las estaciones automáticas instaladas en el área del Proyecto.

**Tabla N° 4-3. Estaciones Meteorológicas utilizadas para el análisis de Temperatura**

Estación	Tipo	Estado	Ubicación Geográfica			Periodo de Registro	Administración
			Latitud Sur	Longitud Oeste	Altitud (msnm)		
Lomas	CO	O	15°34'06"	74°51'06"	20	1949-1957; 2000-2011	SENAMHI
Yauca	CO	I	15° 40'	74°31'	48	1964-1975	SENAMHI
Puerto Lomas	Auto	O	15°29'56"	74°56'42"	54	2012-2013	Jinzhao
Acarí	CO	I	15° 24'	74°37'	200	1964-1985	SENAMHI
Pampa del Pongo	Auto	O	15°21'39"	74°50'19"	417	2011-2013	Jinzhao
Copara	CO	O	14° 58'	74°54'	600	2000-2012	SENAMHI

Fuente: Jinzhao / SENAMHI.

Nota: Tipo de Estación, referido a Climatológica Ordinaria (CO), Automática (AUTO). Estado, referido a Operativo (O), Inoperativo (I).

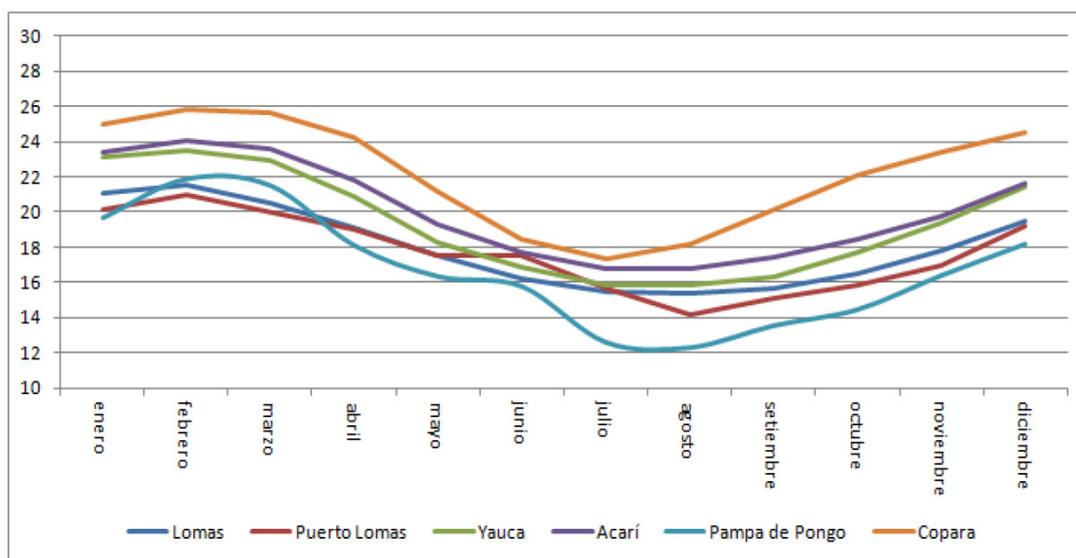
En la Tabla N° 4-4 se muestran las temperaturas promedio, máximas y mínimas de las estaciones consideradas para este análisis. Cabe señalar que se ha incluido con fines prácticos a las estaciones Puerto Lomas y Pampa del Pongo para esta comparación, a pesar que tienen registros menores a dos años. La temperatura promedio anual más alta corresponde a la estación Copara (22,1°C) y la más baja corresponde a la estación Pampa del Pongo con un valor de 16,7°C. La temperatura promedio mensual más alta fue registrada en el mes de febrero (25,8°C) en la estación Copara, mientras que la temperatura promedio mensual más baja se registró en el mes de julio en la estación Pampa del Pongo con un valor de 12,6°C.

**Tabla N° 4-4. Temperatura Promedio Mensual**

Estación	Altitud (msnm)	Temperatura media mensual												Media Anual
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
Lomas	20	21,1	21,5	20,5	19,1	17,5	16,2	15,5	15,4	15,7	16,5	17,8	19,5	18,0
Puerto Lomas	54	20,1	21	19,8	19	17,5	17,5	15,7	14,2	15,1	15,8	17	19,2	17,7
Yauca	48	23,1	23,5	22,9	20,9	18,3	16,9	15,8	15,8	16,3	17,7	19,4	21,4	19,3
Acarí	200	23,4	24,1	23,6	21,8	19,3	17,7	16,8	16,8	17,4	18,5	19,8	21,6	20,1
Pampa del Pongo	417	19,7	21,9	21,5	17,4	16,3	15,8	12,6	12,3	13,6	14,5	16,4	18,2	16,7
Copara	600	25,0	25,8	25,6	24,2	21,2	18,5	17,3	18,2	20,1	22,1	23,4	24,5	22,1

Fuente: Jinzhao / SENAMHI.

**Figura N° 4-1. Variación Mensual de la Temperatura Promedio del Aire**



Fuente: Jinzhao / SENAMHI.

De acuerdo a lo observado en la Figura N° 4-1, la temperatura media mensual presenta un comportamiento propio de zonas costeras, siendo los meses de febrero y marzo los meses más cálidos, y julio el mes más frío.

Es importante señalar que la temperatura a nivel de litoral es más estable en su régimen que las temperaturas registradas hacia el interior; esto se debe a la influencia marítima muy próxima que actuaría con un efecto termorregulador sobre las temperaturas.

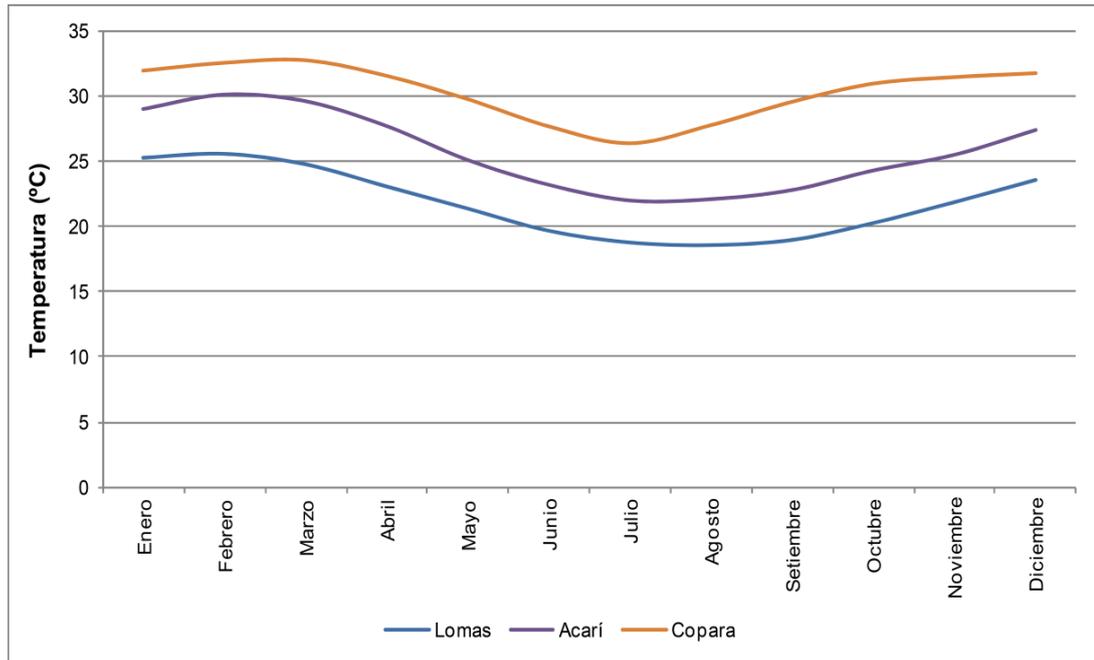
En la Tabla N° 4-5 se presentan las temperaturas máximas promedio mensuales de las estaciones meteorológicas ubicadas entre 20 msnm y 600 msnm, cuya información está disponible.

**Tabla N° 4-5. Temperaturas Máximas Promedio Mensuales**

Estación	Altitud (msnm)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Media Anual
Lomas	20	25,3	25,6	24,8	23,1	21,4	19,7	18,8	18,6	19	20,3	21,9	23,6	21,8
Acarí	200	29,0	30,1	29,6	27,7	25,1	23,2	22	22,1	22,8	24,3	25,5	27,4	25,7
Copara	600	31,9	32,5	32,7	31,5	29,7	27,6	26,3	27,7	29,5	30,9	31,4	31,7	30,3

Fuente: SENAMHI.

**Figura N° 4-2. Variación Mensual de la Temperatura Máxima Promedio**



Fuente: Jinzhao / SENAMHI.

Tal como se observa en la Figura N° 4-2, la temperatura máxima alcanza valores de 32,7°C en el mes de marzo en la estación Copara, la cual se encuentra a 45 km del litoral. Aquellas estaciones que estén ubicadas a mayor distancia y mayor altitud presentan temperaturas máximas promedio más altas, tal como sucede en la estación Copara.

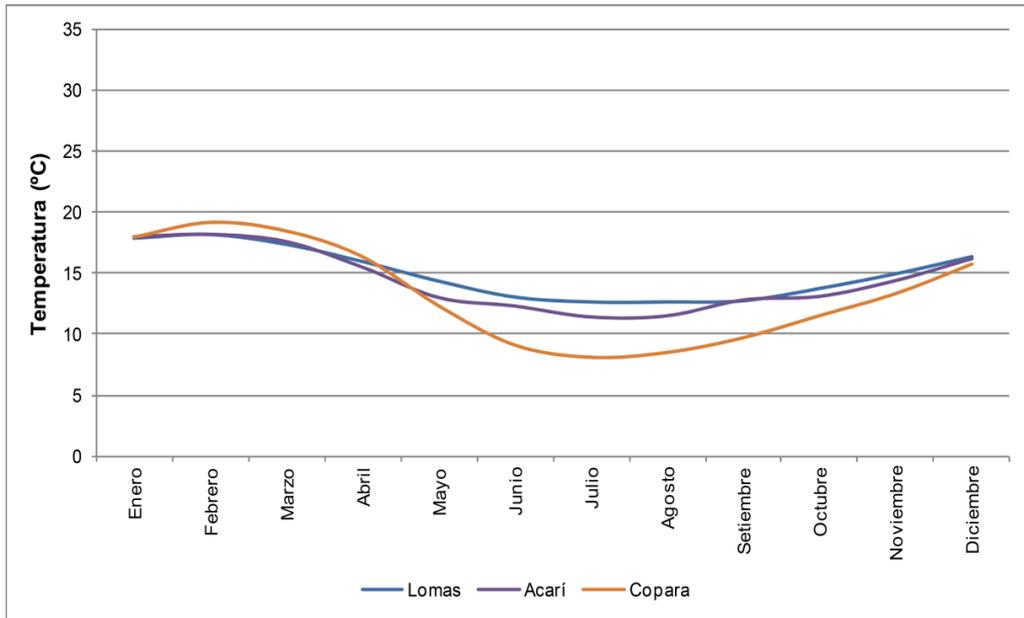
En la Tabla N° 4-6 se presentan las temperaturas mínimas promedio mensuales de las estaciones meteorológicas ubicadas entre 20 msnm y 600 msnm, cuya información está disponible.

**Tabla N° 4-6. Temperaturas Mínimas Promedio Mensuales**

Estación	Altitud (msnm)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Media Anual
Lomas	20	17,8	18,1	17,3	15,9	14,3	13,0	12,6	12,6	12,7	13,7	14,9	16,3	<b>14,9</b>
Acarí	200	18,0	18,2	17,6	15,5	13,0	12,3	11,4	11,5	12,8	13,1	14,4	16,2	<b>14,5</b>
Copara	600	17,9	19,1	18,4	16,3	12,3	9,1	8,1	8,5	9,7	11,5	13,3	15,7	<b>13,3</b>

Fuente: SENAMHI.

Figura N° 4-3. Variación Mensual de la Temperatura Mínimas Promedio



Fuente: Jinzhao / SENAMHI.

Tal como se observa en la Figura 4-3, la temperatura mínima desciende hasta el valor de 8,1°C en el mes de julio en la estación Copara. Esta estación al encontrarse ubicada a 45 km del litoral y a 600 msnm presenta las temperaturas mínimas más bajas de las estaciones evaluadas. Respecto a las estaciones ubicadas en el Área de Estudio Ambiental Terrestre y Acuática del Proyecto, Puerto Lomas (54 msnm) y Pampa del Pongo (417 msnm), se han revisado las temperaturas máximas y mínimas registradas durante su periodo de medición. En la Tabla N° 4-7 se presentan los registros obtenidos para cada estación. De acuerdo a esto, en la estación Pampa del Pongo la temperatura puede alcanzar valores de 29,9°C (marzo) y descender hasta 7,8°C en el mes de julio. En la estación Puerto Lomas, la temperatura alcanza valores de 25,3°C en febrero y desciende hasta 12,2°C en setiembre. Ver Tabla N° 4-7.

Tabla N° 4-7. Temperaturas Máximas y Mínimas Registradas en las Estaciones Puerto Lomas y Pampa del Pongo

Estación	Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Pampa del Pongo	Máximo	27,7	28,8	29,9	25,3	25,3	23,5	18,6	21,7	21,3	22,7	22,6	25,5
	Mínimo	13,7	15,9	9,8	9,5	8,9	10,6	7,8	8,3	9,2	9,8	11,2	10,0
Puerto Lomas	Máximo	23,5	25,3	22,6	23,2	19,7	20,0	17,8	16,3	17,4	18,0	19,6	22,5
	Mínimo	16,7	16,7	16,4	15,4	15,4	14,6	13,7	12,6	12,2	13,9	14,5	16,3

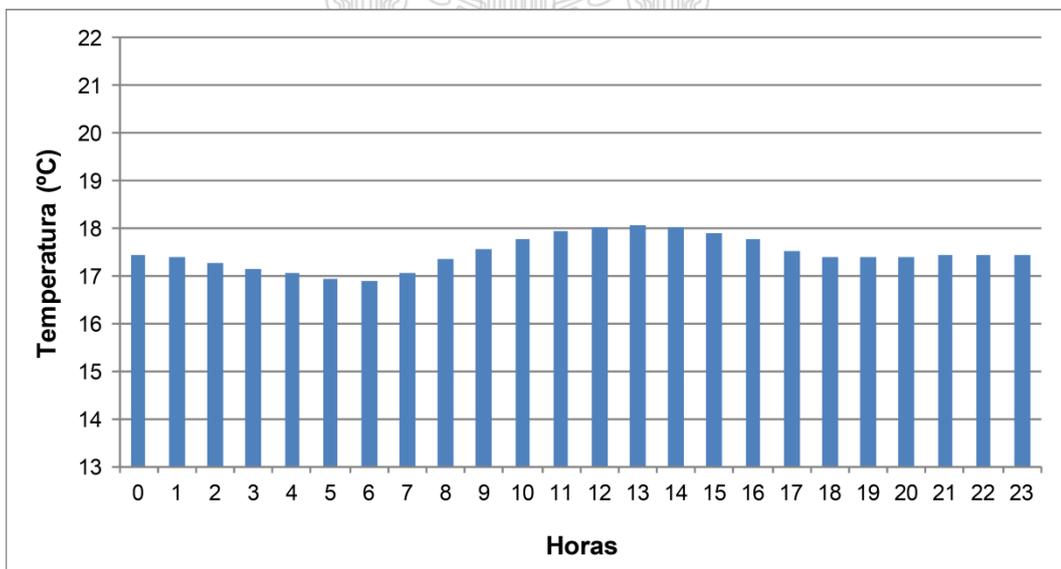
Fuente: Jinzhao.

(-) no se cuentan con suficientes registros diarios.

Se ha realizado el análisis de la variación diaria de la temperatura del aire para las estaciones ubicadas en el Área de Estudio Ambiental Terrestre del Proyecto (ver Figura N° 4-4 y Figura N° 4-5). Las temperaturas alcanzan los mayores valores hacia las horas de la tarde; mientras que sus menores valores suelen ocurrir en la madrugada.

Respecto a la onda térmica diurna, las temperaturas extremas máximas ocurren dos a cuatro horas después de la ocurrencia de la máxima intensidad de radiación solar; es decir, alrededor de las 14:00 h, cuando la energía radiante que ingresa es mayor que la energía radiante que se pierde por reflexión en la superficie. Tal como se observa, en la Figura 4-4, la variación diaria de la temperatura es bastante uniforme. La estación Puerto de Lomas está ubicada a 50 m del litoral, por lo que es influenciada por el efecto termorregulador del mar, ya que suaviza los contrastes térmicos entre el día y la noche. La temperatura más alta se alcanzó a las 13:00 h con un valor de 18,1°C; mientras que la temperatura mínima ocurrió entre las 5:00 h y 6:00 h con un valor de 16,9°C.

**Figura N° 4-4. Variación Diaria de la T° Promedio (°C) de la Estación Puerto Lomas**

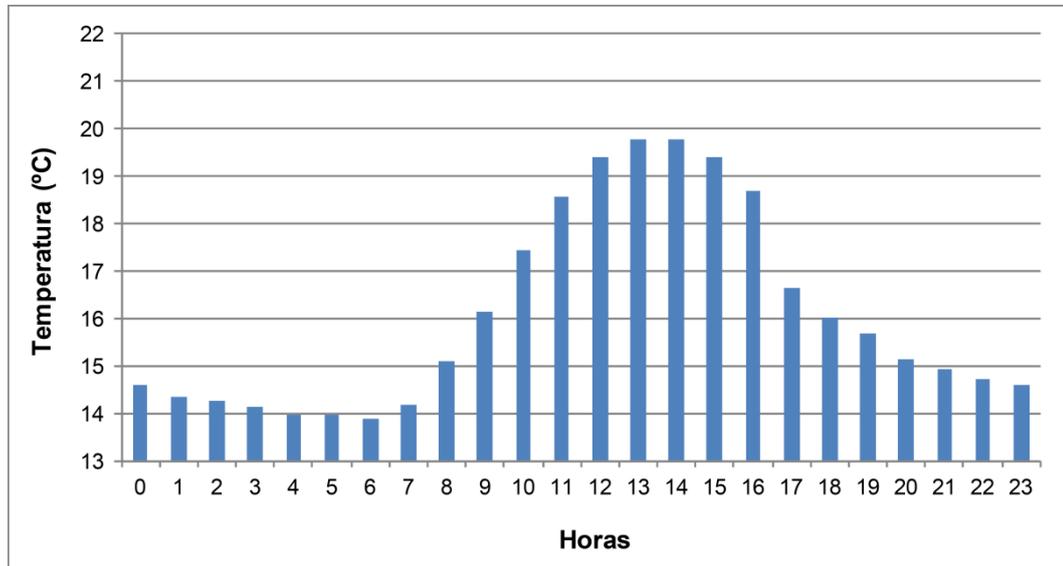


Fuente: Jinzhao / SENAMHI.

En la Figura N° 4-5 se presenta la variación diaria de la temperatura para la estación Pampa del Pongo. Tal como se observa, la variación entre el día y la noche es importante. La temperatura más alta se alcanzó entre las 13:00 h y 14:00

h con un valor de 19,8°C; mientras que la temperatura mínima se registró hacia las 6:00 h.

**Figura N° 4-5. Variación Diaria de la T° Promedio (°C) de la Estación Pampa del Pongo**



Fuente: Jinzhao / SENAMHI.

### ***Precipitación***

Debido a que el Proyecto se encuentra en la región Costa, se empleó información regional de ocho estaciones con altitudes similares a las que se encuentran en el área de estudio ambiental y distribución altitudinal de los componentes. Además, se dispuso de información de dos estaciones locales operadas por Jinzhao Mining Perú, que por su escaso registro pueden ser consideradas como referenciales. Las estaciones utilizadas presentan den altitudes entre 20 y 1823 msnm. Como patrón típico de zonas costeras, se tiene un régimen de precipitación escaso. Las estaciones que se encuentran en el rango de altitud del área del Proyecto no cuentan con periodos amplios de registros continuos. En la Tabla N° 4-8 se presentan las estaciones que se analizaron.

**Tabla N° 4-8. Estaciones Meteorológicas Utilizadas**

Estación	Tipo	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Periodo de Registro
Lomas	CO	15° 34' 06"	74° 51' 06"	20	1999 - 2011
San Juan de Marcona	CO	15° 22'	75° 11'	30	1964 - 1973/1994 - 1997
Yauca	CO	15° 40'	74° 31'	48	1981 - 1982/1988 - 1992
Acari	CO	15° 24'	74° 37'	200	1964 - 1985
Huarato	PLU	15° 17'	74° 34'	353	1964-1967/1969-1985
Copara	CO	14° 58'	74° 54'	600	1964-1966/1971-1988/1993-1995/1999-2011
Chaparra	CO	15° 45'	73° 52'	1 033	2000 - 2011
Otocha	PLU	14° 29'	74° 41'	1 823	1964-1969/1994-1999

CO: Climatológica Ordinaria

PLU: Pluviométrica

Fuente: Jinzhao / SENAMHI

La estación que se encuentra a menor altitud es Lomas (20 msnm), que se encuentra a 20 km al sur de la zona del Proyecto, cercana al litoral. Esta estación cuenta con un registro de 12 años, en los cuales se registro precipitación solo en dos años, en junio y julio (2004 y 2011 respectivamente). La estación San Juan de Marcona (30 msnm) se encuentra a 38 km al este del Proyecto, cuenta con registro total de 13 años, distribuidos en dos periodos, el primero de 1964 a 1973, el segundo de 1994 a 1996. La precipitación se registra en casi todos los años mencionados (excepto 1971), sin embargo, de manera escasa y distribuida en distintos meses del año, es decir, no muestra una tendencia de estacionalidad. La estación Yauca (48 msnm) se encuentra a 45 km al suroeste de la zona del Proyecto, cuenta con un registro de seis años, distribuidos en dos periodos, el primero de un año (1982) y el segundo de cinco años (1988 – 1992). Durante todo este periodo no se registro precipitación. La estación Acari (200 msnm) se encuentra a 21 km al oeste del Proyecto, cuenta con un registro de 22 años continuos. Ante el incremento de altitud en la estación, se puede observar un incremento relativo en la precipitación. Sin embargo, la poca precipitación que ocurre no presenta un patrón y se distribuye con mayor intensidad entre enero, febrero y marzo, con menor intensidad entre mayo, julio, agosto y diciembre, por lo que no se puede definir una estacionalidad de este parámetro. La estación Huarato (353 msnm) se encuentra a 30 km al noroeste del Proyecto, cuenta con un registro de 22 años. La precipitación es continua a lo largo de los años y se distribuye con mayor intensidad de diciembre a febrero, la precipitación entre marzo y noviembre tiene poca variación, con registros inferiores a 1 mm, salvo junio con 1.3 mm.

La estación Copara (600 msnm) se encuentra a 47 km al norte del Proyecto, cuenta con 37 años de registro no continuo. A pesar de que la estación se ubica a 600 msnm, la precipitación es escasa con registros mensuales inferiores a 1 mm, 24 años no presentan precipitación, y en los años donde ocurre, se distribuye desde diciembre a marzo en su mayoría. La estación Chaparra (1033 msnm) se encuentra a 109 km al suroeste del Proyecto, cuenta con 12 años de registro continuo. Presenta precipitación escasa con registros inferiores a 1 mm, y concentrándose durante enero, febrero y marzo. La estación Otoca (1823 msnm) se encuentra a 103 km al norte del Proyecto, cuenta con 11 años de registro separado en dos periodos, el primero de 1964 a 1969 y el segundo de 1995 a 1999. La precipitación presenta mayor estacionalidad, donde el 95% se distribuye de diciembre a marzo, y el resto entre abril, setiembre, octubre y noviembre.

En general, las estaciones que se encuentran debajo de los 300 msnm no presentan una estacionalidad definida. En conjunto, las estaciones más cercanas y representativas para la variación altitudinal del área del Proyecto no presentan un patrón en la distribución espacial y temporal de la precipitación. Debido a la escasa precipitación (en su mayoría inferior a 1 mm, salvo los primeros meses del año) y longitud muestral en las estaciones un análisis de consistencia no reflejaría con confianza la inconsistencia y homogeneidad de los datos.

