

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO

DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMÉRICA LATINA
EDICIÓN 2019



TEMA:

***“DIAGNÓSTICO Y PROPUESTA PARA OPTIMIZACIÓN DE LAS
CONDICIONES OPERATIVAS DE UN POZO GEOTÉRMICO
PRODUCTOR EN EL SALVADOR”.***

PRESENTA:

Alegría Orellana, Paola Marcela.
Flamenco Ramos, Álvaro René.
Román Márquez, Estefany Adelina.

ASESORES:

Ing. Jorge Alberto Castillo.
Ing. Miguel Antonio Servellón.

Ciudad Universitaria, noviembre 2019

Resumen:

El presente documento contiene en detalle el análisis de las condiciones operativas del pozo productor AD-4Bis que aporta con flujo de vapor a una central geotérmica en El Salvador. El análisis se centró en la evaluación de sus condiciones operativas para determinar si es factible realizar algún tipo de acción correctiva que contribuya al incremento de su producción. Entre los aspectos verificados están: la revisión del histórico de datos de producción como: presión, temperatura, flujo y entalpía; verificación de aspectos mecánicos de operación como vibraciones y caída de presión y, por último, una inspección del entorno de la plataforma para identificar posibles obras de mitigación por realizar. Entre las condiciones operativas verificadas durante la visita de campo está la excesiva caída de presión (tres bares) entre el contrapozo y las estaciones de separación; también la tubería presenta vibraciones mecánicas atribuidas principalmente al tipo flujo bifásico y la falta de rigidez de la tubería debido a que, el tramo que vibra está sin hacer contacto con los soportes existente; por último, el suelo de la plataforma presenta una saturación de agua, principalmente meteórica, provocando acumulación de agua en zonas de la plataforma aumentando el riesgo de accidente para las personas que ahí realizan sus labores operativas. En esta última parte también se realizó un análisis de gases difusos para determinar si el suelo de la plataforma se está alterando por la extracción de fluidos desde el reservorio. Al final se presenta una propuesta integral, que inicia con el análisis de las condiciones de operación y así determinar las alternativas de mejora que permita hacer una extracción más eficiente y segura del fluido bifásico.

Abstract:

This document contains in detail the analysis of the operating conditions of the AD-4Bis production well that provides steam flow to a geothermal power plant in El Salvador. The analysis was focused on the evaluation of its operating conditions to determine if it is feasible to perform any type of corrective action that contributes to the increase of its production. Among the verified aspects is the review of the historical production data such as: pressure, temperature, flow and enthalpy; verification of mechanical aspects of operation such as vibrations and pressure drop and, finally, an inspection of the platform environment to identify possible mitigation works to be performed. Among the operational conditions it was verified during the field visit is the excessive pressure drop (three bars) between the well head and the separation stations; also the pipe has mechanical vibrations attributed mainly to the two-phase flow type and the lack of rigidity of the pipe since the section that vibrates is without making contact with the existing supports; Finally, the floor of the well pad has a water saturation, mainly meteoric, causing water accumulation in areas of the platform increasing the risk of accident for people who perform their operational work there. In this last part, a diffuse gas analysis was also carried out to determine if the platform floor has been altered modified by the extraction of fluids from the reservoir. At the end, an integrated proposal is presented that begins with the analysis of the operating conditions and thus determines the improvement alternatives that allow a more efficient and safe extraction of the two phase fluid.

Contenido

Resumen:.....	3
Abstract:.....	4
1 Objetivos.....	9
1.1 General:.....	9
1.2 Específico:.....	9
2 Alcances del documento.....	9
3 Antecedentes.....	10
3.1 Diseño del pozo.....	12
3.2 Principales hallazgos encontrados en la plataforma AD-4Bis.....	14
4 Planteamiento del problema.....	16
5 Metodología empleada para evaluar las condiciones operativas.....	17
6 Planteamiento de la solución.....	18
6.1 Análisis de las vibraciones mecánicas en tubería.....	18
6.1.1 Identificación de las causas de vibración en la tubería.....	20
6.1.1.1 Simulación del flujo en el pozo.....	24
6.1.1.2 Reducción de pérdidas de presión en tubería de acarreo.....	25
6.1.2 Relación entre velocidad de vibración y el esfuerzo admisible.....	27
6.1.2.1 Velocidad de vibración admisible.....	29
6.1.3 Análisis de resultados.....	32
6.2 Comportamiento de la entalpía del pozo AD-4Bis con respecto al incremento de masa extraída del reservorio.....	34
7 Saturación de agua en el suelo de la plataforma AD-4Bis.....	36
7.1 Planteamiento de la condición operativa actual.....	36
7.2 Propuesta de mejora y recomendaciones.....	39
8 Análisis de gases difusos en la plataforma del pozo en estudio.....	44
8.1 Flujo de H ₂ S (g/m ² día).....	44
8.2 Diferencial de concentración de He (ppm).....	45
8.3 Concentración de CO ₂ (ppm).....	46
8.4 Flujo de CO ₂ (g/m ² día).....	47
8.5 Temperatura del suelo (°C).....	48
8.6 Concentración total de H ₂ S (ppm).....	49

8.7	Diferencial de concentración de H ₂ (ppm)	50
8.8	Concentración de Hg (ppm).....	51
8.9	Conclusión del análisis geoquímico del pozo	52
9	Conclusiones.....	53
10	Recomendaciones.....	55
11	Bibliografía.....	56
12	Anexos	58
12.1	Resultado de la simulación en hora para un flujo de 100 kg/s.....	58
12.2	Resultado de la simulación en hora para un flujo de 115 kg/s.....	59
12.3	Resultado de la simulación en hora para un flujo de 150 kg/s.....	60
12.4	Gráficos me medición de velocidad de vibración en punto p5.....	61

Índice de tablas

Tabla 1	Registro promedio de variables termodinámicas (Quijano, 2019).	11
Tabla 2	Desplazamiento y frecuencia máxima medida.....	20
Tabla 3	Velocidad y frecuencia máxima medida.....	20
Tabla 4	Mediciones de velocidad y desplazamiento (máximos, RMS), medidos.	20
Tabla 5	Resumen de la simulación de flujo bifásico ascendente en el pozo AD-4bis, variando el flujo y la presión de cabezal (elaboración propia).	24
Tabla 6.	Resumen de caída de presión para diferentes condiciones de flujo.	26
Tabla 7	Compilación de velocidad de vibración en tubería (MERIKOSKI, 2017)	32
Tabla 8	Presupuesto estimado para ejecutar obras de mitigación y mejora de drenaje de agua lluvia en plataforma.	43

Índice de figuras

Fig. 1	Registro de producción de energía bruta y neta de la central geotermoeléctrica (Quijano, 2019)	10
Fig. 2	Histórico de producción de líquido y vapor del pozo AD-4bis (Quijano, 2019)	10
Fig. 3	Gráfico de la evolución de la presión de cabezal y separación a lo largo del tiempo (Quijano, 2019)	11
Fig. 4	Diseño del pozo productor AD-4Bis. (Quijano, 2019).....	12
Fig. 5	Registro de presión y temperatura contra la profundidad, Pozo AD-4Bis (Quijano, 2019).	13
Fig. 6	Curva de producción del pozo AD-4Bis, elaboración propia con datos de (Quijano, 2019).....	14