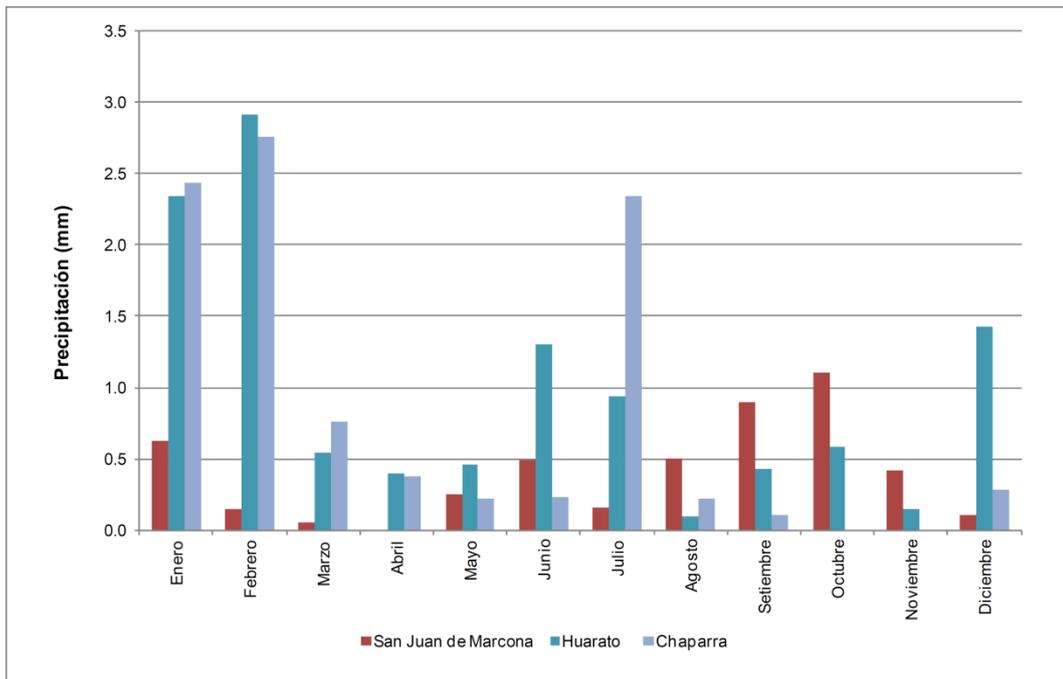
Las estaciones climatológicas y pluviométricas que se utilizaron para el análisis de este parámetro y sus respectivos promedios mensuales se presentan en la Tabla N° 4-9. En las Figura N° 4-6, Figura N° 4-7 y Figura N° 4-8 se presentan la variabilidad mensual de las estaciones, que fueron agrupadas de acuerdo al rango de precipitación para una mejor visualización.

**Tabla N° 4-9. Precipitación Total Mensual Promedio**

Estación	Altitud (msnm)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Lomas	20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,04	0,36	0,0	0,0	0,0	0,0	0,06	<b>0,5</b>
San Juan de Marcona	30	0,6	0,2	0,1	0,0	0,3	0,5	0,2	0,5	0,9	1,1	0,4	0,1	<b>4,8</b>
Yauca	48	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>0,1</b>
Acari	200	0,7	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	<b>1,8</b>
Huarato	353	2,3	2,9	0,5	0,4	0,5	1,3	0,9	0,1	0,4	0,6	0,2	1,4	<b>11,6</b>
Copara	600	0,6	0,7	0,2	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	<b>2,0</b>
Chaparra	1033	2,4	2,8	0,8	0,4	0,2	0,2	2,3	0,2	0,1	0,0	0,0	0,3	<b>9,7</b>
Otoca	1823	34,3	47,8	20,1	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	1,0	2,8	10,4	<b>118,2</b>

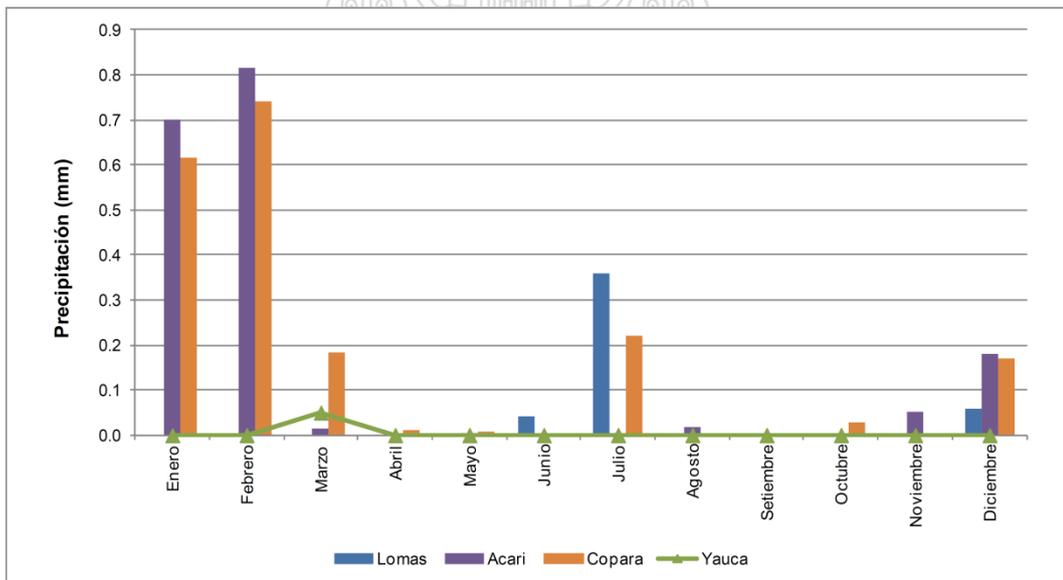
Fuente: SENAMHI

**Figura N° 4-6. Variación Mensual de la Pp Total de las Estaciones San Juan de Marcona, Huarato y Chaparra**



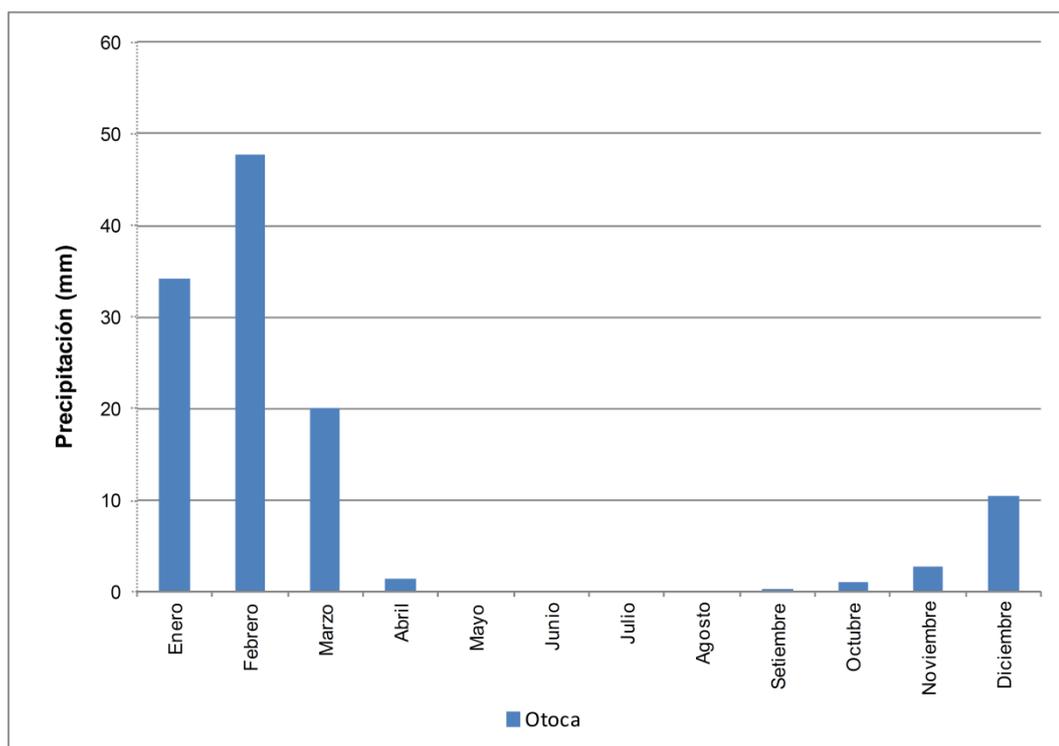
Fuente: Jinzhao / SENAMHI

**Figura N° 4-7. Variación Mensual de la Pp Total de las Estaciones Lomas, Acari, Copara y Yauca**



Fuente: Jinzhao / SENAMHI

**Figura N° 4-8. Variación Mensual de la Pp Total de la Estación Otaca**



Fuente: Jinzhao / SENAMHI

Además de las estaciones regionales, Jinzhao opera dos estaciones meteorológicas locales: Pampa del Pongo y Puerto Lomas, el periodo de registro es escaso (tres y dos años incompletos respectivamente). La Estación Pampa del Pongo presenta mayor precipitación debido a que se encuentra a mayor altitud y distancia del litoral. En general debido a la región en que se ubican las estaciones automáticas, la precipitación registrada es escasa, esto dificulta la lectura de este parámetro.

En la Tabla N° 4-10 se presentan el registro de precipitación total mensual de la estación Pampa del Pongo; en la Tabla N° 4-11, el registro de la estación Lomas; en las Figura N° 4-9 y Figura N° 4-10, las variaciones mensuales.

**Tabla N° 4-10. Pp Total Mensual (mm) – Estación Pampa del Pongo**

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
2011	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	2,54	2,79	0,25	4,32	0,00	1,27	11,2
2012	1,02	0,00	1,02	0,00	0,51	0,51	5,08	2,29	5,08	1,27	0,25	8,13	25,1
2013	0,76	S/D	0,8										

S/D: Sin Dato

Fuente: Jinzhao

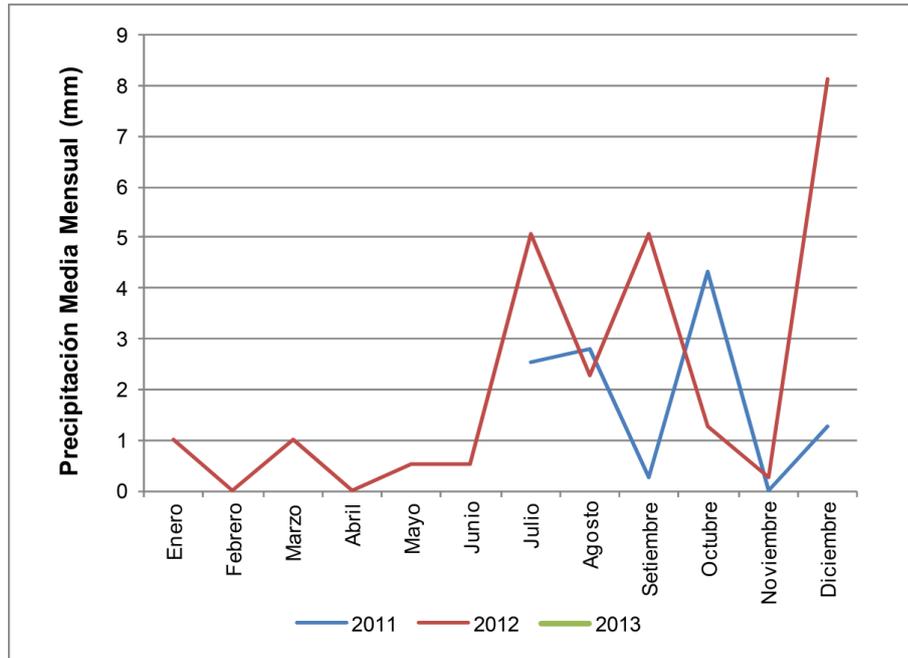
**Tabla N° 4-11. Pp Total Mensual (mm) – Estación Puerto lomas**

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
2012	S/D	S/D	0,3	0,0	0,0	0,3	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	3,0	3,8
2013	0,1	0,1	2,3	S/D	2,4								

S/D: Sin Dato

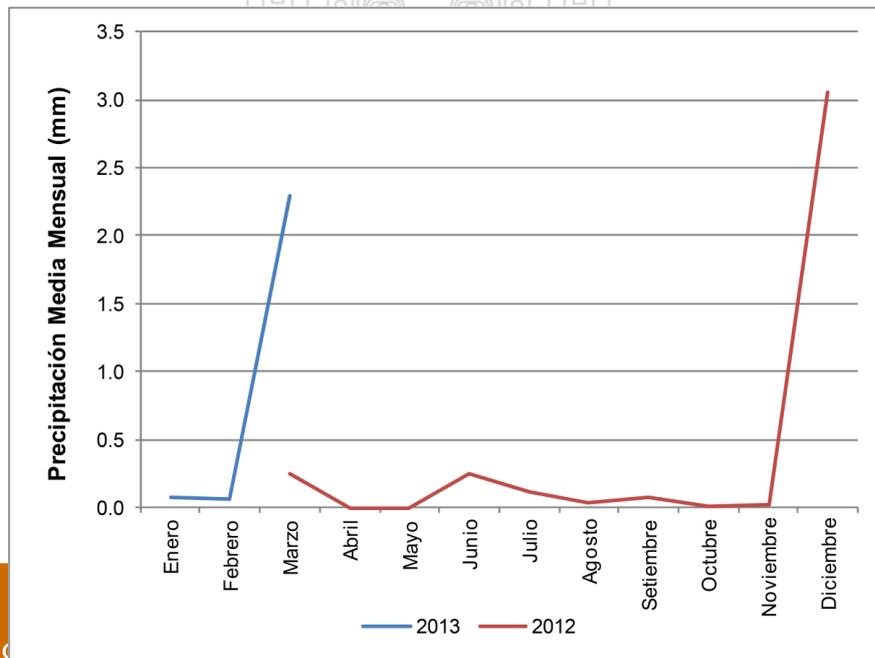
Fuente: Jinzhao

**Figura N° 4-9. Variación Mensual de la Pp Total – Estación Pampa del Pongo**



Fuente: Jinzhao

**Figura N° 4-10. Variación Mensual de la Pp Total – Estación Lomas**



Fuente: Jinzhao

## **Evaporación**

Para el análisis de la evaporación en el área del Proyecto, se emplearon registros históricos de estaciones climatológicas, así como información obtenida del “Atlas de Evaporación del Perú”, elaborado en 1994 por Senamhi. En la Tabla N° 4-12 se presentan las estaciones que se utilizaron para analizar este parámetro.

**Tabla N° 4-12. Estaciones Meteorológicas Utilizadas**

Estación	Tipo	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Periodo de Registro
San Juan de Marcona	CO	15° 22'	75° 11'	30	1970 - 1973
Acari	CO	15° 24'	74° 37'	200	1966 - 1971
San Camilo	CO	14° 05'	75° 43'	398	1972 - 1981
Copara	CO	14° 58'	74° 54'	600	2002 - 2010

CO: Climatológica Ordinaria  
Fuente: SENAMHI; “Atlas de Evaporación de Perú”

Los registros de las estaciones San Juan de Marcona, Acari y Copara fueron obtenidas de Senamhi, los promedios mensuales de la estación San Camilo fueron obtenidos del mencionado Atlas de Evaporación. En la Tabla N° 4-13 se presenta la evaporación total mensual y anual de cada estación, en la Figura N° 4-11 se presenta la variación mensual. Se observa que en general las estaciones presentan un alto índice de evaporación, así mismo, no hay una tendencia que relacione los valores de este parámetro con la altitud en la que se encuentran. Sin embargo se observa que las estaciones que se encuentran bajo los 300 msnm presentan una lámina de evaporación anual menor, debido al clima marítimo dominante en la zona litoral, caracterizada por una mayor humedad relativa y nubosidad, lo que contribuye a la reducción de la evaporación local. A su vez, las estaciones San Camilo y Copara, por estar alejadas del litoral, presentan una mayor tasa de evaporación anual, debido fundamentalmente al tipo de clima continental. En cuanto a la estacionalidad mensual, se observa para todas las estaciones que las mayores tasas de evaporación total mensual se presentan en los meses de diciembre a marzo. En la estación San Juan de Marcona la evaporación varía entre 92 mm y 149,2 mm como valores mínimo (junio) y máximo (marzo). En la estación Acari varía entre 69,6 mm en julio y 137,8 mm en enero. Es decir, en las estaciones más cercanas al litoral la evaporación varía 57 mm y 68 mm entre sus valores máximos y mínimos. En la estación San Camilo la evaporación varía entre

Tesis publicada con autorización en línea  
No olvide citar esta tesis

**UNFV**

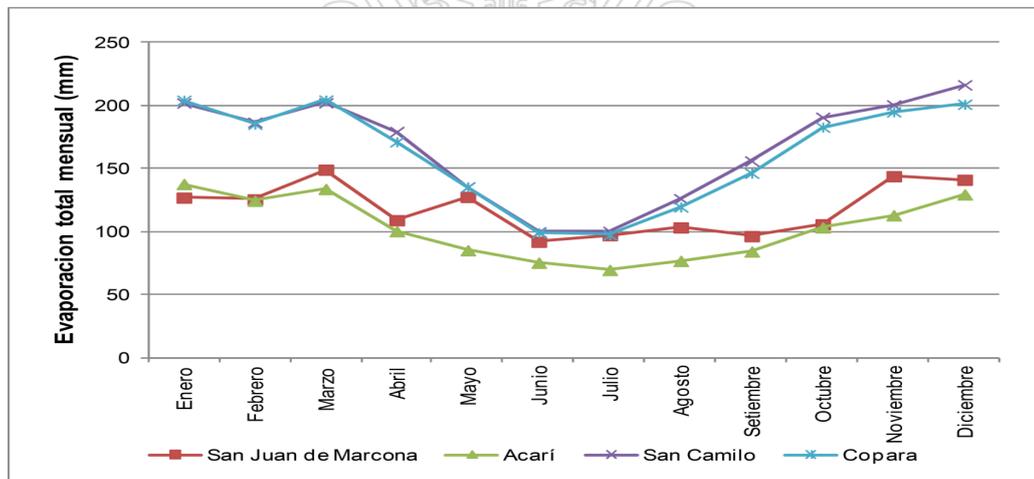
97,5 mm en julio y 204,3 mm en marzo, es decir, en las estaciones más continentales la evaporación varía 116,6 mm y 106,9 mm entre sus valores máximos y mínimos.

**Tabla N° 4-13. Evaporación Total Mensual (mm)**

Estación	Altitud (msnm)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
San Juan de Marcona	30	127,0	125,6	149,2	109,1	127,6	92,0	97,3	103,4	96,5	105,8	144,0	141,2	1418,4
Acari	200	137,8	124,5	133,9	100,3	85,3	75,4	69,6	76,8	84,2	103,3	113,0	129,6	1233,6
San Camilo	398	202,0	186,7	202,2	179,4	135,4	99,8	100,3	126,1	156,0	190,7	200,5	216,4	1995,5
Copara	600	204,2	185,2	204,3	171,3	135,6	99,3	97,5	119,6	146,3	182,8	195,0	201,0	1942,2

Fuente: SENAMHI; "Atlas de Evaporación de Perú".

**Figura N° 4-11. Variación Mensual de la Evaporación (mm)**



Fuente: Jinzhao

### **Clasificación del Clima**

Debido que la zona del proyecto no presenta abundante o constante vegetación durante el año, se desestimó realizar una clasificación del clima mediante la metodología descrita por el Dr. Warren Thornthwaite (1949). La clasificación del clima se realizó según las zonas de vida, para lo cual se recurrió al Mapa Ecológico del Perú (INRENA, 1995).

### **4.2.2 Geología**

La descripción geológica se ha desarrollado sobre la información publicada por INGEMMET en sus boletines correspondientes a los cuadrángulos de San Juan, Acari y Yauca (Boletín N°30, hojas 31-m, 31-n y 32-n), escala 1:100 000 (1978),

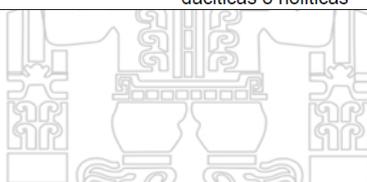
de Hierro de Pampa del Pongo e Informe Geológico de la Campaña de Perforaciones 2012 realizado por BISA (Buenaventura Ingenieros S.A.) (2012) y el informe geológico del Proyecto Minero Pampa del Pongo realizado por SNC-Lavalin (2010). La geología del área de influencia muestra la complejidad geológica de la región litoral, en la cual se ubica el Proyecto, la misma que presenta una topografía típica de la costa peruana, con grandes planicies costeras y pendiente suave, con valles amplios; así mismo zonas de terrazas marinas.

#### **4.2.2.1 Estratigrafía**

La columna estratigráfica del área de influencia está compuesta por formaciones geológicas que datan desde tiempos remotos como el Mesoproterozoico hasta los tiempos recientes del Holoceno. Las rocas están conformadas por paquetes sedimentarios del Jurásico al Cretáceo. El cenozoico se caracteriza geológicamente por estar compuesto de largos periodos e intenso vulcanismo de gran alcance territorial, conjuntamente con intrusiones subvolcanicas. Además, ocurren depósitos cuaternarios de origen marino, aluvial y eólico. La unidad más antiguas corresponde a la Formación litodémica del Complejo Basal de la Costa, sobre el cual en discordancia angular se emplaza el tilloide de la Formación Chiquerio y rocas de la Formación San Juan, a la que suprayacen con discordancia erosional las facies carbonatadas de la Formación Marcona y luego las series volcánicas de la Formación Rio Grande, sobre estas la Formación Jahuay también carbonatada y finalizando el Mesozoico, la Formación Yauca compuesta mayormente por facies pelíticas. El Cenozoico está representado por secuencias siliciclasticas, y comienza con la Formación Pisco, sobre la cual continua los Volcanicos Sencca. También se presentan intrusiones como el Batolito de la Costa, cuya edad se sitúa en el Cretáceo. Finalizando a toda esta serie de unidades geológicas, se encuentran los depósitos del Cuaternario, según el siguiente orden en la base terrazas marinas, sobre estas se encuentran planicies aluviales y finalmente completando el resto de la superficie cuaternaria, todo tipo de geoformas típicas de la actividad depositacional eólica, tales como campos de dunas, barhanes, etc. En la Tabla N° 4-14 se muestran las unidades geológicas identificadas para las áreas de estudio evaluadas, presentándose desde la unidad más antigua hasta la más reciente. Asimismo, en la Figura N° 4-12 se muestra la columna geológica generalizada para el Proyecto. (Ver Anexo 02 Mapas).

**Tabla N° 4-14. Unidades Estratigráficas y Litodémicas**

Unidades Geológicas	Símbolo	Características Principales	Superficie	
			Ha	%
1 Complejo Basal de la Costa	PE-gr, gn	Complejo metamórfico constituido por esquistos, gneis, migmatitas y granitos gneisoides.	49,91	0,10
2 Formación Chiquerío	PE-chi	Tilolide compuesto por conglomerados y paraconglomerados, cuyos litoclastos varían de 3 mm a 30 cm incluyendo bloques de hasta 1 metro.	88,45	0,18
3 Formación San Juan	PE-sj	Unidad compuesta por facies pelítico calcárea, presenta tres miembros, el inferior y el superior constituido por calizas y el miembro medio por lutitas.	11,00	0,02
4 Formación Marcona	P-ma	Secuencia calcárea constituida por estratos de calizas silíceas, niveles de cuarcitas oscuras en capas delgadas, finamente esquistos parcialmente limonizados	394,10	0,78
5 Formación Río Grande	Js-rg	Secuencia volcánica-sedimentaria, cuya base contiene conglomerados basal polimítico, seguido de niveles calcáreos, con abundante presencia de diques de andesita	592,82	1,18
6 Formación Jahuay	Js-ja	Unidad compuesta por un aglomerado volcánico, sus horizontes más inferiores consisten de derrames lávicos con textura brechoide, sus niveles superiores son samítico calcáreas.	238,89	0,48
7 Formación Yauca	Ki-ya	Se compone de lutitas y limolitas, también estratos de arenisca de color claro en estratos gruesos	111,56	0,22
8 Formación Pisco	Ts-pi	En su base contiene areniscas de grano grueso, seguido de bancos de calizas, seguido de areniscas ferruginosas y en su tope diatomitas y horizontes de roca volcánica.	714,40	1,42
9 Volcánico Sencca	Ts-vse	Unidad compuesta principalmente por tufos volcánicos, niveles de igninbritas, todos de composición mayormente dacíticas o riolíticas	20,51	0,04



**“Análisis Numérico del Impacto Físico en las Aguas Subterráneas debido al Desagüe de Mina del Proyecto Minero Pampa del Pongo”**

Unidades Geológicas	Símbolo	Características Principales	Superficie		
			Ha	%	
10	Hipoabisales del Batolito de San Nicolás	Pi-hisn	Distribuidos de manera concéntrica, partiendo de un núcleo de adamelita, granodiorita en su parte intermedia y en la parte marginal diorita y gabro.	17,42	0,03
11	Diorita Acari	KTi-dia	Intrusión más básica y mas occidental del batolito de la costa, presenta diferenciación magmática con tres tipos de diorita	7270,90	14,47
12	Andesita Tunga	Ki-at	Constituido mayormente por diques de composición andesítica, emplazados en fracturas preexistentes en los horizontes sedimentarios precretáceos.	689,46	1,37
13	Microdiorita	Ki-md	Pequeños cuerpos de composición básica distribuidos por toda el área de forma aislada.	104,40	0,21
14	Andesita	Ki-a	Enjambre de diques y sills de composición andesítica, con textura porfídica de grano fino, con fenocristales de hornablenda y plagioclasa.	12,35	0,02
15	Depósitos fluvio-marinos	Q-fm	Conglomerados heterogéneos dentro de una matriz arenácea, intercalados con areniscas y material calcáreo y volcánico.	1908,89	3,80
16	Depósitos aluviales	Q-al	Conglomerados con clastos redondeados y angulosos con matriz areno-limosa, lentes de arenas sucias.	35583,10	70,82
17	Depósitos eólicos	Q-eo	Arenas de mar, limos y minerales de Magnetita e Ilmenita.	2435,30	4,85

**Figura N° 4-12. Columna Geológica Generalizada**

Era	Sistema	Serie	Unidades Estratigráficas		Rocas Intrusivas	
					Plutónicas	Hipabisales
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Depósitos eólicos	Q-eo		
			Depósitos aluviales	Q-al		
		Pleistoceno	Depósitos fluvio-marinos	Q-fm		
	Terciario	Plioceno	Volcánico Sencca	Ts-vse		
		Mioceno	Formación Pisco	Ts-pi		
Mesozoico	Cretáceo	Albiano			Microdiorita (Ki-md)	
					Batolito de la Costa (KTI-dia)	
		Inferior	Formación Yauca	Ki-ya		Andesita Tunga (Ki-at)
	Jurásico	Superior	Formación Jahuay	Js-ja		
			Formación Rio Grande	Js-rg		
Paleozoico	Cámbrico		Formación Marcona	P-ma		Batolito San Nicolás (Pi-hisa)
Proterozoico	Precámbrico		Formación San Juan	PE-sj		
			Formación Chiquerío	PE-chi		
			Complejo Basal de la Costa	PE-gr		
				PE-gn		

Tesis publicada con  
No olvide citar esta

**NFV**

#### **4.2.2.2 Geología Estructural**

##### ***Marco Tectónico***

BISA ha realizado un estudio sobre la geología estructural dentro del área de estudio. El proyecto Pampa del Pongo se encuentra en el borde oriental de la depresión Ica-Nazca y las pampas costeras. La primera se divide en dos dominios tectónicos: Sur y Centro y la segunda, corresponde al dominio Norte (Figura N° 4-13). En el Dominio Norte afloran, principalmente, rocas del Batolito de la Costa y en él se encuentran las vetas de la mina Hierro Acarí, que corresponde a un ambiente termal más profundo que la mineralización de Pampa del Pongo (según el contenido mineralógico observado por F. Tornos, 2012). Más al Este, se encuentran las vetas del proyecto Romerillo: Las principales fallas presentan dirección NW-SE y buzanan, principalmente, al SW. Por lo general estas fallas corresponden a fallas normales cuya cinemática a moldeado la ladera occidental del batolito de la Costa. En el Dominio Centro afloran las Formaciones Marcona, Río Grande, Jahuay y Yauca, cortadas por ocoítas y rocas hipabisales microdioríticas. Todas estas rocas cubiertas por la Formación Pisco. En este dominio, se encuentra la mineralización de Pampa del Pongo. En profundidad mediante las perforaciones, las formaciones señaladas anteriormente descansan sobre la Formación Marcona y esta a su vez, sobre la Formación San Juan y el Complejo Basal de la Costa. En este sector se encuentra una zona compleja de fallas, las cuales han dividido en 5 familias:

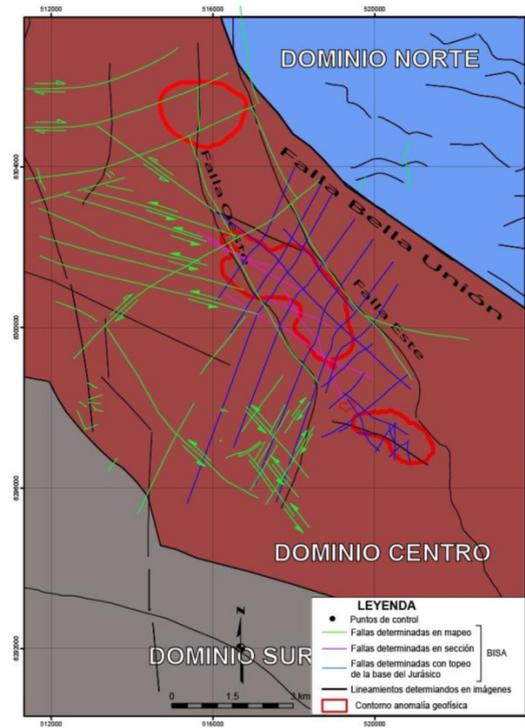
- ⚡ Fallas de dirección NW-SE las cuales corresponden a fallas sinestrales.
- ⚡ Fallas E-W a NEE-SWW, se encuentran en el extremo noreste y corresponden a fallas dextrales
- ⚡ Fallas N-S NNW-SSE, son las que tienen mayor continuidad y se presentan a manera de andenes en la parte central el proyecto Pampa del Pongo, buzanan al NE.
- ⚡ Estas son las fallas principales dentro del proyecto, corresponden a fallas de rumbo con componente normal.
- ⚡ Fallas NE-SW, corresponden a fallas que fueron determinadas mediante el cartografiado y el análisis de la profundidad de la

discordancia de la base del Jurásico. (Ambos métodos realizados por BISA)

- ⚡ Fallas mayores de dirección NW-SE, corresponden a las fallas regionales que cruzan la zona del proyecto, aparentemente buzanan al SW y dividen a los diferentes dominios tectónicos del proyecto Pampa del Pongo. Estas fallas se pueden observar mediante las imágenes de satélite.

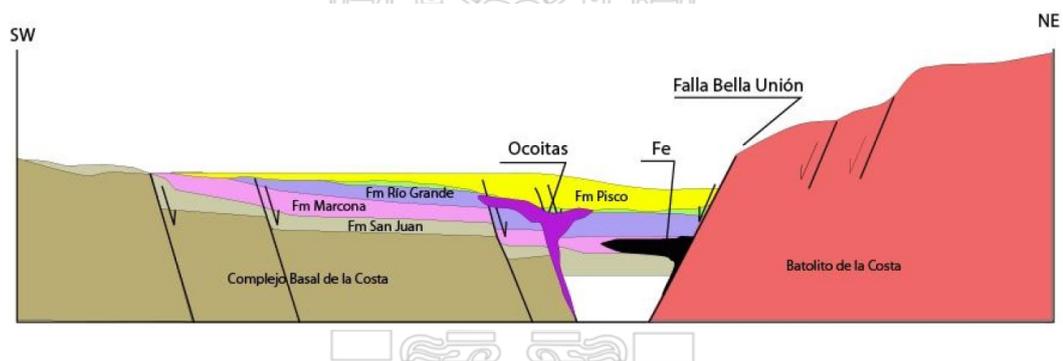
En el Dominio Sur, afloran las rocas más antiguas, las cuales están compuestas por el Complejo Basal de la Costa y la Formación San Juan, estas unidades están cortadas por cuerpos dioríticos y monzoníticos. Dentro de este sector se pueden ver lineamientos de dirección NWW-SEE que pueden corresponder a fallas normales que buzanan al SW que son controlados por fallas normales. En Conclusión, en el Dominio Norte, se encuentra el Batolito de la Costa afectado por fallas normales, en este dominio se encuentran rocas más jóvenes que las de los Dominios Sur y Centro (excepto la Formación Pisco). Mientras que en el Dominio Sur, se encuentran las unidades más antiguas. La disposición de las fallas regionales, los afloramientos de roca más antiguos al sur que al norte y el ambiente termal de la mineralización de Hierro Acarí y Pampa del Pongo sugieren que el límite entre los dominios Centro y Norte están separados por una falla regional, que se le denomina Bella Unión (Caldas, 1978). Esta falla buza al SW y tuvo movimiento normal. En consecuencia, se formó una estructura extensional a manera de un hemigraben, de tal forma que las unidades más antiguas estén aflorando al sur. La formación del hemigraben es posterior al emplazamiento de mineralización.

Figura N° 4-13. Dominios Geotectónicos del área de Estudio



Fuente: BISA

Figura N° 4-14. Sección Geológica Esquemática (Sin Escala) que explica la disposición de las principales estructuras en relación con las unidades geológicas.



Fuente: BISA

### Estructura del Yacimiento Pampa del Pongo

El proyecto Pampa del Pongo está ubicado en la Depresión de Nazca-Ica limitada en el borde oeste de la Cordillera Occidental por la falla Bella Unión, perteneciente al Sistema de Fallas Cerrillos. La naturaleza tectónica en Pampa del

Pongo es distensiva, lo que originó un sistema graben y horts que controlaron la sedimentación de las unidades Meso Cenozoicas.

El cartografiado realizado por BISA, evidenció cinco familias de fallas:

- ⚡ NW-SE, sinestrales;
- ⚡ E-W a NEE-SWW, dextrales,
- ⚡ N-S a NNW-SSE, de rumbo con componente normal;
- ⚡ NE-SW, determinada en base al análisis de la profundidad de la discordancia de la base del Jurásico y
- ⚡ NW-SE, que corresponden a las fallas regionales.

### ***Sistemas Estructurales***

De acuerdo a las orientaciones medidas en las fallas de Pampa del Pongo, estas se pueden dividir en dos familias principales: fallas longitudinales y fallas transversales a la elongación general del yacimiento.

- ✓ Fallas Longitudinales: presentan azimuth N140° y buzamiento superior a 65°E; las fallas son paralelas a la dirección del cuerpo mineralizado y a la traza de las anomalías geofísicas de Pampa del Pongo. Las fallas longitudinales principales se han denominado como fallas Este y Oeste, las mismas que limitan las anomalías geofísicas. En el medio de dichas fallas, se encuentran otras fallas longitudinales de menor jerarquía: a, b, c, d, e, las cuales han modificado la morfología del cuerpo mineral.
- ✓ Fallas Transversales: tienen azimuth aproximado N40° y buzamiento superior a 70°E/W, estas estructuras cortan al cuerpo mineral y a las fallas longitudinales. En las fallas transversales se pueden diferenciar tres sistemas característicos: Norte, Pongo y Sur.

⚡ Sistema Transversal Norte: el cual está compuesto por la falla Norte que limita la zona de brechas con el segmento sur de la Zona 2.

⚡ Sistema Transversal Pongo: se desarrolla en la parte central del yacimiento, cerca del límite sur de la Zona 3. Este sistema está compuesto por tres fallas principales, Pongo 1, Pongo 2 y Pongo 3. Este sistema ha originado una zona de cizalla que separa a la Zona 2-3 de la Zona 4.

⌋ Sistema Transversal Sur: se desarrolla en la parte sur de la Zona 4 y está compuesto por las fallas Sur 1, Sur 2 y Sur 3.

#### **4.2.2.3 Geomorfología y Geodinámica Externa**

La línea base geomorfológica nos proporciona las características del entorno físico del terreno a través del reconocimiento de las formas del relieve actual, las cuales consisten en formas denudativas o zonas degradacionales, es decir áreas donde el proceso geomorfológico dominante es la erosión y zonas acrecionales o agradacionales, es decir áreas donde gobierna la depositación o acumulación de sedimentos o material no litificado (suelos) existente en la zona.

#### ***Unidades Geomorfológicas***

Este capítulo describe el relieve que presenta el área de estudio, así como los procesos erosivos que actualmente están en desarrollo.

El área de evaluación se caracteriza por presentar una morfología suave y ondulada producto de los depósitos cuaternarios agradacionales cuyos sedimentos provienen de los sectores más altos, sobre los 1 600 msnm, donde existen relieves montañosos y geoformas más accidentadas.

En la Tabla N° 4-15 se muestran las unidades geomorfológicas identificadas a través del trabajo de gabinete para las áreas de estudio evaluadas. (*Ver Anexo 02 Mapas*).

**Tabla N° 4-15. Unidades Geomorfológicas Identificadas**

Unidades Geomorfológicas	Símbolo	Superficie	
		Ha	%
1 Cordillera de la Costa	CC	2 060,67	4,10
2 Depresión Preandina	DP	22 747,31	45,27
3 Frente Andino y Valles Transversales	FA-VT	6 678,39	13,29
4 Peneplanicie Pliocénica	PP	1 205,66	2,39
5 Terrazas Marinas	TM	3 330,20	6,62

Fuente: Línea Base Física, Amec 2014.

### ***A. Cordillera de la Costa (CC)***

Está conformada por una cadena de cerros de poca elevación que se extiende en el borde continental de la costa. Litológicamente está constituida por rocas del basamento cristalino y granitos rojos muy antiguos. En el área de estudio se aprecia dos sectores: El sector Noroeste constituido por granitos rosados y el sector Sureste en la que en su arquitectura intervienen granitos rosados, gneises e intrusivos. Posee características totalmente diferentes a las demás unidades geomorfológicas.

En el área de estudio, esta unidad ocupa una superficie de 2060,67 ha, que representa el 4,10% del total.

### ***B. Terrazas Marinas (TM)***

Son plataformas de abrasión marina expuestas por el levantamiento andino. Ocupan la parte suroeste del área evaluada y abarcan una gran extensión. Presentan un relieve escalonado y una topografía poco accidentada. Las terrazas están constituidas de materiales deltaicos re TRABAJADOS y gravas resultantes de erosión marina. Los diversos levantamientos del área debieron ser bastante rápidos para evitar la modificación por la acción marina quedando en tierra firme un relieve escalonado sin mayor destrucción. Su potencial erosivo es casi nulo debido a la extrema aridez del área, pero la deflación y la corrosión se manifiestan en alto grado.

En el área de estudio, esta unidad ocupa una superficie de 14 221,15 ha, que representa el 28,30% del total.

### ***C. Depresión Preandina. (DP)***

Esta penillanura se ubica entre la Cordillera de la Costa y el Frente Andino, limitada por fallas longitudinales con orientación Noroeste y Sureste. Esta gran depresión se encuentra rellena con gravas, arenas marinas y depósitos aluviales, las cuales están relacionadas genéticamente a la Depresión Ica-Nazca. La depresión de Ica-Nazca, corresponde a una depresión estructural ubicada entre las llanuras costeras y las estribaciones de la Cordillera Occidental. La altitud promedio es aproximadamente de 450 msnm. El origen de la depresión es

controlada por la actividad del sistema de fallas Cerrillos. Es así, que los valles de Ica y Nazca representan una depresión tectónica importante rellena por sedimentos gruesos de edad Plio-pleistocena, que alcanzan probablemente los 850 m de grosor (Teves, 1975). Los afloramientos de rocas son aislados, pero en Pampa del Pongo se aprecia que están conformados por dolomías de la Formación Marcona; subyacen en discordancia erosional a rocas volcano sedimentarias del Jurásico (incluyen a las Formaciones Río Grande, Jahuay y Chala) y estos a su vez, subyacen a las areniscas de la Formación Yauca. Cortando a las unidades jurásicas se encuentran ocoítas que también cortan a la mineralización de Pampa del Pongo. Las Depresiones Preandinas presentan una superficie de 22 747,31 ha, que representan el 45,27% del total.

#### ***D. Frente Andino y Valles Transversales (FA)***

Con este nombre se denomina a la superficie de mayor pendiente, comprendida entre la Peneplanicie Pliocénica y la Depresión Preandina, resultado del fallamiento longitudinal a lo largo del borde del Frente Andino y de la disección transversal ocasionada por los ríos y quebradas que bajan del macizo andino. El socavamiento de los cursos de agua se desarrolló durante la desglaciación del Pleistoceno, dotando a las corrientes de un vigoroso poder erosivo. Posteriormente, en una época lluviosa, la erosión fluvial se hizo activa y dio como resultado el desarrollo de una intrincada red dendrítica que disectan los flancos de los valles principales. El Frente Andino es una superficie irregular de tendencia general N 45°O, e inclinada al oeste, donde los valles transversales lo cortan con secciones típicas en “V” y con una dirección promedio de N30°E, siendo las principales las de Acarí y la quebrada Jahuay.

Los valles transversales tienen presencia con una extensión de 6 678,39 ha, que representa el 13,29% del total.

#### ***E. Peneplanicie Pliocénica (PP)***

Sobre las estribaciones andinas se ha elaborado una superficie de peneplanización por abrasión, la que actualmente se encuentra disectada por los cañones del río Acarí y la quebrada Jahuay y sus respectivos afluentes. Este rasgo geomórfico sobresale como una especie de repisa, su característica es su leve inclinación hacia

el occidente, siendo más notoria al oeste conformado por conglomerados y areniscas con fósiles marinos, lo que atestiguan la abrasión marina. La peneplanicie pliocena constituye una superficie de 1205,66 ha, que representa el 2,39% del total.

### ***Geodinámica Externa***

La geodinámica externa, comprende aquellos procesos que además de ser procesos geomorfológicos, es decir causantes del modelado de la superficie, implican además movimientos de masas, en pequeñas cantidades o en cantidades considerables, en cuyo caso poseen el potencial de causar daños a las personas, a los animales, a las instalaciones, a los sembríos, a la propiedad, a los bienes y servicios en general. En el área de estudio ha sido posible identificar la presencia de algunos procesos geodinámicos externos, a continuación se efectúa una breve descripción para un mejor conocimiento de cada uno de ellos, de acuerdo a la geomorfología y topografía. *(Ver Anexo 02 Mapas).*

#### ***A. Erosión de Laderas (E-Ld)***

Este tipo de proceso se aprecia al noreste del Proyecto, las mismas que están influenciadas por la presencia de una red de quebradas como La Muña, Pongo, Llucyuca y otros. Estas quebradas se encuentran disectando las laderas del Frente Andino, forman una serie de valles transversales de fuerte pendiente, las mismas que podrían ocasionar huaycos y caída de flujos de detritos, en épocas de fuertes precipitaciones pluviales.

#### ***B. Erosión de Riberas (E-Rv)***

La erosión de riveras se considera un peligro geo-hidroológico, pues intervienen en su proceso tanto la morfología del valle fluvial, pendiente y ancho de cauce, naturaleza de los suelos o rocas en sus márgenes, etc., así como factores hidroológicos que afectan los regímenes de descarga o avenidas en un corto periodo, de los principales drenajes del área. Las características de este tipo de proceso son el incremento del caudal del río en periodos de máximas avenidas como es el caso en temporadas de lluvias ya sea ordinarias (diciembre a marzo) o

Tesis publicada con autorización del autor.  
No olvide citar esta tesis

**UNFV**

quebradas La Encañonada, Jahuay y Lomas, Los Colorados, La Muña, Pongo y Sacaco, y otros de menor envergadura los cuales están delimitados en un plano.

### **C. Geodinámica Eólica (E-Eo)**

Este tipo de procesos se caracterizan por presentarse en ambientes desérticos, por su extrema aridez y siendo el viento el agente principal de erosión, cuya eficacia depende de la velocidad; esto, principalmente en épocas de invierno, donde los vientos soplan cargados de neblina y arena ocasionando significativos procesos de deflación y corrosión. Los procesos de erosión eólica (arenamientos), encontrados en el área, están asociados preferentemente a zonas de morfología plana como las Pampas de Pongo. Su presencia depende de la dinámica eólica existente, de la dirección y velocidad del viento y de la geomorfología del área. Se presentan como acumulaciones de mantos de arenas en forma de lomas, dunas y barcanas. Influyen principalmente en la obstrucción de algunas áreas de tráfico o tránsito de caminos y trochas.

#### **4.2.3 Hidrología**

Identificación de Cursos de Agua en el Área del Proyecto De acuerdo a la información proporcionada por Jinzhao Mining Perú (JMP), durante julio 2010 y agosto 2012 se realizaron dos campañas de monitoreos de caudales. De los cursos de agua identificados en el área del Proyecto, durante el trabajo de campo, solo se encontró caudal en un afloramiento próximo a la quebrada Jahuay. En mayo 2012 JMP realizó un inventario de fuentes de agua relevantes (realizado por Aleph Asociados) y con influencia directa sobre las actividades de exploración del Proyecto. En dicha tarea se identificaron 47 quebradas que se encuentran enmarcadas dentro de la subcuenca Sacaco, y la quebrada Jahuay. Durante esta campaña se constató que las quebradas permanecen inactivas (secas), es decir, no se observó la presencia de escorrentía superficial, así mismo se verificó la presencia de caudal ocasional en el afloramiento denominado Paraíso ubicado en las cercanías de la quebrada Jahuay. Durante abril del 2013 AMEC realizó la campaña de muestreo de calidad de agua, y como parte de la tarea y complemento de la campaña realizada en 2012, se identificó cursos de agua en el área del proyecto y se verificó que no hay presencia de flujos. En la Tabla N° 4-16 se

presenta el inventario realizado en mayo 2012. La campaña de julio 2010, agosto 2012 y abril 2013 se presentan en la Tabla N° 4-17 y Tabla N° 4-18. *(Ver Anexo 02 Mapas).*

**Tabla N° 4-16. Inventario de Quebradas – Mayo 2012**

Código	Coordenadas UTM - WGS84 Zona 18 Sur		Caudal (l/s)
	Este	Norte	
QA-01	523 745	8 312 058	--
QA-02	523 528	8 311 385	--
QA-03	523 415	8 310 168	--
QA-04	523 090	8 309 796	--
QA-05	526 813	8 311 743	--
QA-06	526 659	8 312 270	--
QA-07	527 669	8 310 025	--
QA-08	527 746	8 311 122	--
QA-09	528 505	8 312 715	--
QA-10	530 001	8 311 831	--
QA-11	530 603	8 310 126	--
QA-12	530 475	8 308 974	--
QA-13	531 453	8 308 143	--
QA-14	530 892	8 306 750	--
QA-15	525 351	8 309 707	--
QA-16	527 082	8 307 452	--
QA-17	526 111	8 307 163	--
QA-18	520 960	8 311 290	--
QA-19	517 781	8 311 523	--
QA-20	516 492	8 309 890	--
QA-21	517 376	8 308 417	--
QA-22	518 429	8 305 858	--
QA-23	519 306	8 304 299	--
QA-24	519 180	8 302 504	--
QA-25	519 562	8 302 180	--
QA-26	520 532	8 302 088	--
QA-27	520 617	8 301 245	--
QA-28	521 298	8 305 491	--
QA-29	521 688	8 306 963	--
QA-30	524 382	8 305 974	--
QA-31	524 598	8 306 439	--
QA-32	522 522	8 302 467	--
QA-33	526 333	8 299 608	--
QA-34	525 191	8 299 803	--
QA-35	525 148	8 303 103	--
QA-36	525 465	8 304 908	--
QA-37	527 070	8 303 214	--
QA-38	522 723	8 299 251	--
QA-39	527 023	8 302 824	--
QA-40	511 447	8 304 157	--
QA-41	529 084	8 310 637	--

**“Análisis Numérico del Impacto Físico en las Aguas Subterráneas debido al Desagüe de Mina del Proyecto Minero Pampa del Pongo”**

Código	Coordenadas UTM - WGS84 Zona 18 Sur		Caudal (l/s)
	Este	Norte	
QA-42	520 345	8 302 676	--
QA-43	523 421	8 303 880	--
QA-44	516 056	8 309 461	--
QA-45	526 572	8 309 645	--
QA-46	524 992	8 301 926	--
QA-47	521 613	8 299 015	--
QA-48	513 222	8 297 020	0.12

Fuente: Estudio Hidrogeológico del Proyecto Pampa del Pongo, Aleph Asociados S.A.C, 2012.  
(--) no se identificó flujo en el curso inventariado.

**Tabla N° 4-17. Campañas de Aforos durante Julio 2010 y Agosto 2012**

Estación	Cuerpo de Agua	Coordenadas UTM WGS84		Altitud msnm	Caudal (L/s)		Observaciones
		Este	Norte		Julio 2010	Agosto 2012	
A-1	Río Acarí	542 450	8 295 966	197	S/D	132,5	Aguas arriba del poblado de Acarí
H-02	Río Acarí	541 465	8 294 377	170	91,5	S/D	Altura del poblado de Acarí
A-2	Río Acarí	540 158	8 289 248	122	S/D	43	Aguas abajo del poblado de Acarí
A-3	Río Acarí	539 016	8 272 120	15	S/D	289,4	Bocatoma Chaviña
H-03	Qda. Los Colorados	515 767	8 310 526	546	S/D	S/D	Aguas arriba del tajo proyectado
H-04	Qda. Los Colorados	518 991	8 301 368	389	S/D	S/D	Altura del tajo proyectado
H-05	Qda. Llucyuca	521 583	8 300 687	396	S/D	S/D	Aguas arriba de confluencia con Qda. Pongo
H-06	Qda. Mastuerzo Chico	524 379	8 301 078	473	S/D	S/D	Aguas arriba de confluencia con Qda. Pongo
H-07	Qda. Batidero	526 621	8 301 187	564	S/D	S/D	Aguas arriba de confluencia con Qda. Pongo
H-08	Qda. Pongo	525 878	8 287 758	143	S/D	S/D	Aguas abajo del tajo y desmontera proyectadas
H-09	Qda. Caracoles	529 415	8 286 695	180	S/D	S/D	Aguas arriba de confluencia con Qda. Pongo
H-10	Qda. Sacaco	526 337	8 277 000	10	S/D	S/D	Desembocadura
H-11	Qda. Jahuay	511 066	8 305 794	429	S/D	S/D	Aguas arriba de desmontes proyectado
A-4	Qda. Jahuay	514 036	8 295 833	232	S/D	S/D	Cerca al afloramiento.
H-12	Qda. Jahuay	514 013	8 295 821	259	0,25	S/D	Afloramiento
H-13	Qda. Lomas	517 335	8 284 941	89	S/D	S/D	Cruce Carretera Panamericana
H-14	Qda. Lomas	518 289	8 278 858	5	S/D	S/D	Desembocadura
H-15	Qda. La Encañada	509 982	8 294 629	300	S/D	S/D	Quebrada S/N a lado de la carretera hacia San Juan de Marcona

Fuente: Línea Base Física, SNC Lavalin, 2012.  
S/D: Sin Dato, ya sea porque no se encontró caudal o no fue posible su medición.

**Tabla N° 4-18. Campaña de Aforos AMEC**

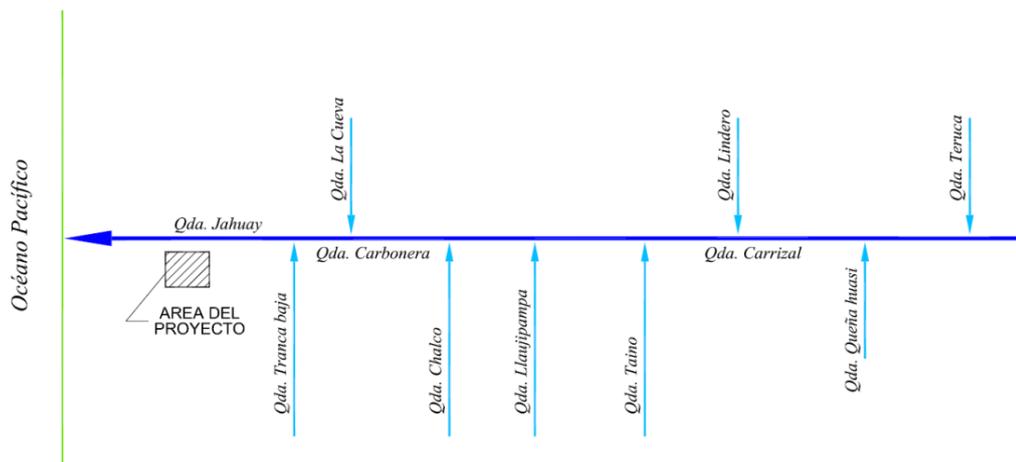
Estación	Coordenadas UTM WGS84		Altitud (msnm)	Caudal (L/s)	Observaciones
	Este	Norte			
AC-QS-01	544 043	8 302 739	309	S/F	Quebrada seca en la margen derecha del río Acarí a la altura de la Qda. El Puente
AC-QS-02	544 059	8 302 350	307	S/F	Quebrada seca en la margen derecha del río Acarí a la altura de la Qda. El Puente
AC-QS-03	544 042	8 302 210	302	S/F	Quebrada seca en la margen derecha del río Acarí a la altura de la Qda. El Puente
AC-QS-04	543 988	8 302 021	293	S/F	Quebrada seca en la margen derecha del río Acarí a la altura de la Qda. El Puente
AC-QS-05	542 730	8 298 764	230	S/F	Quebrada seca en la margen derecha del río Acarí a la altura de la Qda. Los Caracoles
AC-QS-06	542 556	8 298 225	221	S/F	Quebrada seca en la margen derecha del río Acarí a la altura de la Qda. Los Caracoles
AC-QS-07	512 437	8 301 216	377	S/F	Quebrada Jahuay, próximo a acceso
AC-QS-08	513 220	8 297 026	244	S/F	Aguas abajo del punto AC-QS-12, a la altura del tajo
AC-QS-09	544 573	8 305 349	289	S/F	Bocatoma "La Joya"
AC-QS-10	520 726	8 302 493	498	S/F	Quebrada afluente por la margen izquierda a la Qda. Pongo, a la altura del campamento actual
AC-QS-11	522 648	8 295 893	280	S/F	Quebrada Sacaco.
AF-01	513 220	8 297 025	244	S/F	Afloramiento en la margen derecha de la Qda. Jahuay, a la altura del tajo
SW-PP-01	534 904	8 290 627	198	590	Canal para riego en la margen izquierda del río Acarí, en Bella Unión

Fuente: AMEC (Perú), 2013.  
S/F: Sin Flujo

#### 4.2.3.1 Descripción Hidrográfica

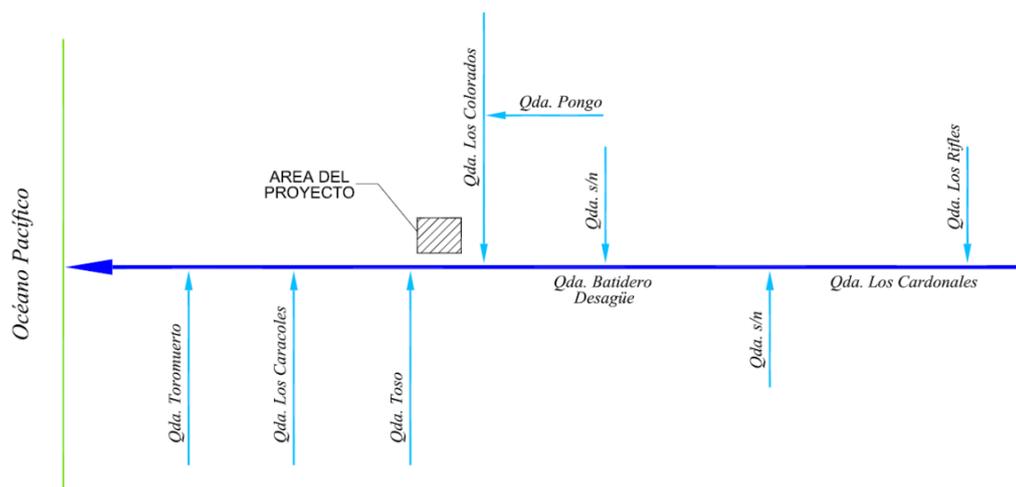
Hidrográficamente, los principales componentes del proyecto minero Pampa del Pongo se ubican en las subcuencas de la quebrada Jahuay y quebrada Sacaco, ambas se encuentran en la intercuenca de los ríos Grande y Acarí. Debido a que el Proyecto se encuentra en la franja costera del país, los cursos de agua permanentes son escasos. Todos los cauces de los cuerpos de agua mencionados desembocan de forma independiente al Océano Pacífico. En la Figura N° 4-15 y la Figura N° 4-16 se presenta el diagrama hídrico de las subcuencas de las quebradas Jahuay y Sacaco.

Figura N° 4-15. Diagrama Hídrico – Subcuenca Jahuay



Fuente: Línea Base Física, Amec 2014.

Figura N° 4-16. Diagrama Hídrico – Subcuenca Sacaco



### ***Descripción Morfológica de las Subcuencas***

El Proyecto se emplaza en las subcuencas de las quebradas Jahuay y Sacaco, las mismas que tienen su origen en la zona alta de la intercuenca de los ríos Grande y Yauca (denominado Acarí aguas abajo), de acuerdo a la clasificación de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), la intercuenca de estos ríos se denomina Intercuenca 13719, cuya área total es de 3 407 km<sup>2</sup>, perteneciente a la vertiente del Océano Pacífico. (*Ver Anexo 02 Mapas*). El análisis morfológico de las subcuencas permite determinar características físicas como tamaño, forma, características relativas a la red hidrográfica como pendiente de cauce, respuesta ante crecidas, entre otras. Este análisis se realizó para las subcuencas Jahuay y Sacaco.

En la subcuenca de la quebrada Jahuay la longitud del curso principal tiene aproximadamente 128 km desde la naciente de la quebrada hasta su desembocadura, con una pendiente de 0,03 m/m. El área de drenaje de la subcuenca Jahuay es de 1 350,9 km<sup>2</sup>, la cota máxima es 4 100 msnm, la cota mínima es 0 msnm y la altitud media es de 1 590 msnm. El factor de forma de la subcuenca tiene un valor de 0,08, lo cual nos indica que la subcuenca es de forma alargada con respecto al cauce y tiene pocas posibilidades de producir crecientes con mayores caudales, pues su coeficiente de compacidad es 2,39.

En la subcuenca de la quebrada Sacaco la longitud del curso principal tiene aproximadamente 49,2 km desde la naciente hasta su desembocadura, con una pendiente de 0,03. El área de drenaje de la subcuenca es 633 km<sup>2</sup>, la cota máxima es 2 000 msnm, la cota mínima es 0 msnm y la altitud media es 628 msnm. El factor de forma de la subcuenca tiene un valor de 0,26, lo cual nos indica que la subcuenca es de forma oblonga con respecto al cauce y tiene menos posibilidades de producir crecientes con mayores caudales, pues su coeficiente de compacidad es 1,22.

### ***Selección de Estaciones Hidrométricas y Pluviométricas***

Debido a que el área de estudio se encuentra en una intercuenca, se seleccionaron estaciones pluviométricas e hidrométricas ubicadas en las cuencas vecinas (ríos Acarí y Grande) de acuerdo a los siguientes criterios:

- ✓ Para la caracterización pluviométrica a nivel de subcuenca, las estaciones deberían encontrarse a altitudes entre 0 y 4000 msnm.
- ✓ Para la caracterización pluviométrica del área del Proyecto, las estaciones deberían encontrarse a altitudes entre 100 y 1000 msnm, esta caracterización se realizó en la sección 3.3.1 Meteorología, Clima y Zonas de Vida.
- ✓ Estaciones hidrométricas ubicadas en el río Acarí, pues si bien este río se encuentra en una cuenca vecina, está cercano al Proyecto.
- ✓ Ubicadas dentro de un radio de 50 km considerando como centro el área del Proyecto.

La longitud de registro constituyó una de las mayores dificultades en cuanto a la selección de estaciones, ya que la mayoría de las ubicadas en la región costa suelen contar con escaso registro, o están paralizadas.

La información pluviométrica se recopiló de estaciones convencionales administradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Para las condiciones pluviométricas locales se recurrió a las estaciones automáticas Pampa del Pongo y Punta Lomas, ambas ubicadas dentro del AEA del Proyecto y operadas por Jinzhao Mining.

La información hidrométrica corresponde a los registros de la estación Bella Unión, la cual se obtuvo del estudio de Línea Base Ambiental y Social realizado por SNC Lavalin en 2012, este a su vez recopiló la información del Estudio Hidrológico de la Cuenca del Río Acarí, elaborado en 2004 por el Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA) y la Administración Técnica de Distrito de Riego Acarí-Yauca- Puquio (ATDR Acarí-Yauca-Puquio).

La información descriptiva sobre las estaciones pluviométricas utilizadas se presenta en la Tabla N° 4-19, y la estación hidrométrica Bella Unión en la Tabla N° 4-20.

**Tabla N° 4-19. Estaciones Pluviométricas Regionales**

Estación	Tipo	Estado	Coordenadas UTM Zona 18		Altitud msnm	Periodo de Registro
			Este	Norte		
San Pedro de Ceccha	PLU	I	596 864	8 367 288	3 097	1964 - 1985/1988 - 1999
Puquio	CO	O	593 545	8 374 798	3 215	1964 - 1991/1993 - 2011
Chaviña	CO	I	625 443	8 343 187	3 310	1964 - 1981
Lucanas	PLU	O	582 688	8 383 563	3 340	1964 - 2011
Cecchapampa	CO	P	607 595	8 359 868	3 900	1967 - 1982
Pampa Galeras	CO	O	564 604	8 378 456	3 950	1964 - 2011

Fuente: Línea Base Socio Ambiental del Proyecto Minero Pampa de Pongo  
 CO: Climatológica Ordinaria  
 PLU: Pluviométrica  
 O: Operativa  
 I: Inoperativa

**Tabla N° 4-20. Estación Hidrométrica Bella Unión**

Estación	Tipo	Estado	Coordenadas UTM Zona 18		Altitud msnm	Periodo de Registro
			Este	Norte		
Bella Unión	HM	O	539 306	8 291 837	270	1948 - 2002

Fuente: Línea Base Socio Ambiental del Proyecto Minero Pampa de Pongo  
 HM: Hidrométrica  
 O: Operativa

#### 4.2.3.2 Descargas Medias

En la zona del Proyecto no se observa presencia de aguas superficiales, excepto en la quebrada Jahuay, donde se presentan eventuales caudales de escasa duración durante años húmedos, producto de las precipitaciones que se presentan eventualmente.

##### *A. Precipitación Media en las Subcuencas*

En la sección de Meteorología y Clima, se analizó la precipitación media para el área del Proyecto, de la cual se infirió que la escasez de este parámetro no permite la generación de escorrentía superficial.

De acuerdo al “Estudio Integral de los Recursos Hídricos en la cuenca de los ríos Acarí y Yauca”<sup>1</sup>, desde el punto de vista meteorológico se puede denominar “cuenca seca” el área que comprende el litoral marino y la costa que varía entre 2800 y 3000 msnm, siendo sus precipitación entre 0 y 250 mm, por lo que esta área no cuenta con escorrentía superficial y su aporte efectivo hacia el caudal de los ríos es prácticamente nulo. El otro sector, denominado “cuenca húmeda”, comprendido entre el límite superior de la “cuenca seca” y la divisoria de aguas, varía sus parámetros pluviales entre 250 mm y alrededor de 700 mm constituyéndose de esta manera en el área de aporte de escorrentía superficial.

La altitud máxima de la subcuenca Sacaco es 2000 msnm, manteniéndose en el sector de cuenca seca, la altitud máxima de la subcuenca Jahuay es 4000 msnm, por lo que el análisis de la precipitación se realizará para la última. Ya que la subcuenca Jahuay se encuentran próxima a la cuenca Acarí, además considerando su cercanía y similitud, se infiere que el comportamiento de la escorrentía en estas subcuencas es similar a la de la cuenca Acarí. De acuerdo a la información pluviométrica de estaciones ubicadas entre los 3000 y 4000 msnm, se observa que el comportamiento de la precipitación es del tipo andino, es decir que las lluvias más intensas se presentan en verano, para luego decaer durante los meses más fríos (junio, julio, agosto). La precipitación media de las estaciones San Pedro de Ceccha, Puquio, Chaviña, Lucanas, Cecchapampa y Pampa Galeras se presenta en la Tabla N° 4-21, en la Figura N° 4-17 se observa la correlación entre la altitud de las estaciones y sus respectivas precipitación anuales.

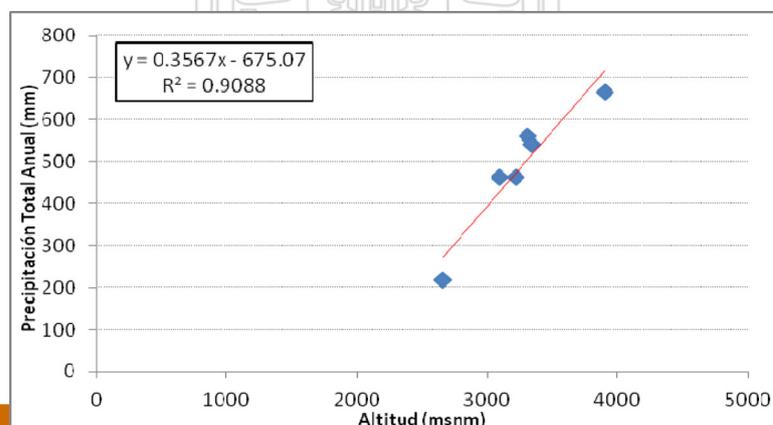
En la Tabla N° 4-22, se presentan la precipitación para 3 500 msnm (altitud media en el sector de “cuenca húmeda”) según la relación altitud – precipitación.

**Tabla N° 4-21. Pp Media Mensual (mm)**

Estación	Altitud (msnm)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Ocaña	2 660	48,9	70,8	66,2	11,7	0,3	0,3	0,2	0,5	0,4	2,3	3,5	14,0	219,1
San Pedro de Ceccha	3 097	85,1	90,3	103,6	41,8	23,9	9,8	5,8	11,9	14,1	14,0	21,7	41,7	463,8
Puquio	3 215	98,5	107,8	101,3	20,2	4,6	1,1	2,9	3,6	5,5	6,3	12,4	37,1	401,3
Chaviña	3 310	121,4	149,1	161,8	33,8	5,4	0,9	1,0	3,9	11,1	13,2	11,3	46,6	559,5
Lucanas	3 340	121,0	144,5	135,6	35,5	5,5	1,3	3,1	5,5	8,0	12,9	16,6	52,1	541,5
Cecchapampa	3 900	140,7	165,7	204,7	42,0	5,4	1,1	1,9	4,7	14,8	14,1	16,7	53,9	665,6

Fuente: Línea Base Física, Amec 2014.

**Figura N° 4-17. Correlación Precipitación - Altitud**



**Tabla N° 4-22. Pp Media a 3500 msnm**

Altitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
3 500	128,1	153,0	143,6	37,6	5,8	1,3	3,2	5,8	8,5	13,6	17,5	55,1	573,4

Fuente: Línea Base Física, Amec 2014.

**B. Escorrentía Media Mensual**

La ocurrencia de precipitación y por lo tanto la producción de escorrentía se produce en el sector húmedo de la cuenca. La subcuenca Jahuay presenta este sector en la parte alta, sin embargo, en el área del Proyecto no se observa la presencia de aguas superficiales, por lo que se infiere que la escorrentía se infiltra antes de llegar al sector de cuenca seca.

Como se mencionó, en el área del Proyecto no se observa escorrentía superficial, sin embargo, se analizaron los datos hidrométricos de la estación Bella Unión por tratarse de la fuente hídrica más cercana a la zona del Proyecto, en dicha estación se registran los caudales del río Acarí.

La estación Bella Unión dispone de registros del periodo 1960-2002, resultantes de la medición de los caudales diarios captados en la bocatoma La Joya y derivados hacia el sector Bella Unión. Actualmente las mediciones están a cargo de la Autoridad Local del Agua Acarí. Se estima que la descarga media anual del río Acarí asciende a 13 m<sup>3</sup>/s.

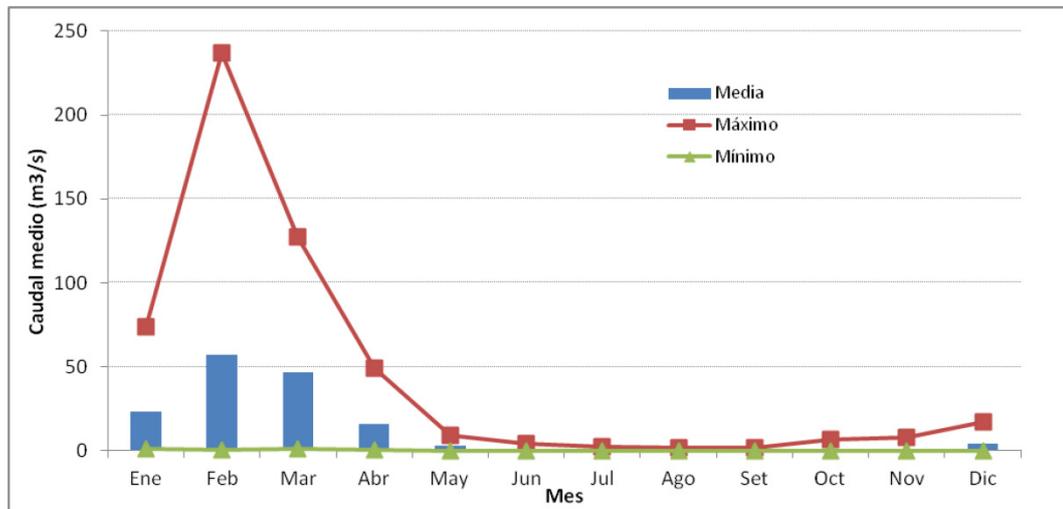
Durante la estación verano (diciembre – marzo) el río Acarí aporta una descarga media de 32 m<sup>3</sup>/s, mientras que el resto del año los aportes solo ascienden a 3 m<sup>3</sup>/s. En la Tabla N° 4-23 se presenta los valores mensuales y en la Figura N° 4-18 la variación mensual de los caudales medios.

**Tabla N° 4-23. Caudales Medios Mensuales (m<sup>3</sup>/s) – Estación Bella Unión**

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Promedio Anual
Caudal medio	23,5	56,9	46,7	15,8	3,3	1,3	0,9	0,7	0,6	0,7	1,2	4,0	13,0
Máx.	73,9	237,2	127,2	49,3	8,9	4,4	2,4	1,5	1,8	7,0	7,9	17,3	44,9
Mín.	1,0	0,5	0,9	0,4	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,3

Fuente: Línea Base Física, Amec 2014.

**Figura N° 4-18. Variación Mensual de los Caudales Medios (m<sup>3</sup>/s) Estación Bella Unión**



Fuente: Línea Base Física, Amec 2014.

#### 4.2.3.3 Descargas Máximas

##### A. Análisis de la Precipitación Máxima en 24 horas

Es conocida la escasa precipitación en la zona del Proyecto, sin embargo, la ocurrencia de precipitaciones intensas podrían originar eventuales descargas superficiales. Para este análisis se utilizaron los registros de las estaciones San Juan de Marcona y Chaparra. Los registros de la estación San Juan de Marcona pueden considerarse representativos del área próxima al litoral. La estación Chaparra se puede considerar representativa para la zona más alta del área de estudio.

La estación Chaparra cuenta con 30 años de datos, mientras que la estación San Juan de Marcona cuenta con cuatro años de información de SENAMHI, la información adicional fue proporcionada por JMP (del estudio de Línea Base Física realizado por SNC Lavalin, 2013).

Los datos de las estaciones mencionadas fueron corregidos de acuerdo a las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial, con un factor de 1.13. En las Tabla N° 4-24 y Tabla N° 4-25 se presentan los datos corregidos.

**Tabla N° 4-24. Pp max. En 24h – Estación San Juan de Marcona**

Año Hidrológico		Precipitación Máxima (mm)	
		Histórica	Corregida
1965	1966	6,6	7,5
1970	1971	0	0,0
1971	1972	0,9	1,0
1972	1973	2,3	2,6
1973	1974	1,1	1,2
1974	1975	1,7	1,9
1975	1976	0,1	0,1
1977	1978	1	1,1
1982	1983	1	1,1
1986	1987	1	1,1
1988	1989	0,2	0,2
1991	1992	0	0,0
1992	1993	0	0,0
1993	1994	3	3,4
1994	1995	0	0,0
1997	1998	3	3,4

Fuente: Línea Base Social y Ambiental, SNC Lavalin 2012.

**Tabla N° 4-25. Pp max. en 24h – Estación Chaparra**

Año	Precipitación Máxima (mm)	
	Histórica	Corregida
1965	5,5	6,2
1966	0	0,0
1967	2,9	3,3
1968	6,9	7,8
1969	8,6	9,7
1970	2,2	2,5
1971	0,2	0,2
1972	5	5,7
1973	3,6	4,1
1974	1,3	1,5
1975	3,2	3,6
1976	6	6,8
1977	0,4	0,5
1978	0	0,0
1979	0	0,0
1980	0	0,0
1981	0	0,0
2000	1,3	1,5
2001	1,3	1,5
2002	6,5	7,3
2003	1,2	1,4
2004	14	15,8
2005	4,5	5,1
2006	1,1	1,2
2007	2	2,3
2008	3,4	3,8
2009	2	2,3
2010	0,5	0,6
2011	1,2	1,4
2012	10,2	11,5

Fuente: Senamhi.

## B. Prueba de Bondad y Ajuste

Para estimar la precipitación máxima en 24 horas para distintos tiempos de retorno, los datos fueron sometidos a la prueba de bondad de ajuste (Kolmogorov-Smirnov) para las distribuciones estadísticas más usadas en hidrología tales como la Normal, Log normal, Pearson III, Log Pearson III y Gumbel. Los resultados presentan en la Tabla N° 4-26 para la estación San Juan de Marcona y en la Tabla N° 4-27 para la estación Chaparra.

**Tabla N° 4-26. Resultados de la Prueba de Bondad de Ajuste – San Juan de Marcona**

Distribución	Resultado	Rango
Normal	0,209	2
Log Normal	0,287	3
Pearson III	0,396	5
Log Pearson III	0,345	4
Gumbel	0,153	1

Fuente: Línea Base Física, Amec 2014.

**Tabla N° 4-27. Resultados de la Prueba de Bondad de Ajuste - Chaparra**

Distribución	Resultado	Rango
Normal	0.160	3
Log Normal	0.194	4
Pearson III	0.089	1
Log Pearson III	0.241	5
Gumbel	0.126	2

Fuente: Línea Base Física, Amec 2014.

De los resultados se observa que la distribución Gumbel es la que mejor se ajusta a los datos de la estación San Juan de Marcona, mientras que la distribución Pearson III se ajusta a los datos de la estación Chaparra. Estas distribuciones se utilizarán para obtener las precipitaciones máximas en 24 horas para distintos periodos de retorno.

En la Tabla N° 4-28 se presentan los resultados para la estación San Juan de Marcona y en la Tabla N° 4-29 para la estación Chaparra.

**Tabla N° 4-28. Pp max. con periodo de retorno – Estación San Juan de Marcona**

Tr (años)	P máx. (mm)
2	1,2
5	2,9
10	4,1
25	5,5
50	6,6
100	7,7
200	8,7
500	10,1

*Fuente: Línea Base Física, Amec 2014.*

**Tabla N° 4-29. Pp max. Con Periodo de Retorno – Estación Chaparra**

Tr (años)	P máx. (mm)
2	2,9
5	6,4
10	8,6
25	11,5
50	13,6
100	15,7
200	17,8
500	20,6

*Fuente: Línea Base Física, Amec 2014.*

### **C. Caudales Máximos**

A pesar de la precipitación casi nula que se presenta en la zona del proyecto, los componentes proyectados podrían estar sujetos a ocurrencias de caudales máximos como consecuencia de eventuales tormentas intensas.

Se ha identificado un conjunto de seis pequeñas áreas de drenaje que aportarían caudal de escorrentía en caso de eventos extraordinarios. Como estación representativa se consideró a Chaparra.

El caudal máximo se calculó mediante la relación directa precipitación – escorrentía mediante la fórmula:

#### **Ecuación N° 4-1. Ecuación de Caudal Máximo**

$$Q_{max} = \frac{C \times I \times A}{3.6}$$

Tesis publicada con autorización del autor  
No olvide citar esta tesis

$Q_{max}$ : Caudal máximo en m<sup>3</sup>/s.

C: Coeficiente de escorrentía.

I: Intensidad de la precipitación máxima para una tormenta de duración t y tiempo de retorno TR.

A: Área de drenaje (Km<sup>2</sup>)

El coeficiente de escorrentía se obtuvo de la ecuación de Nadal, que relaciona la extensión de la cuenca, la precipitación media anual, la pendiente y permeabilidad del suelo. En la Tabla N° 4-30 se encuentran las coordenadas de los puntos de drenaje. En la Tabla N° 4-31 los caudales máximos para distintos periodos de retorno. Se debe tener en cuenta que los caudales máximos se han calculado suponiendo que se las precipitaciones máximas ocurran en la zona aguas arriba del Proyecto. *(Ver Anexo 02 Mapas).*

**Tabla N° 4-30. Coordenadas de los Puntos de Drenaje**

Código	Quebrada	Coordenadas UTM		Altitud msnm	Área de drenaje km <sup>2</sup>
		Norte	Este		
AD-01	Los Colorados	8 304 676	517 640	434	59,6
AD-02	S/N	8 303 727	519 063	539	3,5
AD-03	La Muña	8 303 647	520 830	601	1
AD-04	Llucyuca	8 300 906	521 791	500	23,6
AD-05	Maztuerzo Chico	8 299 718	523 032	490	15,5
AD-06	Cardonales	8 303 005	527 187	670	71,9

*Fuente: Línea Base Física, Amec 2014.*

**Tabla N° 4-31. Caudales Máximos**

Código	Área de drenaje km <sup>2</sup>	Caudal Máximo (m3/s)							
		Tiempo de retorno							
		2	5	10	25	50	100	200	500
AD-01	59,6	3,7	8,1	10,9	14,5	17,2	19,9	22,5	26,1
AD-02	3,5	0,6	1,3	1,7	2,3	2,8	3,2	3,6	4,2
AD-03	1	0,3	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
AD-04	23,6	2,2	4,8	6,4	8,5	10,1	11,7	13,2	15,3
AD-05	15,5	1,4	3,0	4,1	5,5	6,5	7,5	8,5	9,8
AD-06	71,9	6,0	13,2	17,8	23,8	28,2	32,5	36,9	42,6

*Fuente: Línea Base Física, Amec 2014.*

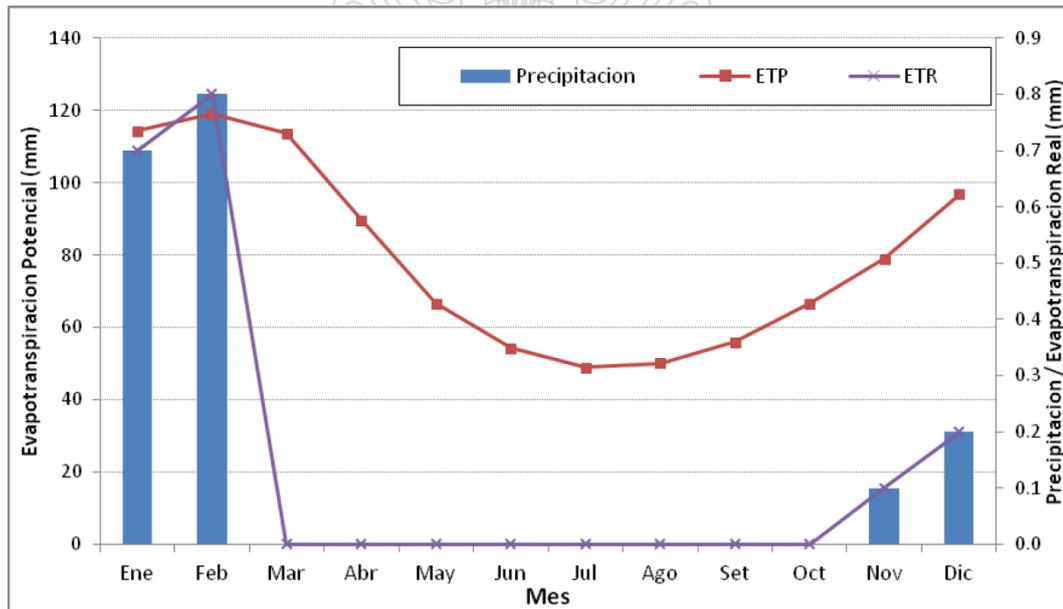
#### **4.2.3.4 Balance Hídrico Climático**

Conociendo los valores y comportamiento de la precipitación y temperatura, se puede estimar el contenido de agua disponible en el suelo, mediante la elaboración de un balance hídrico siguiendo la metodología desarrollada por Thornthwaite

(1957). Este balance se fundamenta en el principio físico de conservación de masa. Su ecuación indica los ingresos y egresos de un sistema y correspondientemente su estado de ganancia (excesos), pérdidas (déficit) y almacenamientos, mediante la relación existente entre el volumen de agua que ingresa al suelo (precipitación) y el que se pierde (evapotranspiración potencial), la diferencia muestra la disponibilidad real de agua en el suelo.

El análisis se realizó con los datos de la estación meteorológica Acarí como base. En la Tabla N° 4-32 se presenta el balance hídrico para la zona del Proyecto.

Figura N° 4-19. Variación de los Parámetros



Fuente: Línea Base Física, Amec 2014.

El Balance Hídrico Climático muestra el déficit hídrico debido a la escasa precipitación mensual. Por lo tanto los suelos no almacenan reservas hídricas y no se cuenta con la capacidad de generación de escorrentía superficial.

Tabla N° 4-32. Balance Hídrico Climático

Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación	0,7	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	1,8
ETP	114	119	114	90	67	54	49	50	56	67	79	97	955
ETR	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Déficit	114	118	114	89,7	67	54	49	50	56	67	79	97	953
Excedente	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

## **CAPÍTULO V: RESULTADOS**

### **5.1 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA**

#### **5.1.1 Conductividad Hidráulica**

Durante la revisión bibliográfica se pudo recopilar información sobre ensayos de conductividad hidráulica del tipo Lugeon y Lefranc de carga constante y variable realizados en once piezómetros instalados en el área del proyecto por la empresa Perforaciones del Perú S.A.C., en los cuales se detallan los criterios de utilización del método de ensayo (Prueba Lugeon o Lefranc) corresponde a:

- ✓ Prueba de tipo Lefranc, en medios no consolidados o muy fracturados y permeables, según el comportamiento hidráulico se definirá el tipo de ensayo correspondiente de carga constante o variable.
- ✓ Prueba de tipo Lugeon, cuando el medio presenta aparentemente baja conductividad hidráulica (roca masiva sin fracturas o poco fracturada).

(Ver Anexo 01 Hidrogeología y Anexo 02 Mapas).

#### ***Conductividad Hidráulica de las Formaciones: Depósitos no Consolidados***

Las características hidráulicas de las formaciones geológicas fueron evaluadas por a partir de los resultados de las pruebas hidráulicas realizadas por la empresa Perforaciones del Perú S.A.C. así mismo, también se ha integrado los datos recopilados de conductividad hidráulica del tipo Lugeon y Lefranc realizados por la empresa Cesel Ingenieros S.A. Entre los depósitos no consolidados, con importancia hidrogeológica en el área de estudio, encontramos dos depósitos del periodo cenozoico: cuaternario y neógeno.

#### ***Formación Pisco (Neógeno)***

Esta formación no consolidada tiene gran importancia hidrogeológica en la región por tener reputación de buen acuífero. La formación Pisco está compuesta por sedimentos arenosos de origen marino, con algunas intercalaciones de secuencias limosas y de gravas y, según los resultados de pruebas de permeabilidad en

sondajes, presenta una conductividad hidráulica entre  $10^{-4}$  y  $10^{-8}$  m/s. Esta variabilidad en la conductividad hidráulica es calificada de moderada a muy baja,

depende de la textura sedimentaria y sobre todo de la proporción de sedimentos gruesos (gravas y arenosos) y finos (limo, arcilla y cenizas volcánicas).

### ***Depósitos Cuaternarios Recientes***

El depósito más reciente está conformado por conglomerados y gravas con matriz limo arcilloso y arenas finas y presenta una conductividad hidráulica determinada durante la realización de los sondajes que varía entre  $10^{-5}$  y  $10^{-8}$  m/s. Esta variabilidad depende de su estructura estratigráfica y de la distribución de sedimentos arenosos y finos (limo y arcilla). En el sector de Bella Unión esta unidad presenta una conductividad elevada del orden de  $10^{-4}$  m/s (SNC Lavalin, 2011). Este valor elevado corresponde probablemente a depósitos libres de material de fino proporcionado por el régimen fluvio aluvial del río Acarí.

### ***Conductividad Hidráulica de las Formaciones: Depósitos consolidados***

Los depósitos consolidados, dentro del área de estudio, se encuentran conformados por una secuencia de rocas metamórficas y sedimentarias del periodo precámbrico, paleozoico y cretáceo, que están intruidas por rocas volcánicas. Las diferentes formaciones geológicas fueron agrupadas, considerando principalmente la conductividad hidráulica.

### ***Basamento Metamórfico Precámbrico***

Correspondiente a rocas metamórficas, como gneis y esquistos del complejo basal de la costa, presentaron valores de conductividad hidráulica baja a muy baja con valores entre  $10^{-6}$  y  $10^{-8}$  m/s, este rango de resultados están relacionados a zonas de fracturamiento, presentando los valores de conductividad más bajos en rocas sin fracturamiento, por lo tanto, corresponden a una unidad con una permeabilidad secundaria (fracturas y fallas).

### ***Basamento Metamórfico Paleozoico***

Compuesta por rocas sedimentarias con un alto grado de metamorfismo, los cuales, conforman zonas mineralizadas y alteradas (magnetita y serpentina, generalmente), pertenecientes a las formaciones San Juan y Marcona. Presentando valores de conductividad hidráulica baja entre  $10^{-6}$  y  $10^{-7}$  m/s, es de señalar que,

debido al intenso metamorfismo esta unidad presenta zonas con fracturamiento moderado a intenso lo que condiciona sus propiedades hidráulicas.

### **Basamento Volcano Sedimentario**

Conformada por rocas volcano sedimentarias, de las formaciones Río Grande Jahuay y Yauca. Presentando una conductividad hidráulica moderada a muy baja con valores que oscilan entre  $10^{-5}$  y  $10^{-9}$  m/s, Los valores de conductividad más altos están asociados al fracturamiento intenso, lo cual permite plantear que se trata de una unidad hidrogeológica con una permeabilidad secundaria, asociada también a algunas discontinuidades litológicas.

### **Basamento intrusivo**

Está constituida por rocas de origen ígneo, andesitas, dioritas, monzonitas, brechas y tobas de la Andesita Tunga. Presenta una conductividad hidráulica baja entre  $10^{-7}$  y  $10^{-8}$  m/s, en pruebas ejecutadas a profundidades entre 50 y 350 m. Sin embargo, en pruebas realizadas entre 5 y 100 m de profundidad la conductividad hidráulica es muy variable, entre  $10^{-4}$  y  $10^{-9}$  m/s, esta variación corresponde a zonas con diferentes grados de fracturamiento, los cuales disminuyen respecto a la profundidad.

### **5.1.2 Litología de los Piezómetros**

Dentro de la información recopilada se tiene la descripción litológica de los piezómetros presentes en la zona investigada. El detalle de la descripción litológica se incluyen en el (*Anexo 01 Hidrogeología*). Ver Tabla N° 5-1.

**Tabla N° 5-1. Formación Geológica Correspondiente al Piezómetro Instalado**

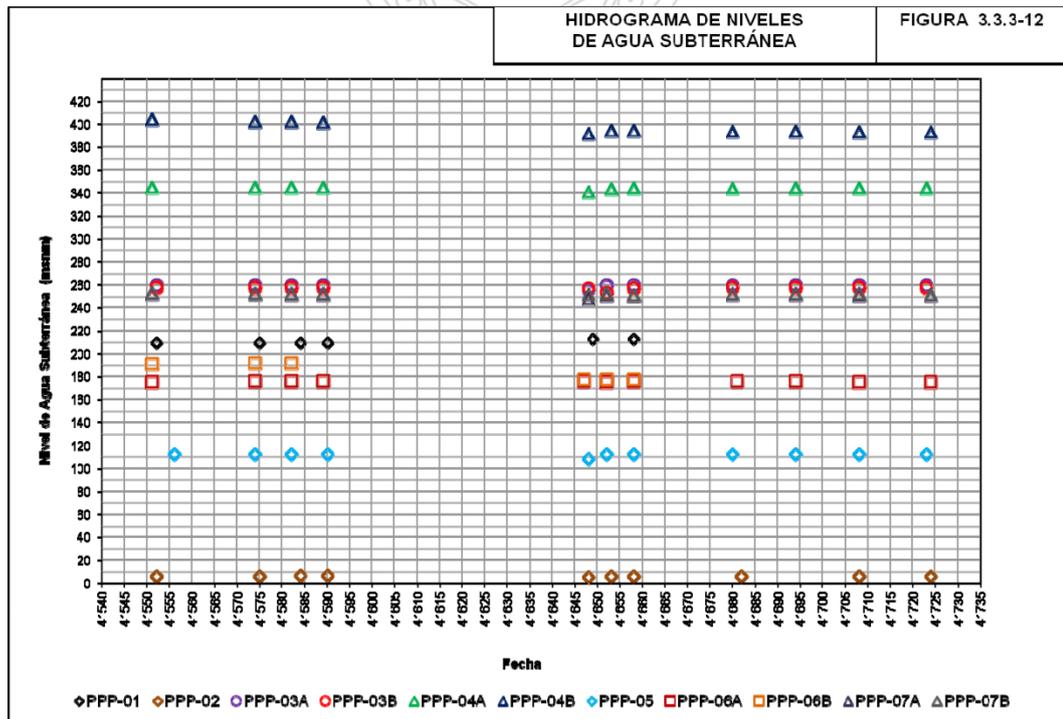
Código del Piezómetro	Tubería ranurada (mbnt)		Formación geológica
	Desde	Hasta	
PPP-01	133.65	183.15	Basamento metamórfico precámbrico
PPP-02	95.60	145.20	Basamento metamórfico precámbrico
PPP-03A	260.00	395.00	Andesita Tunga
PPP-03B	---	---	-----**
PPP-04A	94.61	144.61	Frm. Yauca/Andesita Tunga
PPP-04B	50.00	75.00	Frm. Yauca/Andesita Tunga
PPP-05	84.15	133.65	Frm. Pisco
PPP-06A	301.24	380.38	Frm. San Juan/Marcona
PPP-06B	135.83	195.13	Frm. Pisco
PPP-07A	399.23	572.24	Frm. Yauca
PPP-07B	260.37	433.39	Frm. Marcona

(\*) mbnt : metros bajo el nivel de terreno;  
\*\* Información no entregada por JMP

### 5.1.3 Mediciones de Niveles de Agua Subterránea

Se realizó diferentes campañas de monitoreo manual de niveles de agua subterránea. Las mediciones fueron ejecutadas por personal técnico de JMP en los piezómetros instalados. También se realizaron mediciones en piezómetros y pozos artesanales existentes en el entorno del proyecto, piezómetros instalados por Aleph Asociados y pozos ubicados en Bella Unión. Ver Figura N° 5-1.

Figura N° 5-1. Hidrograma del Nivel del Agua



Fuente: JMP

### 5.1.4 Flujo del Agua Subterránea

Los datos de niveles de agua subterránea obtenidos en la presente investigación fueron revisados, graficados y ploteados para establecer la interacción entre agua subterránea y los potenciales controles estructurales en el flujo de agua subterránea. Ver Tabla N° 5-2. (Ver Anexo 01 Hidrogeología).

**Tabla N° 5-2. Rango de Niveles y Elevaciones del Nivel Freático (N.F.)**

Código del Piezómetro de Tubo Abierto	Coordenadas UTM (WGS-84) *		Elevación del terreno* (msnm)	Profundidad del N.F. (mbnt)			Elevación N.F.			Variación de nivel freático (m)
				Periodo de Observación (Octubre 2013 – Marzo 2014)						
				Min (m)	Max (m)	Última medición (m)	Min (msnm)	Max (msnm)	Última medición (msnm)	
PPP-01	506530	8293452	266.45	53.30	57.02	Obstruido	209.43	213.15	Obstruido	3.72
PPP-02	506902	8287145	83.76	78.15	78.15	77.16	5.61	6.77	6.60	1.16
PPP-03A	516527	8298756	409.35	149.25	153.35	149.74	256.00	260.10	259.61	4.10
PPP-03B**	516528	8298741	408.90	151.22	155.33	151.35	253.57	257.68	257.55	4.11
PPP-04A	516092	8303567	454.47	109.3	113.38	110.15	341.09	345.17	344.32	4.08
PPP-04B	516094	8303555	454.10	49.70	62.12	60.98	391.98	404.40	393.12	12.42
PPP-05	523491	8293539	243.09	130.58	134.31	130.61	108.78	112.51	112.48	3.73
PPP-06A	519951	8297507	343.88	167.34	167.98	167.84	175.90	176.54	176.04	0.64
PPP-06B	519979	8297425	340.25	148.40	162.57	Obstruido	177.68	191.85	Obstruido	14.17
PPP-07A	518229	8301292	406.52	154.01	158.27	154.97	248.25	252.51	251.55	4.26
PPP-07B	518281	8301236	406.17	153.20	155.07	153.90	251.10	252.97	252.27	1.87

Fuente: JMP

También se realizó la medición del nivel freático en pozos artesanales someros asentados sobre depósitos cuaternarios fluvio aluviales en los sectores de Bella Unión y de Lomas y Sacaco.

- ✓ Los pozos de Bella Unión incluyen los pozos PO-PP-01, PO-PP-02, PO-PP-03 y PO-PP-05. En esta zona, los niveles de agua se encuentran superficialmente entre 1 m y 24 m de profundidad respecto al nivel del terreno, equivalente al rango de 181 al 183 msnm.
- ✓ Los pozos cercanos a la quebrada Lomas y Sacaco también se han monitoreado. Estos pozos PO-PP-06, PO-PP-09 y PO-PP-12 están cercanos al límite con el océano Pacífico.

(Ver Anexo 02 Mapas).

### 5.1.5 Gradiente Hidráulico

Basado en el mapa de isopiezas presentado en (*Anexo 02 Mapa 11: Mapa de Isopiezas*), se observa una magnitud pequeña del gradiente hidráulico en varias zonas del sitio de estudio conforme a la topografía del sitio. Ver Tabla N° 5-3.

**Tabla N° 5-3. Gradientes Hidráulicos de Varias Zonas del Sitio**

Zona	$i = dh/dx$	Dirección
Centro	0,017928	SE
Sur	0,019674	SE
Oeste	0,006642	SW
Este	0,049104	SW
Noreste	0,015245	W

## **5.2 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL**

Un modelo conceptual es básicamente una descripción cualitativa del sistema hidrogeológico. La conceptualización hidrogeológica la constituye una combinación e integración de información geológica, hidrogeológica e hidroquímica disponible y generada, la cual permite una explicación integral del funcionamiento hidrogeológico analizado.

El entendimiento del modelo hidrogeológico conceptual constituye la herramienta principal y fundamental para entender el comportamiento del sistema hidrogeológico. El modelo considera las conexiones hidráulicas existentes entre las diferentes unidades hidrogeológicas identificadas y sus posibles afectaciones con el desarrollo del proyecto.

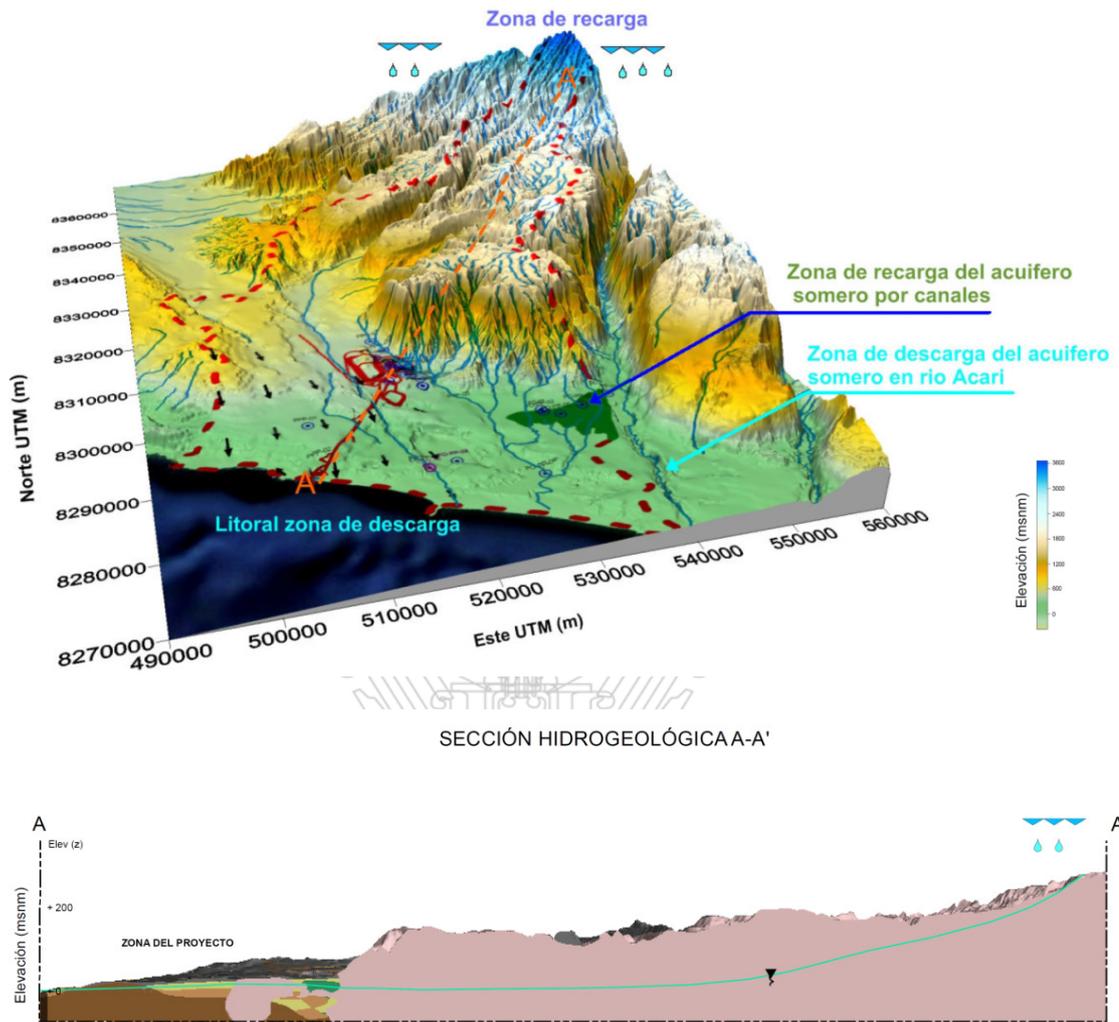
En la Figura N° 5-2 se muestra un diagrama que describe cualitativamente el modelo hidrogeológico conceptual, identificando las zonas de recarga y descarga del agua subterránea, la dirección y sentido del flujo subterráneo.

Las subsecciones que se presentan a continuación abarcan mayor detalle de los temas del modelo hidrogeológico conceptual, incluyendo una descripción de las características hidráulicas de las unidades hidrogeológicas, una descripción de los procesos y zonas de recarga y descarga y una descripción del comportamiento del proceso de flujo del agua.

Descripción de las características hidráulicas de las unidades hidrogeológicas.

- ✓ Procesos de recarga y descarga de los acuíferos, y las zonas principales donde ocurren esos procesos.
- ✓ Descripción de la secuencia de unidades y estructuras geológicas las cuales impactan el comportamiento del flujo de agua subterráneo.

Figura N° 5-2. Modelo Hidrogeológico Conceptual



Fuente: Elaboración Propia.

### 5.2.1 Unidades Hidrogeológicas

(Ver Anexo 02 Mapa 12: Mapa de Sección Hidrogeológica A-A', Mapa 13: Mapa de Sección Hidrogeológica B-B' y Mapa 14: Mapa de Sección Hidrogeológica C-C'). En ella se muestran las secciones hidrogeológicas obtenidas a partir del modelo conceptual.

El entorno geológico del área de estudio está constituido, por rocas metamórficas correspondiente al precámbrico (Complejo Basal de la Costa), rocas conglomerádica - pelítica y calcáreas de edad Paleozoica (formaciones San Juan y Marcona), rocas volcanosedimentarias del Mesozoico (formaciones Río Grande,

correspondiente al Mioceno (formación Pisco) y depósitos cuaternarios no consolidados. De acuerdo a la información recopilada se han diferenciado y agrupado las formaciones geológicas, identificando seis unidades hidrogeológicas que tienen implicancia en el funcionamiento del sistema hidrogeológico. Para el propósito del modelo hidrogeológico conceptual, las diferentes formaciones geológicas fueron agrupadas considerando las características hidráulicas (conductividad hidráulica y la capacidad de almacenamiento).

- ✓ Basamento metamórfico precámbrico (Complejo Basal de la Costa).
- ✓ Basamento metamórfico paleozoico (Formaciones Marcona y San Juan).
- ✓ Basamento volcano-sedimentario (Formaciones Río Grande, Jahuay y Yauca).
- ✓ Basamento intrusivo.
- ✓ Sedimentos arenosos (Formación Pisco).
- ✓ Depósitos cuaternarios.

En la Tabla N° 5-4 se presenta el resumen de las características hidráulicas de las unidades hidrogeológicas.

**Tabla N° 5-4 Características Hidráulicas de las Unidades Hidrogeológicas**

Unidad Hidrogeológica	Rango de Conductividad hidráulica (m/s)		Promedios de Conductividad, (m/s)			Clasificación como formación portadora de agua	Formación Geológica
	máximo	mínimo	K aritmética	K geométrica	K armónica		
<b>Depósitos no consolidados</b>							
VI	7.40E-05	4.10E-08	2.40E-05	6.20E-06	3.00E-07	Acuífero Libre	Cuaternario reciente
V	7.60E-05	1.00E-08	9.50E-06	1.70E-06	8.00E-08	Acuífero Libre	Formación Pisco
<b>Depósitos consolidados</b>							
I	1.50E-06	9.70E-08	5.80E-07	2.50E-07	1.50E-07	Acuífero semiconfinados	Complejo Basal de la costa
II	1.80E-06	1.70E-07	7.40E-07	4.20E-07	2.90E-07	Acuífero semiconfinados	San Juan y Marcona
III	2.90E-05	6.50E-09	7.60E-06	5.50E-07	4.70E-08	Acuífero semiconfinados	Río Grande, Jahuay y Yauca
IV	1.50E-04	4.40E-09	6.00E-06	2.90E-07	4.30E-08	Acuífero semiconfinados	Basamento intrusivo (andesita Tunga)

*Fuente: Elaboración Propia.*

### **5.2.2 Zonas de Recarga y Descarga**

En general, el clima cerca la zona de proyecto es hiperárida, con menos de 1 cm de precipitación anual. Por esta razón, no hay recarga natural que ocurre cerca la zona del proyecto, la recarga se produce en las partes altas de la subcuenca

Jahuay, siendo la precipitación total anual de 219 mm, la posibilidad de eventos No olvide citar esta tesis

extraordinarios va a generar escorrentía desde la parte alta de la subcuenca, produciendo altos caudales en la quebrada Jahuay.

El flujo subterráneo somero presenta una recarga a partir del valle del río Acarí en su parte alta y a partir de zonas de irrigación en el sector de Bella Unión que se encuentra ubicado a 20 km del proyecto. Estos flujos someros se interconectan con el flujo regional en la zona de litoral entre las isopiezas de valor 5 y 10 msnm antes de la desembocadura de la quebrada Lomas. Cabe señalar que la percolación profunda que resulta por la irrigación en el sector Bella Unión constituye un componente de recarga directa al flujo regional que tiene dirección oeste y suroeste hacia el litoral, esta recarga no tiene influencia en el proyecto.

El flujo subterráneo regional profundo presenta una recarga a partir de las partes altas provenientes del batolito de la costa y de la quebrada Jahuay, principalmente con un movimiento relativamente lento a través de las estructuras principales de las rocas hasta su ingreso al litoral.

### **5.2.3 Tipos de Acuíferos y Características del Flujo de Agua Subterránea**

Se considera la presencia de dos principales acuíferos en el área de estudio: uno en los depósitos no consolidados y un otro en los depósitos consolidados (rocas). Basado en los datos y la información revisada, existe aparentemente una conexión hidráulica entre estas unidades hidrogeológicas.

Como se menciono anteriormente las unidades hidrogeológicas que corresponde al basamento rocoso presentan permeabilidades secundarias, y por lo tanto el flujo subterráneo está afectado a través de fallas y fracturas importantes. Dentro del marco geológico del proyecto, los estudios elaborados por BISA (2012) clasificaron la zona en tres dominios estructurales, norte, centro y sur.

A partir del mapa de isopiezas, se obtuvo información sobre las direcciones del flujo subterráneo en el entorno del proyecto, de tal manera que se puede presentar las siguientes observaciones:

- ✓ Los datos indican la existencia de un flujo subterráneo profundo regional correspondiente a las unidades hidrogeológicas del basamento rocoso

incluyendo la formación Pisco. El flujo subterráneo presenta una dirección preferente N-S y NNO–SSE.

- ✓ El acuífero Jahuay se encuentra al noreste del proyecto, la recarga del acuífero es por infiltración de las precipitaciones en la parte alta de la intercuenca, flujo de agua superficial estacional a lo largo de la quebrada y mediante la falla de la quebrada Carbonera (Vector, 2009), este acuífero presenta un flujo subterráneo somero y esta interconectado a las diferentes unidades hidrogeológicas a través de fracturas y fallas
- ✓ Existe un flujo subterráneo somero condicionado por la recarga superficial a partir de la parte alta del valle del río Acarí, los cuales conforman zonas de irrigación en la margen derecha del valle Acarí.
- ✓ El flujo regional y el flujo del valle Acarí se interconectan en el sector paralelo al litoral, se asume que la interconexión se da entre las isopiezas con valor entre 5 y 30 msnm.
- ✓ Es probable que existe una transferencia de flujo subterráneo a partir de las unidades que comprenden los distintos basamentos rocosos y la formación Pisco. Esta transferencia permite plantear un sistema hidrogeológico regional conformado por diferentes unidades geológicas que presentan un funcionamiento único. Por consiguiente, se ha trazado una misma superficie piezométrica regional para las diferentes unidades geológicas, a excepción de la unidad hidrogeológica aluvial en el sector de Bella Unión que presenta un flujo y recarga local del propio valle y la zona del acuífero Jahuay.
- ✓ En el dominio norte, en la cual se encuentra el Batolito de la Costa (rocas intrusivas), se presentan fallas principales de dirección NW-SE, buzando hacia el SW, incluyendo la falla Bella Unión, responsable de separar el dominio Norte y centro. El dominio centro, en el cual se encuentra la mineralización del proyecto, presentan fallas principales de dirección N-S, con un buzamiento hacia el NE, correspondiendo a fallas de rumbo con un movimiento normal. El dominio sur, lugar donde aflora el complejo basal de la costa, se presentan lineamientos de dirección NWW-SEE, con buzamientos hacia el SW.

✓ Estos dominios estructurales impactan predominantemente los flujos subterráneos, indicando que, en la zona correspondiente al proyecto

Tesis publicada con autorización del autor  
No olvide citar esta tesis

UNFV

(dominio centro), los flujos subterráneos preferenciales tienen una dirección de N-S.

- ✓ Los dominios estructurales afectan los flujos subterráneos, por consiguiente, el movimiento del agua subterránea se desplaza siguiendo las orientaciones y direcciones de los sistemas de fallas y fracturas principales.

### **5.3 MODELO HIDROGEOLÓGICO NUMÉRICO**

En el Proyecto Pampa del Pongo, se ha identificado dos tipos de acuíferos, acuífero en medio poroso superficial y acuífero profundo en rocas fracturadas, los acuíferos de comportamiento en medio poroso superficial se encuentran ubicados en la zona de regadío de Bella Unión y al noreste del Proyecto denominado acuífero Jahuay, el acuífero profundo se ubica en el proyecto minero y alrededores. Este acuífero se comporta como medio fracturado siendo el flujo subterráneo por medio de fallas y fracturas, por la complejidad de la geología y las unidades hidrogeológicas identificadas el flujo de agua subterránea se asume que se comporta como un medio poroso equivalente. De acuerdo a la asunción de medio poroso equivalente, se puede realizar la simulación mediante ecuaciones de diferencia finitas, para el modelamiento numérico se ha elegido el código de simulación MODFLOW-SURFACT y MODFLOW-USG este último realizado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, para desarrollar y representar el modelo conceptual hidrogeológico 3D, se utilizó el software Leapfrog Hydro. Para el desarrollo del modelo numérico de flujo de agua subterránea del Proyecto Pampa del Pongo, se ha utilizado el código MODFLOW-USG (Panday, Sorab, Langevin, C.D., Niswonger, R.G., Ibaraki, Motomu, and Hughes, J.D., 2013) y la interface Groundwater Vistas V 6.53 (Environmental Simulations, Inc.), ambos permiten flexibilidad en el diseño de la malla en zonas de ríos, fallas, alrededores de pozos o realizar discretización de capas solas, mejorando la discretización en zonas puntuales, estas mallas pueden ser triángulos prismáticos, rectángulos o hexágonos.

#### **5.3.1 Construcción del Modelo**

Se ha desarrollado un modelo numérico a escala regional abarcando las subcuencas Quebrada Jahuay y Sacaco, basado en la geología regional, local e

Tesis publicada con autorización del autor  
No olvide citar esta obra

**UNFV**

información hidrogeológica obtenida en campo. Para hacer eso, se ha utilizado la asunción de simplicidad para determinar las unidades hidrogeológicas, y así poder agrupar formaciones geológicas de características hidrogeológicas similares (propiedades y tipos de rocas iguales). En esta sección, se presenta información sobre el dominio del modelo, la discretización numérica, las propiedades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas, y las condiciones del borde utilizadas para desarrollar del modelo numérico.

### **5.3.1.1 Dominio y Discretización del Modelo Numérico**

El proyecto Pampa del Pongo, como se mencionó, se encuentra ubicado dentro de la intercuenca 13719 (determinado por el ANA), el dominio del modelo numérico abarca un área de 5 600 km<sup>2</sup>, donde se encuentra la totalidad de la subcuenca Qda. Jahuay y la Subcuenca Qda. Sacaco, donde se ubica la zona agrícola de Bella Unión y parte de la intercuenca 13719 (*Ver Anexo 02 Mapa 15: Mapa de Dominio y Discretización*). Los límites del dominio son por el Norte con la Cuenca Grande, por el Sur con la Cuenca Acarí y por el Oeste con Océano Pacífico.

El área de interés se ha discretizado con una malla o grilla de diferencias finitas de 80 filas y 69 columnas resultando una forma rectangular, con 11 capas construidas, con un total de 111 210 celdas, del total de celdas del modelo 77 396 son celdas activas. En los bordes del dominio del modelo las celdas son inactivas o de no flujo.

Cada celda discretizada es de 1 000m x 1 000 m, Para aumentar la resolución en el área de los principales componentes del proyecto, las celdas disminuyen en tamaño 250m x 250m, esto permite un análisis más detallado en el área del proyecto. El modelo numérico fue construido con 11 capas como se observa en la Tabla N° 5-5 y Figura N° 5-3, cada capa del modelo se creó utilizando la topografía del terreno, siendo cada capa paralela a la topografía, la base de datos topográfica fue obtenida del IGN con una resolución de 50m x 50m, los datos de elevación forman un DEM (modelo de elevación digital), esta extensión permite ingresar la topografía al software de modelamiento Leapfrog Hydro y Groundwater Vistas. Cada capa del modelo es constante, para reducir la

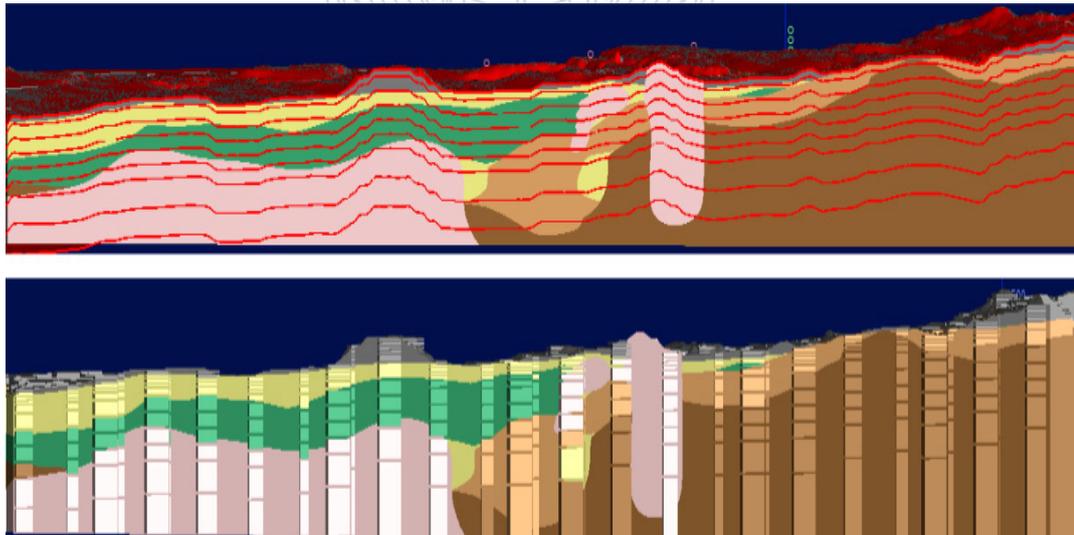
inestabilidad numérica, debido a las gradientes hidráulicas generadas por el desagüe de la mina.

**Tabla N° 5-5. Discretización Vertical**

Capa	DEM	Espesor (m)	Profundidad de la Capa (m)
1	DEM-Superficial	25	25
2	DEM-25	25	50
3	DEM-25	25	75
4	DEM-25	25	100
5	DEM-25	50	150
6	DEM-50	100	250
7	DEM-100	100	350
8	DEM-100	100	450
9	DEM-100	100	550
10	DEM-100	200	750
11	DEM-200	420	1170

Fuente: Elaboración Propia.

**Figura N° 5-3. Discretización Vertical del Modelo Numérico en 11 Capas**



UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS				
Unidades		Unidades geológicas		
Unidad I	Pe-gr-gn	Basamento metamórfico precámbrico	Complejo Basal de la Costa	
Unidad II	PE-sj	Basamento metamórfico paleozoico	Formación San Juan	
	P-ma		Formación Marcona	
Unidad III	Js-rg	Basamento Volcano sedimentario	Formación Río Grande	
	Js-ja		Formación Jahuay	
	Ki-ya		Formación Yauca	
Unidad IV	Ki-at	Basamento Intrusivo	Andesita Tunga	
Unidad V	Ts-pi	Sedimentos arenosos	Formación Pisco	
Unidad VI	Q-rec	Depósitos cuaternarios	Depósitos Cuaternarios Recientes	

### 5.3.1.2 Propiedades Hidrogeológicas

Se han identificado seis unidades hidrogeológicas, de acuerdo a la información bibliográfica obtenida de los trabajos de (perforaciones, habilitación de piezómetros y monitoreo de niveles piezométricos e información geológica). Para representar las formas y estructuras geológicas se han creado 11 capas con diferentes espesores, paralelos a la superficie topográfica, siendo más flexible la representación de las conductividades hidráulicas en el modelo numérico. Las conductividades hidráulicas fueron obtenidas por las empresas consultoras BRADLEY&MDH y AMEC, a estas pruebas hidráulicas se les realizó un análisis estadístico determinando la media aritmética, geométrica y armónica. Ver Tabla N° 5-6 y Tabla N° 5-7.

**Tabla N° 5-6. Unidades Hidrogeológicas**

UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS				
Unidades	Unidades Geológicas			
Unidad I	Pe-gr-gn	Basamento metamórfico precámbrico	Complejo Basal de la Costa	
Unidad II	P-ma	Basamento metamórfico paleozoico	Formación San Juan	
	PE-sj		Formación Marcona	
Unidad III	Ki-ya	Basamento Volcano sedimentario	Formación Río Grande	
	Js-ja		Formación Jahuay	
	Js-rg		Formación Yauca	
Unidad IV	Ki-at	Basamento Intrusivo	Andesita Tunga	
Unidad V	Ts-pi	Sedimentos arenosos	Formación Pisco	
Unidad VI	Q-rec	Depósitos cuaternarios	Depósitos Cuaternarios Recientes	

Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla N° 5-7. Resumen de Análisis Estadístico de las Conductividades Hidráulicas**

Unidades Hidrogeológica	Max K AMEC	Min K AMEC	Media Aritmética AMEC	Media Geométrica AMEC	Max K BRADLEY & MDH y AMEC	Min K BRADLEY & MDH y AMEC	Media aritmética BRADLEY & MDH y AMEC	Media geométrica BRADLEY & MDH y AMEC	Media Armónica BRADLEY & MDH y AMEC
m/s									
Unidad I	1.50E-06	9.70E-08	5.80E-07	2.50E-07	-	-	-	-	1.50E-07
Unidad II	1.80E-06	1.70E-07	7.40E-07	4.20E-07	-	-	-	-	2.90E-07
Unidad III	8.50E-07	6.50E-09	3.20E-07	1.10E-07	2.90E-05	6.50E-09	7.60E-06	5.50E-07	4.70E-08
Unidad IV	1.20E-08	4.40E-09	8.70E-09	8.20E-09	1.50E-04	4.40E-09	6.00E-06	2.90E-07	4.30E-08
Unidad V	1.30E-05	5.90E-08	5.90E-06	2.60E-06	7.60E-05	1.00E-08	9.50E-06	1.70E-06	8.00E-08
Unidad VI	-	-	-	-	7.40E-05	4.10E-08	2.40E-05	6.20E-06	3.00E-07
m/día									
Unidad I	1.30E-01	8.40E-03	5.00E-02	2.20E-02	-	-	-	-	1.30E-02
Unidad II	1.60E-01	1.50E-02	6.40E-02	3.70E-02	-	-	-	-	2.50E-02
Unidad III	7.30E-02	5.60E-04	2.80E-02	9.20E-03	2.50E+00	5.60E-04	6.50E-01	4.70E-02	4.10E-03
Unidad IV	1.00E-03	3.80E-04	7.50E-04	7.10E-04	1.30E+01	3.80E-04	5.20E-01	2.50E-02	3.70E-03
Unidad V	1.20E+00	5.10E-03	5.10E-01	2.30E-01	6.60E+00	8.80E-04	8.20E-01	1.40E-01	6.90E-03
Unidad VI	-	-	-	-	6.40E+00	3.60E-03	2.10E+00	5.30E-01	2.60E-02

### **5.3.1.3 Condiciones de Borde**

Existen dos tipos de condiciones de borde, condiciones de borde impuestas y condiciones de borde calculadas por el modelo, que representan las propiedades del dominio del modelo. El modelo numérico de Pampa del Pongo utiliza ambas condiciones de borde, estas condiciones se describen a continuación.

### **5.3.1.4 Borde de No Flujo (No Flow)**

Los límites laterales del modelo por lo general son límites sin flujo, los bordes del perímetro del modelo se encuentran a lo largo de las cimas de las montañas, debido a que coinciden con la divisoria de aguas de las cuencas, esta condición simétrica permite asumir razonablemente que los flujos divergen en la parte alta de las montañas. El modelo de Pampa del Pongo fija como límites sin flujo al Norte y al Sur de la Intercuenca 13719, siendo parte del total del perímetro, hacia el Oeste se ha asumido una condición de borde de carga constante que es el Océano Pacífico y por el Este se asume una condición de borde de recarga.

### **5.3.1.5 Recarga (Recharge)**

La recarga es el agua aplicada sobre la superficie del terreno, ya sea por precipitación o irrigación, infiltrándose a las capas subyacentes del suelo y capas hidrogeológicas, moviéndose a través de la zona de raíces y para luego pasar a través de los poros o fracturas y ser parte del acuífero o zonas de acumulación de agua. Para introducir este parámetro hidrológico al modelo numérico, se utilizó el software MODFLOW SURFACT en la primera etapa de calibración del modelo, usando el módulo o paquete RSF4. Este paquete permite reducir la recarga cuando la tasa de recarga excede la capacidad de infiltración de las unidades hidrogeológicas, convirtiendo el exceso de recarga en escorrentía subterránea, evitando así que la recarga simulada exceda la superficie del terreno. En la segunda etapa de calibración, cuando se realiza el refinamiento de la grilla, se utiliza el software MODFLOW USG, al igual que MODFLOW SURFACT el MODFLOW USG (USGs\_1 última versión 2.0.0) tiene el paquete RCH, que cumple la misma función que el paquete RSF4. Las fuentes de recarga ingresadas al modelo se aplicaron a dos zonas, la zona 1 su fuente de recarga es la

total anual de la estación Ocoña. La zona 2 su fuente de recarga es la infiltración que se da en la zona agrícola de Bella Unión, con una tasa de infiltración  $1.10 \times 10^{-3}$  m/día, equivalente a 408 l/s.

#### **5.3.1.6 Drenajes (Drain)**

Una condición de este tipo simula la extracción de agua subterránea, esta condición de borde solo descarga el acuífero y fue utilizada en régimen transitorio para simular el desagüe del tajo en los diferentes años de operación de la mina (29 años). Esta condición tiene como entrada la cota de descarga y su conductancia, la descarga del acuífero, a través de esta condición de borde, se da cuando los niveles piezométricos o niveles freáticos están por encima de la cota de descarga del dren, y no se produce descarga si el nivel está por debajo del dren.

Los drenes asignados en el modelo, se encuentran ubicados en las capas 6, 7, 8, 9, 10 y 11, respectivamente.

#### **5.3.1.7 Altura Conocida (Constant Head)**

Esta condición de borde es utilizada para modelar grandes cuerpos de agua, asumiendo que el nivel de agua subterránea no va a ser afectado por el funcionamiento del acuífero. Esta condición de borde, se utilizó en el modelo en dos zonas, la zona 1 que, está representada por la faja costera, es decir por el Océano Pacífico, la altura conocida asignada en el modelo numérico a esta zona es cero. La zona 2 está representada por la zona agrícola de Bella Unión, en el modelo numérico se le asignó una carga variable de acuerdo a la topografía, con valores asignados dentro del rango de 140 msnm a 170 msnm.

#### **5.3.2 Calibración del Modelo en Estado Estacionario**

Los objetivos o puntos de calibración son los niveles piezométricos observados en campo en los piezómetros instalados y pozos que encuentran dentro del dominio del modelo numérico, en la Tabla N° 5-8 se observa los códigos de los pozos utilizados en la calibración del modelo numérico, cabe resaltar que los pozos se encuentran ubicados en la zona agrícola de Bella Unión y la faja costera, y en la parte intermedia del acuífero Jahuay (información obtenida del EIA de Marcobre),

La calibración para el modelo numérico, se basó en el cambio de las conductividades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas, para obtener un mejor ajuste entre las cargas observadas y calculadas, en la Tabla N° 5-8 y Figura N° 5-4 se muestra los objetivos de calibración, y en la Tabla 5-9 se muestra el análisis estadístico de la calibración, todas estas estadísticas se basan en los valores residuales de las cargas observadas y simuladas, para obtener un modelo calibrado el error cuadrático medio normalizado (NRMSE) debe ser menor al 10%, este valor se obtiene de relacionar el error cuadrático medio con el rango de observaciones, como se observa en la Tabla N° 5-9, este valor está por debajo del 10% (NRMSE=2,88%).

**Tabla N° 5-8. Objetivos de Calibración**

Código de Piezómetro	Coordenadas (WGS84)		Carga Observada (m)	Carga Simulada (m)
	Este	Norte		
PO-PP-02*	531435.24	8290352.30	182.87	190.73
PO-PP-03*	535970.57	8290668.43	175.66	183.47
PO-PP-05*	533048.62	8289551.20	181.54	193.30
PO-PP-06*	520399.11	8285531.95	28.01	29.70
PO-PP-09*	528368.42	8281110.06	68.63	48.12
PO-PP-12*	517320.24	8284879.77	23.99	22.38
PPP-02**	506902.35	8287145.21	6.77	11.99
PPP-04A**	516091.69	8303567.04	344.85	329.39
PPP-06A**	519951.12	8297507.10	176.46	181.74
PPP-06B**	519979.11	8297425.09	191.85	179.91
PPP-07A**	518229.37	8301292.27	252.20	269.16
PZ_C***	510611.10	8315467.00	431.02	409.63
PZ_G***	520495.10	8287900.00	44.25	47.68
PPP-07B**	518292.60	8301232.00	252.75	267.31

Nota:

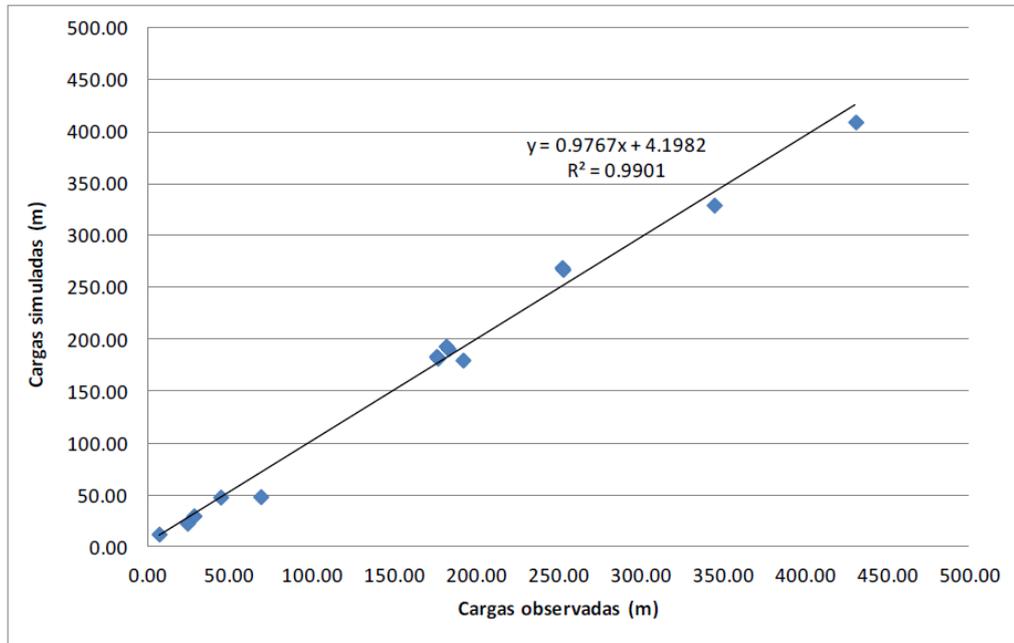
\* Pozos de agua de diferentes dueños.

\*\* Piezómetros instalados por Amec.

\*\*\* Piezómetro instalado por Vector (Información obtenido del EIA de Marcobre).



**Figura N° 5-4. Correlación de Cargas Observadas vs. Simuladas**



Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla N° 5-9. Análisis Estadístico de la Calibración del Modelo Numérico en Estado Estacionario**

Descripción	Valor
Media residual	-0.26
Media absoluta residual	10.39
Desviación estándar residual	12.22
Suma cuadrática residual	2092.78
Raíz del error cuadrático medio (RMS)	12.23
Mínimo residual	-16.96
Máximo residual	21.39
Número de observaciones	14.00
Rango de observaciones	424.25
NRMS	2.88%

Fuente: Elaboración Propia.

Las conductividades hidráulicas utilizadas y calibradas en el modelo numérico, se muestran en la Tabla N° 5-10, en este cuadro se observan dos zonificaciones de conductividades hidráulicas, zona 1 regional y zona 2, donde se ubica el proyecto minero, estas conductividades difieren o son diferentes en las direcciones  $K_y$  y  $K_z$  en las unidades hidrogeológicas I, II, III y IV, siendo estos valores diez veces mayor que los valores de la zona 1, esta asunción se realiza para representar en el

Tesis publicada con autorización del autor  
 No olvide citar esta tesis

dirección noroeste a suroeste (BISA). Para las unidades hidrogeológicas V y VI se asume el mismo valor de conductividad hidráulica que la zona 1, por ser unidades de material no consolidado (material detrítico).

**Tabla N° 5-10. Conductividades Hidráulicas Calibradas y Utilizadas en el Modelo**

Zona 1				Zona 2			
Unidades Hidrogeológicas Zona Regional	Kx	Ky	Kz	Unidades Hidrogeológicas Zona de Mina	Kx	Ky	Kz
	m/día				m/día		
Unidad I	8.40E-03	8.40E-03	8.40E-03	Unidad I	8.40E-03	8.40E-02	8.40E-02
Unidad II	1.50E-03	1.50E-03	1.50E-03	Unidad II	1.50E-03	1.50E-02	1.50E-02
Unidad III	4.10E-03	4.10E-03	4.10E-04	Unidad III	4.10E-03	4.10E-02	4.10E-02
Unidad IV	3.70E-03	3.70E-03	3.70E-03	Unidad IV	3.70E-03	3.70E-02	3.70E-02
Unidad V	8.20E-01	8.20E-01	8.20E-02	Unidad V	8.20E-01	8.20E-01	8.20E-02
Unidad VI	2.60E-02	2.60E-02	2.60E-02	Unidad VI	2.60E-02	2.60E-02	2.60E-02

*Fuente: Elaboración Propia.*

En el **Anexo de Mapas** se observa la ubicación de los piezómetros y pozos que tienen por objetivo la calibración del modelo numérico en estado estacionario, en esta figura también se observa los contornos del nivel freático generados por el modelo antes de las operaciones del proyecto (estado estacionario).

### 5.3.3 Análisis de Sensibilidad del Modelo Calibrado en Régimen Estacionario

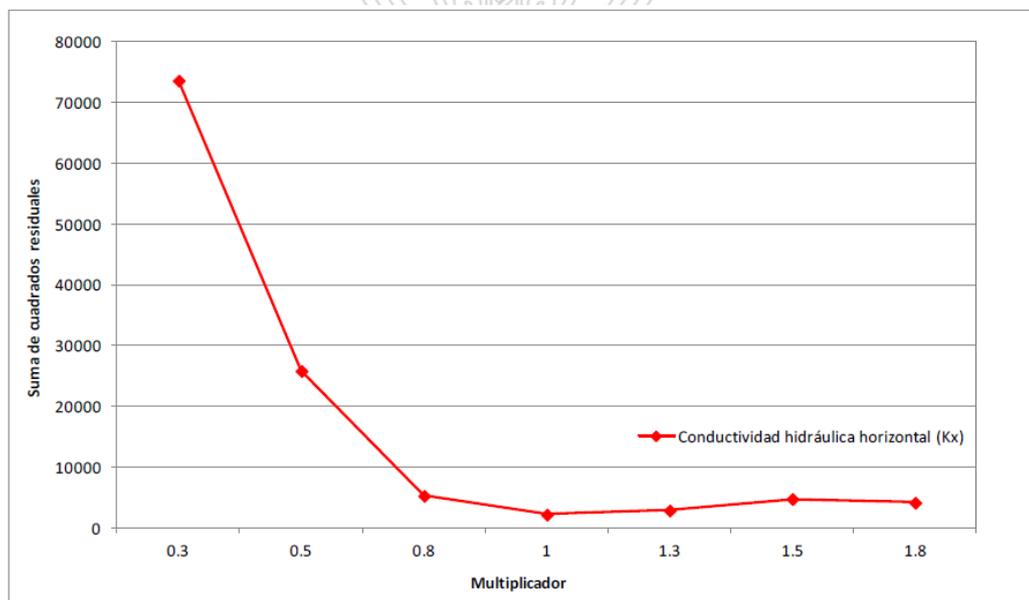
El análisis de sensibilidad se realizó después de calibrar el modelo estacionario, con esta metodología se estima rangos de confianza para el modelo predictivo o simplemente evaluar el impacto del cambio de alguno de los parámetros hidrogeológicos (conductividad hidráulica y recarga).

El análisis de sensibilidad, se realizó a la conductividad hidráulica horizontal (Kx), se utilizó un multiplicador para variar la conductividad hidráulica, el modelo calibrado en estado estacionario está representado por la unidad (1), los multiplicadores son 0.3, 0.5, 0.8, 1.0, 1.3, 1.5, 1.8. Para cumplir con el análisis de sensibilidad el modelo se ejecutó 6 veces, determinando la suma de cuadrados residuales, en la Figura N° 5-5 se muestra el resultado del análisis de sensibilidad de la conductividad hidráulica horizontal, los multiplicadores menores a 1.0 tienen

valores altos de la suma de cuadrados residuales y los multiplicadores mayores a 1.0 son ligeramente más altos.

El resultado del análisis de sensibilidad indica que los valores de las conductividades hidráulicas horizontales, utilizadas en el modelo numérico estacionario, son las que tienen mejor ajuste en calibración que las conductividades hidráulicas calculadas por los multiplicadores. Ver Figura N° 5-5.

**Figura N° 5-5. Análisis de Sensibilidad Conductividad Hidráulica Horizontal**



Fuente: Elaboración Propia.

#### 5.4 MODELO NUMÉRICO EN RÉGIMEN TRANSITORIO Y ANÁLISIS DE EFECTOS

El modelo numérico, en estado estacionario, se utilizó como base para desarrollar el modelo numérico en régimen transitorio, el cual permitirá predecir el desagüe del tajo durante los años de operación de la mina (29), como también permitirá simular el llenado del tajo en la etapa de cierre y post-cierre, identificando los efectos al agua subterránea en las diferentes etapas del desarrollo del proyecto minero. La necesidad del desagüe del tajo, durante la operación de la mina, creará el descenso del nivel freático en el entorno de la mina. Asimismo, el proceso de

desagüe del tajo producirá descensos en el nivel freático en zonas cercanas al proyecto; acuíferos cercanos, zona de agrícola de Bella Unión y acuífero Jahuay

Tesis publicada con autorización del autor  
No olvide citar esta tesis

UNFV

(donde se encuentran ubicados pozos de uso poblacional). El modelo numérico, se ha utilizado para predecir los efectos en las zonas del acuífero Jahuay, zona agrícola de Bella Unión, y en la zona costera (parte baja del Proyecto). Los resultados se presentan a continuación.

#### **5.4.1 Tasa de Desagüe**

Para desarrollar el modelo, para predecir el desagüe del tajo, se consideró el diseño y secuencia de minado del tajo durante el tiempo de explotación, se ha determinado la tasa de desagüe por año de desarrollo del tajo. En los dos primeros años de operación de la mina no presentará desagüe, debido a que el nivel freático se encuentra por debajo de los 150m, la cota de inicio del tajo es 400 msnm en promedio y el agua subterránea se encuentra a 252 msnm. Ver Tabla N° 5-11.

**Tabla N° 5-11. Tasa de Desagüe durante los Años de Operación**

<b>Años</b>	<b>Tasa de Desagüe (l/s)</b>
1	0.00
2	0.00
3	-23.44
4	-48.72
5	-70.16
6	-85.96
7	-101.32
8	-114.56
9	-125.95
10	-137.36
11	-143.32
12	-149.30
13	-154.57
14	-160.08
15	-166.08
16	-156.31
17	-149.05
18	-143.16
19	-138.18
20	-133.95
21	-132.41
22	-130.98
23	-129.80
24	-128.73
25	-127.78
26	-142.28
27	-154.83
28	-165.83
29	-175.19

El desagüe del tajo ocasionará el descenso del nivel freático en la zona del proyecto y alrededores, se puede observar los contornos de descenso del nivel freático producidos por las operaciones mineras durante los años 4, 10, 15, 20, 25, 29 y 79, (*Ver Anexo 02 Mapas 37, 38, 39, 40 y 41*).

#### **5.4.2 Efectos al Nivel de Agua Subterránea**

El descenso del nivel freático ocasionado por el desagüe del tajo, durante la operación de la mina será hasta la cota -424 msnm en el año 29 (de acuerdo a la secuencia de minado), produciendo un descenso de aproximadamente 676 m de carga hidráulica (el nivel de agua promedio observado es 252 msnm en la zona del tajo) durante el periodo de operación de la mina: Este descenso del nivel freático se extiende en todas las direcciones, ocasionando efectos en zonas cercanas al proyecto, acuíferos cercanos y zonas de población, que se benefician del agua subterránea. Para este análisis de efectos, el modelo numérico se utiliza para estimar el descenso del nivel freático en tres lugares:

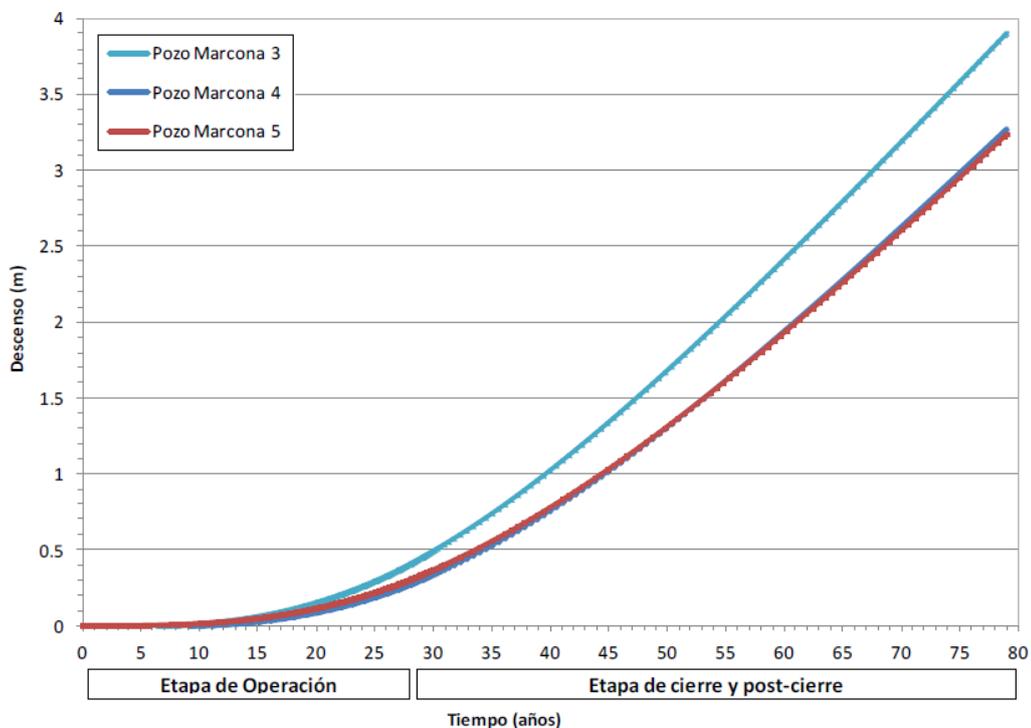
- ✓ Pozos ubicados en el acuífero Jahuay, estos pozos se encuentran ubicados aproximadamente 6 km al noreste del tajo, utilizado para proporcionar agua para la mina de Shougan.
- ✓ Zona agrícola de Bella Unión, ubicada aproximadamente a 20 km al sur del tajo, utilizado para proporcionar agua para riego del terreno de agrícolas.
- ✓ Pozos ubicados en la zona costera, cerca al océano Pacífico, aproximadamente a 17 km al oeste del tajo.

##### **5.4.2.1 Acuífero Jahuay**

El modelo numérico predice que los pozos ubicados en el acuífero Jahuay, (denominados pozo Marcona 3, 4 y 5 en el dominio del modelo e ingresados en el modelo numérico como pozos de observación) presentarán una limitada disminución en el nivel freático. El pozo de observación Marcona 3 tendrá un descenso máximo del nivel freático de 0,45 m en el último año de operación (año 29), y un descenso máximo de 3,90 m en el año 79 de la etapa de cierre y postcierre. El descenso del nivel freático es menor al 0,5% del espesor saturado

Shougang y Marcobre) en la etapa de operación y menor al 4% en la etapa de cierre y post-cierre. De acuerdo a la información de las formaciones geológicas y unidades hidrogeológicas, que se encuentran al noreste del tajo, se identifica la unidad hidrogeológica IV (andesita Tunga), esta unidad crea una barrera hidráulica natural entre el Tajo y el acuífero Jahuay, la permeabilidad de la unidad hidrogeológica IV es baja ( $3.70E-03$  m/día) y el flujo de agua subterránea es a través de fracturas y fallas, por estas condiciones mencionadas, el descenso del nivel freático es limitado. Ver Figura N° 5-6.

Figura N° 5-6. Descenso del Nivel Freático en la Zona del Acuífero Jahuay



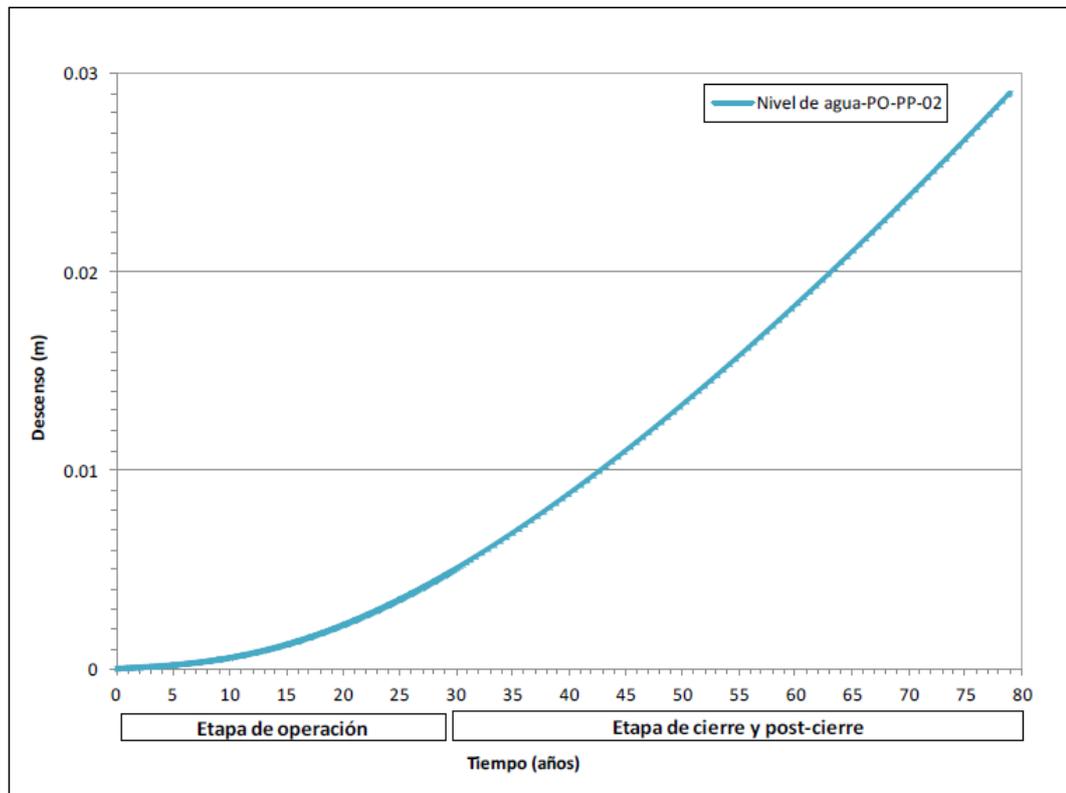
Fuente: Elaboración Propia.

#### 5.4.2.2 Acuífero Bella Unión

El modelo numérico predice que los pozos ubicados en la zona agrícola de Bella Unión presentarán un descenso del nivel freático aun más limitado que el descenso presentado en el acuífero Jahuay. El pozo de observación PO-PP-02 no presentará descenso en el nivel freático en el último año de operación (año 29), y un descenso máximo de 2.9 cm en el año 79 de la etapa de cierre y post-cierre.

Ver Figura N° 5-7.

**Figura N° 5-7. Descenso del Nivel Freático en la Zona Agrícola de Bella Unión**

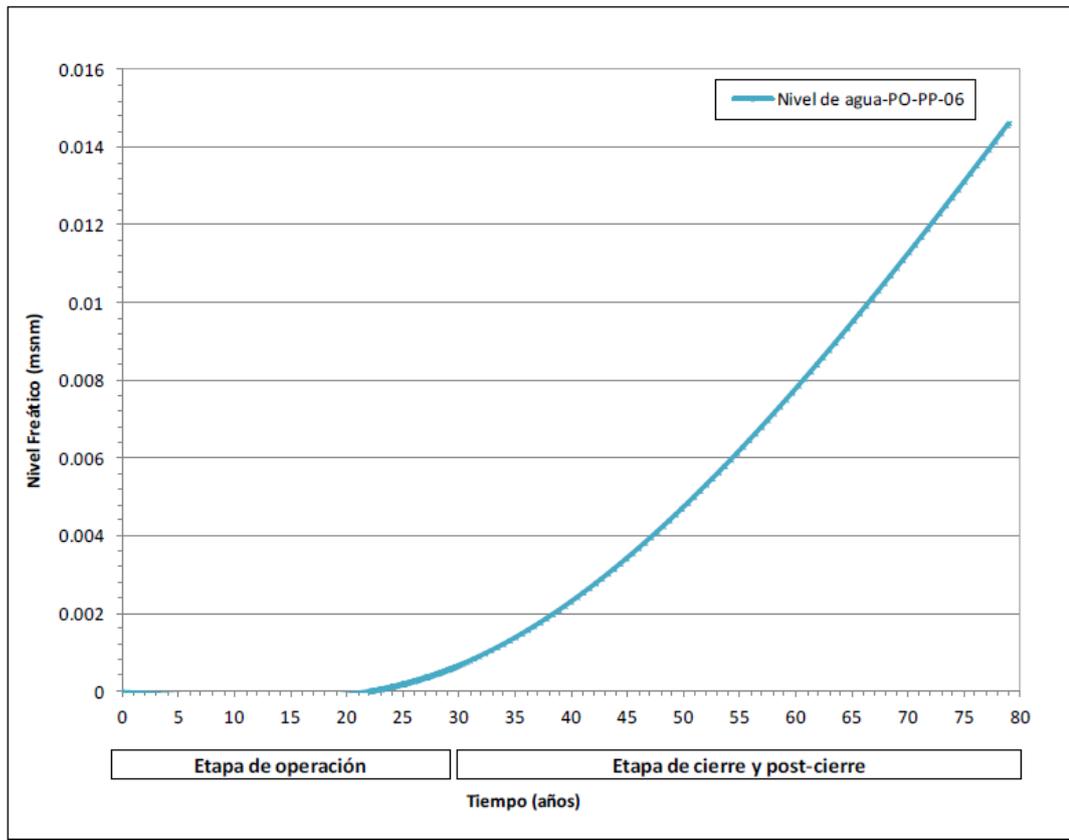


Fuente: Elaboración Propia.

#### 5.4.2.3 Zona Costera

El modelo numérico predice que los pozos ubicados en la zona costera, al igual que en la zona agrícola de Bella Unión, presentará un descenso en el nivel freático aun más limitado que el descenso presentado en el acuífero Bella Unión. El pozo de observación PO-PP-06 no presentará descenso en el nivel freático en el último año de operación (año 29), y un descenso máximo de 1 cm en el año 79 de la etapa de cierre y post-cierre. Ver Figura N° 5-8.

Figura N° 5-8. Descenso del Nivel Freático en la Zona Costera



Fuente: Elaboración Propia.

### 5.4.3 Desagüe y Recuperación del Agua Subterránea en el Tajo

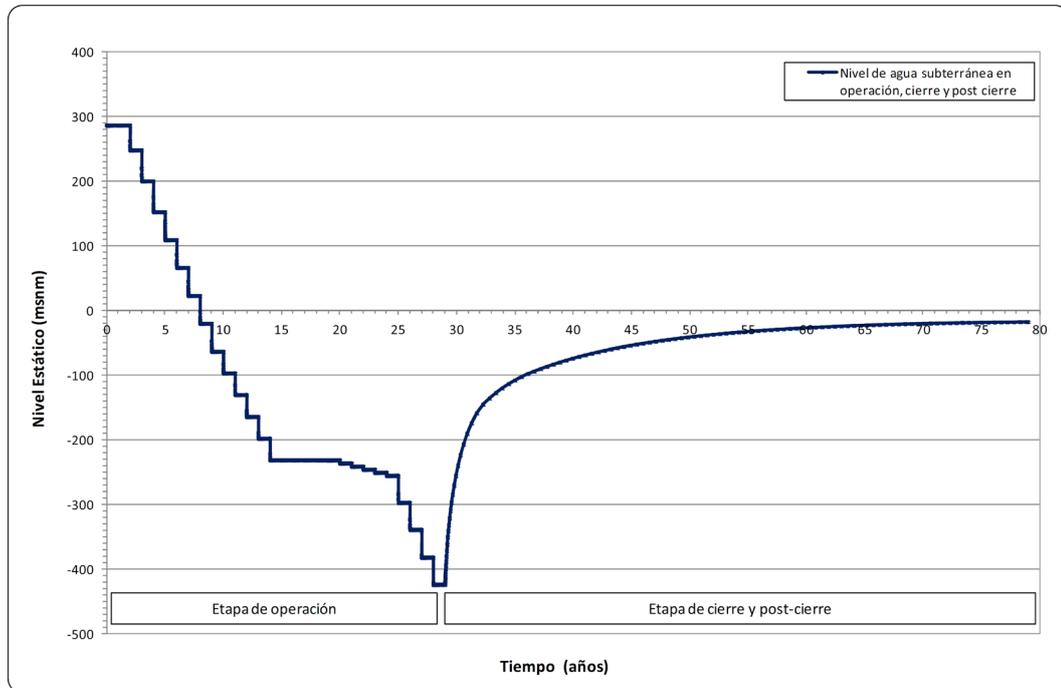
Al finalizar la etapa de operaciones ya no será necesario realizar el desagüe del tajo, lo que generará nuevos cambios en la dinámica del agua subterránea. El agua subterránea comenzará a recuperar su nivel hasta alcanzar su estado de equilibrio. Este proceso de estabilización se dará conjuntamente con el incremento de nivel de agua en el tajo abierto, lo que generará un espejo de agua.

Al paralizar el desagüe del tajo la filtración del agua subterránea hacia el tajo será rápida en los primeros años, disminuyendo a medida que se va incrementando el espejo de agua. El llenado del tajo va ser afectado por la alta evaporación que se produce en la zona del proyecto siendo de 1 233 mm/año (estación Acarí). El comportamiento de la laguna será sin rebose, debido a la gran profundidad del tajo (840 m) y a la escasa precipitación que se genera en la zona.

El llenado del tajo alcanzará su cota de equilibrio a partir del año 76 donde las variaciones anuales son mínimas (aproximadamente 20 cm). La cota de equilibrio

del nivel del lago se ubica a -17.86 msnm, con lo que el lago tendría una profundidad final aproximada de 400 m. En la Figura N° 5-9 se observa el desagüe y recuperación del agua subterránea.

**Figura N° 5-9. Desagüe y Recuperación del Agua Subterránea**



*Fuente: Elaboración Propia.*

Este proceso no generará efectos sobre los niveles de agua de los puntos de interés, analizados en la etapa de operación del proyecto, dado que las variaciones durante el desagüado fueron mínimas, la recuperación de niveles de agua no tendrá tampoco un efecto sobre el recurso.

## **CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Esta investigación tuvo como propósito evaluar la influencia del cono de depresión producto del abatimiento causado por el desagüe del tajo a cielo abierto proyectado durante la fase de operación y cierre del proyecto minero Pampa del Pongo y su impacto a los acuíferos Jahuay, Bella Unión y Zona costera.

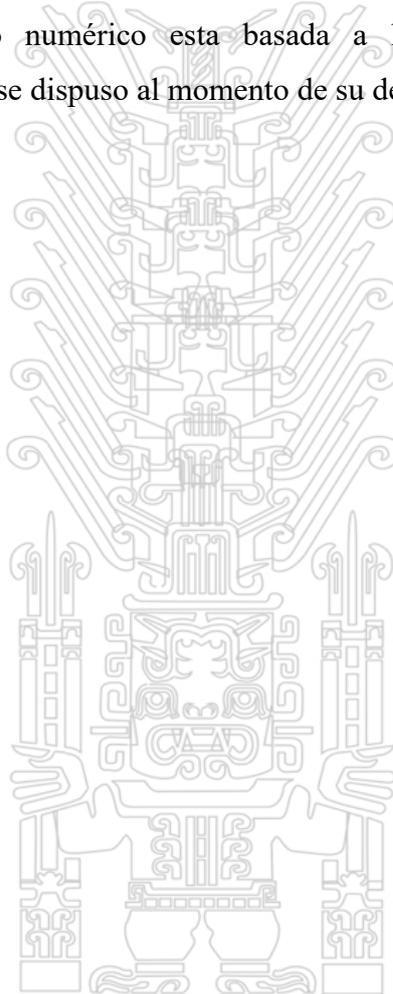
De los resultados obtenidos en esta investigación se puede deducir que el efecto de depresión máximo del nivel de agua subterránea en los acuíferos de Bella Unión y la Zona Costera a través de los pozos de control PO-PP-02 y PO-PP-06 son de 3 cm y 1 cm respectivamente, siendo éstos insignificantes debido a la lejanía de estos acuíferos al componente minero tajo, 20 km y 17 km aproximadamente, por ende no habrá un impacto significativo a los acuíferos donde se ubican zonas agrícolas o zonas de uso poblacional ligados al consumo de agua subterránea. Sin embargo el acuífero de Jahuay ubicado aproximadamente a 6 km al noreste del tajo, el cual es utilizado para proporcionar agua a la mina Shougan Hierro Perú S.A.A. sufrirá un descenso máximo de nivel de agua subterránea de 3.9 m, de acuerdo al pozo de control Marcona 3, ocasionando un impacto moderado al acuífero.

Esta evaluación no fue determinado en el estudio de SNC Lavalin en el año 2011 donde realizó el informe hidrogeológico sin la elaboración de un modelo numérico tan solo con una descripción hidrogeológica conceptual de las características físicas así como identificar fuentes de agua subterránea aledañas al proyecto determinando la geometría del reservorio acuífero, tanto lateral como vertical del área de estudio. ALEPH ASOCIADOS S.A.C. en el año 2012, tan solo realizó un estudio hidrogeológico en la zona de investigación con fines exploratorios, en el cual se caracterizó las formaciones hidrogeológicas y se realizó un análisis numérico de una sola capa y bajo régimen permanente, determinando las curvas equipotenciales de la zona, pero no llevándose a cabo un análisis predictivo de impactos. Dentro del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto de Explotación Mina Justa perteneciente a la empresa Marcobre S.A.C. si se llegó a evaluar y describir las características de esa zona de estudio y se llegó

a evaluar los impactos productos de sus nuevos componentes mineros, los cuales

fueron tomados en consideración para el análisis de empalme con el modelo numérico de Pampa del Pongo.

El desarrollo del análisis numérico para aguas subterráneas presentado en este tema de investigación, es una herramienta importante que permite predecir el comportamiento del agua subterránea a través del tiempo. El modelo que se desarrolló es un modelo regional construido con información limitada. En las zonas donde no se contó con información suficiente, se asumieron los parámetros hidráulicos en base a una revisión bibliográfica. La incertidumbre de los resultados del modelo numérico esta basada a la cantidad y calidad de información con la que se dispuso al momento de su desarrollo.



## **CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **7.1 Conclusiones**

- ✓ El descenso del nivel freático ocasionado por el desagüe del tajo, durante la operación de la mina será hasta la cota - 424 msnm en el año 29 (de acuerdo a la secuencia de minado), con un caudal de desagüe de 175.19 l/s o 15 136.42 m<sup>3</sup>/d.
- ✓ Producto del desagüe del tajo a cielo abierto se estima un descenso de aproximadamente 676 m de carga hidráulica del nivel freático (el nivel de agua promedio observado es 252 msnm en la zona del tajo) durante el periodo de operación de la mina. Este descenso del nivel freático se extiende en todas las direcciones.
- ✓ Dentro del área modelada se tiene que la influencia del cono de depresión en el último año de desagüe (año 29) tendrá 6 km de largo y 4.7 km de ancho y un área de 88 km<sup>2</sup> aproximadamente.
- ✓ El llenado del tajo alcanzará su cota de equilibrio a partir del año 76 donde las variaciones anuales son mínimas (aproximadamente 20 cm). La cota de equilibrio del nivel del lago se ubica a -17.86 msnm, con lo que el lago tendría una profundidad final aproximada de 400 m.

### **7.2 Recomendaciones**

- ✓ Profundizar los estudios hidrológicos, hidrogeológicos y de prospección geofísica en la zona de estudio, lo que permitirá estimar con mejor aproximación las características hidráulicas del reservorio acuífero y un mayor conocimiento de la variación espacial y temporal del mismo.
- ✓ Estudiar con mayor detalle el comportamiento de los niveles freáticos predominantes en la zona investigada para delimitar la geometría de los acuíferos evaluados.
- ✓ Para confirmar los datos predichos por el modelo numérico, se sugiere monitorear los piezómetros de control del nivel de agua subterránea en las mismas zonas evaluadas en el modelo (Jahuay, Bella Unión y Zona Costera). Los datos de niveles servirán para calibrar y mejorar la precisión del modelo numérico.

---

## CAPÍTULO VIII: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEPH ASOCIADOS S.A.C. (2012). *Estudio Hidrogeológico del Proyecto Minero Pampa del Pongo*. Lima: [s.n].
- AMEC PERÚ S.A. (2014). *Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Minero Pampa del Pongo*. Lima: [s.n].
- BISA. (2012). *Informe de Modelamiento Geológico, Geotécnico y Cálculo de Recursos de Hierro de Pampa del Pongo*. Lima: [s.n].
- BISA. (2012). *Informe Geológico de la Campaña de Perforación 2012*. Lima: [s.n].
- BRADLEY Y MDH. (2014). *Informe de Análisis de Estabilidad Física del Proyecto Pampa del Pongo*. Lima: [s.n].
- G. Shepley, M., I. Whiteman, M., J. Hulme, P., & W. Grout, M. (2012). *Groundwater Resources Modelling*. UK: Geological Society.
- Hadi, K., & Coptly, N. (2012). *Groundwater Modeling and Management under Uncertainty*. Kuwait: CRC Press.
- INRENA. (Enero de 2004). *Estudio Hidrológico de la Cuenca del Río Acari*. Recuperado el 12 de 01 de 2015, de Instituto Nacional de Recursos Naturales Dirección General de Aguas y Suelos: [http://www.ana.gob.pe/media/296523/estudio\\_hidrologico\\_acari.pdf](http://www.ana.gob.pe/media/296523/estudio_hidrologico_acari.pdf)
- INRENA. (Enero de 2007). *Estudio Hidrogeológico del Valle de Nazca*. Recuperado el 12 de 01 de 2015, de Intendencia de Recursos Hídricos: [http://www.ana.gob.pe/media/297157/estudio\\_hidrogeologico\\_nasca.pdf](http://www.ana.gob.pe/media/297157/estudio_hidrogeologico_nasca.pdf)
- K. Mishra, P., & L. Kuhlman, K. (2013). *Advances in Hydrogeology*. New York: Springer.
- N. Brooks, K., F. Ffolliott, P., & A. Magner, J. (2012). *Hydrology and the management of watersheds*. USA: Wiley-Blackwell .
- R. Fitts, C. (2012). *Groundwater Science*. USA: Elsevier.

## ANEXOS

### ANEXO 01 – HIDROGEOLOGÍA

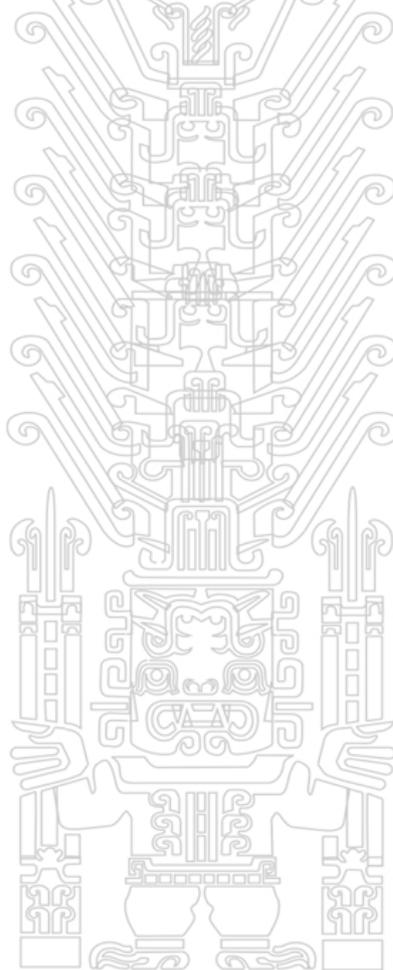
A-1 Registros de Perforación.

A-2 Diagramas de Instalación de Piezómetros.

A-3 Pruebas Hidráulicas.

A-4 Hidrogramas de Niveles de Agua Subterránea.

### ANEXO 02 – MAPAS



## GLOSARIO

**Acuicludo:** Es una formación geológica poco permeable, que conteniendo agua en su interior incluso hasta la saturación, no la transmite, por lo tanto no es posible su explotación. Generalmente los acuicludos son depósitos subterráneos de arcilla. **Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.02.**

**Acuífero:** Es aquel estrato o formación geológica permeable que permite la circulación y el almacenamiento del agua subterránea por sus poros o grietas. Dentro de estas formaciones podemos encontrarnos con materiales muy variados como gravas de río, limo, calizas muy agrietadas, areniscas porosas poco cementadas, arenas de playa, algunas formaciones volcánicas, depósitos de dunas e incluso ciertos tipos de arcilla. El nivel superior del agua subterránea se denomina nivel freático, y en el caso de un acuífero libre, corresponde al nivel freático. **Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.02.**

**Acuífero Confinado:** Son aquellos que están recubiertos por un terreno impermeable. El agua se encuentra a una presión superior a la atmosférica. Cuando se perfora un pozo en este tipo de acuíferos el agua asciende por él hasta alcanzar una altura que se denomina nivel piezométrico. En este caso, la roca permeable queda confinada por encima y por debajo en terrenos impermeables. Todo el espesor del acuífero está saturado de agua y la presión de agua en los poros o fisuras es mayor que la atmosférica. **Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.02.**

**Acuífero Libre:** Son aquellos en los cuales existe una superficie libre de formaciones impermeables, el agua encerrada en ellos se encuentra a presión atmosférica. La superficie del agua será el nivel freático y podrá estar en contacto directo con el aire o no, pero lo importante es que no tenga por encima ningún material impermeable. En estos acuíferos, al perforar pozos que los atraviesen total o parcialmente, el agua alcanza un nivel que sería el mismo que tendría

Tesis publicada con autorización del autor. No olvide citar esta tesis

UNFV

con el nivel piezométrico (nivel ideal que alcanzaría el agua a presión atmosférica). Existe una zona impermeable que sirve de base a una zona permeable saturada de agua. Más arriba, existe una franja permeable. En los acuíferos libres se habla de espesor saturado, que será menor o igual que el espesor del estrato o formación geológica correspondiente. **Jorge Oyarzún M. (2009). *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.02.***

***Acuíferos Semiconfinados:*** Son aquellos en los que el agua se encuentra a presión, igual que en los confinados (dicho más exactamente: su límite superior está a una presión superior a la atmosférica), pero alguna de las capas que lo confinan no es perfectamente impermeable y permite alguna filtración que contribuye en cierta proporción al caudal que se extrae del acuífero semiconfinado. Este tipo de acuíferos son mucho más frecuentes que los confinados, ya que en rocas sedimentarias son más abundantes las formaciones poco permeables que las absolutamente impermeables; aunque la permeabilidad de la capa confinante sea muy baja, siempre cederá una cierta cantidad de agua al acuífero semiconfinado. **Jorge Oyarzún M. (2009). *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.02.***

***Acuífugo:*** Son las formaciones que no pueden almacenar agua, ni transmitirla, como ocurre por ejemplo a los granitos no fisurados. **Jorge Oyarzún M. (2009). *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.02.***

***Acuitardo:*** Es una formación geológica semipermeable, que conteniendo apreciables cantidades de agua la transmiten muy lentamente, por lo que no son aptos para el emplazamiento de captaciones de aguas subterráneas, sin embargo bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical de otros acuíferos. **Jorge Oyarzún M. (2009). *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.02.***

***Aforo:*** Medida de Caudal (de un río, manantial, etc.). **Jorge Oyarzún M. (2009). *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile.***

**Anisotropía:** Cualidad de los materiales en los que el comportamiento varía según la dirección considerada. En el caso de las aguas subterráneas es especialmente importante la anisotropía que consiste en la existencia de valores significativamente diferentes de conductividad hidráulica horizontal y vertical. **Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.02.**

**Balance Hídrico (de un acuífero):** Cuantificación de las cantidades de agua recibidas o aportadas en un periodo determinado por un acuífero, expresada en forma de ecuación, de tal modo que la diferencia entre las entradas y las salidas debe ser igual a la variación de las reservas (del agua almacenada) en el periodo considerado. **Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.03.**

**Conductividad Hidráulica:** La conductividad hidráulica representa la mayor o menor facilidad con la que el medio deja pasar el agua a través de él por unidad de área transversal a la dirección del flujo. Tiene las dimensiones de una velocidad ( $L T^{-1}$ ) y modernamente se distinguen dos tipos: la conductividad hidráulica darciana o lineal, KD y la conductividad hidráulica turbulenta, KT. **Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.03.**

**Coefficiente de Almacenamiento:** Relación entre el volumen de agua liberado por una columna de acuífero de superficie unidad, cuando el nivel piezométrico desciende una unidad, y un volumen unitario de acuífero. En los acuíferos confinados este valor depende muy directamente de la compresibilidad y la expansibilidad del agua y del medio acuífero y del espesor de éste. En los acuíferos libres, el coeficiente de almacenamiento equivale en la práctica a la porosidad eficaz. **Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.03.**

**Cono de Abatimiento:** Estas extracciones de agua implican un descenso del nivel freático en los alrededores del pozo o desagüe de pozo dando lugar al llamado cono de abatimiento o cono de depresión cuyo tamaño depende de la cantidad de

el cono de depresión irá aumentando de tamaño progresivamente de modo que pueden secarse algunos pozos situados en los alrededores del cono de abatimiento.

**Jorge Oyarzún M. (2009). *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.03.***

**Curvas Equipotenciales:** Las líneas equipotenciales, curvas que unen puntos con igual potencial hidráulico (en la sección vertical o en la horizontal) y, por tanto, representan la altitud o cota absoluta de la superficie freática (o de la superficie piezométrica en general). **Jorge Oyarzún M. (2009). *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.03.***

**Discretización:** La discretización es un proceso matemático mediante el cual vamos a obtener resultados aproximados de la ecuación diferencial del problema. **Jorge Oyarzún M. (2009). *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.03.***

**Gradiente Hidráulico:** El agua subterránea se mueve en la dirección en que decrece el potencial hidráulico total, de manera que si se mantienen constantes todos los demás factores, la cuantía del movimiento de aquella en el seno de la zona saturada depende del gradiente hidráulico. El gradiente hidráulico (i) se define como la pérdida de energía experimentada por unidad de longitud recorrida por el agua; es decir, representa la pérdida o cambio de potencial hidráulico por unidad de longitud, medida en el sentido del flujo de agua. **Jorge Oyarzún M. (2009). *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.04.***

**Isopieza o Línea Isopiezométrica:** Éste término se utiliza a menudo como equivalente a la curva de nivel de la superficie piezométrica. Sin embargo tal utilización es incorrecta pues el término isopieza significa literalmente “igual presión“, carácter que realmente es propio de cualquier línea situada sobre la superficie piezométrica, dado que todos los puntos de ésta se encuentran a presión atmosférica. Por esta razón las curvas de nivel de la superficie piezométrica deben ser denominadas mas propiamente como hidroisohipsas. **Jorge Oyarzún M. (2009). *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.04.***

Tesis publicada con autorización del autor

No olvide citar esta tesis

**Manantial:** Un manantial o naciente es una fuente natural de agua que brota de la

tierra o entre las rocas. Puede ser permanente o temporal. Se origina en la filtración de agua, de lluvia o de nieve, que penetra en un área y emerge en otra de menor altitud, donde el agua no está confinada en un conducto impermeable. **Jorge Oyarzún M. (2009). *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.07.***

***Mina a Cielo Abierto:*** Se llaman minas a cielo abierto, y también minas a tajo (o tajo) abierto, a las explotaciones mineras que se desarrollan en la superficie del terreno, a diferencia de las subterráneas, que se desarrollan bajo ella. Para la explotación de una mina a cielo abierto, a veces, es necesario excavar, con medios mecánicos o con explosivos, los terrenos que recubren o rodean la formación geológica que forma el yacimiento. Estos materiales se denominan, genéricamente, estéril, mientras que a la formación a explotar se le llama mineral. El estéril excavado es necesario apilarlo en escombreras fuera del área final que ocupará la explotación, con vistas a su utilización en la restauración de la mina una vez terminada su explotación. Las minas a cielo abierto son económicamente rentables cuando los yacimientos afloran en superficie, se encuentran cerca de la superficie, con un recubrimiento pequeño o la competencia del terreno no es estructuralmente adecuada para trabajos subterráneos (como ocurre con la arena o la grava). Cuando la profundidad del yacimiento aumenta, la ventaja económica del cielo abierto disminuye en favor de la explotación mediante minería subterránea. **Jorge Oyarzún M. (2009). *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.07.***

***Modelo Conceptual:*** Representación teórica simplificada de la realidad de un sistema acuífero; la elaboración de un modelo exige definir la estructura del sistema (límites, características geométricas, etc.) y formular las leyes que relacionan las entradas del sistema y sus respuestas (salidas), de acuerdo con los parámetros que intervienen en dichas relaciones. **Jorge Oyarzún M. (2009). *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.07.***

***Modelo Numérico:*** El término se refiere generalmente a un modelo consistente en la formulación matemática de las relaciones entre las impulsiones y las respuestas del sistema (entradas – salidas), teniendo en cuenta los parámetros físicos del

acuífero. Un modelo de este tipo consigue simular, con auxilio del tratamiento de datos del ordenador, el comportamiento del acuífero frente a diferentes actuaciones o escenarios sobre el mismo. *Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.07.*

**Piezómetro:** Pozo o sondeo utilizado para medir la altura piezométrica en un punto dado de un acuífero. *Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.13.*

**Porosidad Eficáz:** Relación entre el volúmen de agua gravífica (agua que una roca o sedimento puede liberar por efecto exclusivamente de la gravedad) y el volúmen total de la roca o sedimento. *Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.13.*

**Potencial Hidráulico:** Si se construye un pozo hasta una profundidad dada dentro de la zona saturada del sustrato y se instala la rejilla o tubería filtrante exclusivamente en ese punto, el agua ascenderá por el interior de la tubería del pozo hasta una altura determinada, en que se encuentre en equilibrio con la presión atmosférica. Dicha altitud o cota absoluta corresponde al potencial hidráulico de ese punto, y físicamente representa, en altura, la energía de que dispone el agua en el punto considerado del subsuelo. *Jorge Oyarzún M. (2009). Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.13.*

**Transmisividad:** La transmisibilidad o transmisividad hidráulica de un acuífero es la tasa de flujo bajo un determinado gradiente hidráulico a través de una unidad de anchura de acuífero de espesor dado, y saturado. Es el producto del espesor saturado de dicho acuífero y la conductividad hidráulica (K). Se mide en una unidad de superficie dividido en una unidad de tiempo. Tiene dimensiones:  $[m^2]/[día]$  o  $L^2 \cdot T^{-1}$ . En otras palabras, transmisividad (T), es el volumen de agua que atraviesa una banda de acuífero de ancho unitario en la unidad de tiempo y bajo la carga de un metro. Es representativa de la capacidad que tiene el acuífero para ceder agua. Se pueden distinguir dos tipos de transmisividad: la transmisibilidad darciana o lineal, TD ( $TD = m \cdot KD$ ) y la transmisibilidad

conductividad hidráulica darciana no sólo depende de las características del medio, sino también de las del fluido (su viscosidad y peso específico), por lo que se estableció una relación entre KD, las propiedades del fluido y una característica intrínseca del medio que es independiente del fluido que circula a través de él. Esa característica se denomina permeabilidad intrínseca o geométrica y se representará por el símbolo k. **Jorge Oyarzún M. (2009). *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.18.***

**Recarga Artificial:** Procedimiento por el que se inyecta o añade en un acuífero agua desde la superficie. Puede realizarse por distintos métodos, ya sea favoreciendo la infiltración en su superficie (método solo aplicable a acuíferos libres) o procediendo a inyectar en una perforación (en acuíferos confinados es la única solución viable). **Jorge Oyarzún M. (2009). *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.19.***

**Zona No Saturada:** Es la zona comprendida entre las superficie del terreno y el nivel piezométrico, en la que los poros que existen en la roca o en el suelo contienen agua, a presión inferior a la atmosférica, además de aire y otros gases. **Jorge Oyarzún M. (2009). *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.20.***

**Zona Saturada:** Zona de un acuífero en las que los poros están ocupados en su totalidad por agua. **Jorge Oyarzún M. (2009). *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad de la Serena-Chile. Pag.20.***