Fig. 7 Vista alzada del árbol del contrapozo AD-4Bis. El punto P0 y P6 representa el tramo de tubería analizada con mayor nivel de vibración según mediciones in-situ.	15
Fig. 8 Vista alzada de estación de separación tipo Webre de 550 tph.	15
Fig. 9 Esquema de conexión de pozo y estaciones de separación. Encerrado en línea discontinua el sistema de tubería objeto de análisis.	16
Fig. 10 Sistema de tubería para transporte de flujo bifásico analizada. Los puntos indicados representan la ubicación del sensor para medición de velocidad y amplitud de la vibración.	18
Fig. 11 Modelo del sistema de tubería analizado con los de puntos de muestreo de vibraciones (elaboración propia).	19
Fig. 12 Equipo empleado para medición de vibraciones fabricado por PROFTECHNIK. ..	19
Fig. 13 Flujo para identificar las causas o fenómenos detrás de las vibraciones (MERIKOSKI, 2017).	21
Fig. 14 Diferentes patrones de flujo para tubos verticales (Kaneko, 2014)	22
Fig. 15 Diferentes patrones de flujo para tubos verticales (Kaneko, 2014)	23
Fig. 16 ejemplo de fuerzas inducida por el fluido en accesorios de tubería (MERIKOSKI, 2017).	23
Fig. 17 Modelo de tubería superficial existente entre pozos y estaciones separadoras.	25
Fig. 18 Modelo de tubería propuesta entre pozos y estaciones separadoras. La propuesta sugiere el cambio de accesorios en la salida del contrapozo y la ampliación de diámetro de la tubería (Propuesta de Quijano. J, 2006).	25
Fig. 19 A) Configuración árbol de contrapozo existente; B) Configuración de árbol de contrapozo propuesto.	26
Fig. 20 Composición de una señal de vibración compleja en sus ondas fundamentales (Leishear, 2009).	27
Fig. 21 Formas de vibración de una viga con un extremo empotrado y otro libre. W1 es la frecuencia fundamente, W2 es el primer armónico de 3. (Coleman, 2019).	28
Fig. 22 Definición de esfuerzo alternante en un material (Alan, 2016)	28
Fig. 23 curva de fatiga (S-N), para aleaciones de acero. (Leishear, 2009)	29
Fig. 24 Gráfico de velocidad límite de acuerdo a Gamble y Tagart (MERIKOSKI, 2017) ..	31
Fig. 25 Frecuencia natural para diferentes diámetros de tubería y distancia entre soportes. 1) más flexible, 2) más rígida. (Energy Institute, 2019)	33
Fig. 26 Diagrama de flujo de procedimiento para evaluación de vibraciones, basado en diagrama de (Fei, Lei, & Wenxin, 2012).	34
Fig. 27 Cambios de las entalpias del fluido con respecto al tiempo del pozo productor. ...	35
Fig. 28 A) Vegetación existen la mayor parte del año; B) Saturación de árboles, en crecimiento desordenado, afectan para la permeabilidad de la zona.	37
Fig. 29 El Exceso de humedad, provoca en el terreno una especie de inestabilidad B) Saturación del agua, falta de evacuación.	37
Fig. 30 A) Canaleta Sur, de 98m de longitud B) Canaleta Este, de 15m de longitud.	38
Fig. 31 A) Obstrucción a la caja de recolección de agua B) Obstrucción de canaleta al salir de la plataforma.	38

Fig. 32 Problemática de inundación, soportes de ramas, entra tubería y bases de anclaje.	39
Fig. 33 A) Plataforma en época seca; B) plataforma en época húmeda.....	40
Fig. 34 Propuesta de canaleta sostenible (elaboración propia).....	42
Fig. 35 Propuesta de sistema de canaletas y badenes. A) Badenes norte-sur con conexión a canaleta sostenible; B) badén proyectado norte-sur a canaleta existente y C) Canaleta proyectada a conectarse con existente.	43
Fig. 36 Mapeo del flujo de H ₂ S en la plataforma del pozo.....	44
Fig. 37 Mapeo de la concentración de He en la plataforma del pozo.....	45
Fig. 38 Mapeo de la concentración de CO ₂ en la plataforma del pozo.....	46
Fig. 39 Mapeo del flujo de CO ₂ en la plataforma del pozo.....	47
Fig. 40 Mapeo de la temperatura del suelo en la plataforma del pozo.....	48
Fig. 41 Mapeo de la concentración de H ₂ S en la plataforma del pozo.	49
Fig. 42 Mapeo de la concentración de H ₂ en la plataforma del pozo.....	50
Fig. 43 Mapeo de la concentración de Hg en la plataforma del pozo.....	51
Fig. 44 Ilustración resumen del fenómeno constatado en la plataforma del pozo.....	52

1 Objetivos

1.1 General:

Evaluación las condiciones operativas y de las instalaciones superficiales de un pozo geotérmico productor en El Salvador, identificando oportunidades de mejora para hacer más eficiente su producción de fluido geotérmico.

1.2 Específico:

- Analizar el registro histórico de mediciones de variables termodinámicas principales del pozo para caracterizar el comportamiento de la producción a lo largo del tiempo.
- Realizar una lista de condiciones operativas actuales y análisis de las mismas para determinar posibles condiciones de mejora en la producción.
- Proponer acciones de mejora para optimizar y/o corregir condiciones operativas en la plataforma según análisis.

2 Alcances del documento

- Análisis de datos históricos de producción (termodinámicos y/o químicos) para analizar la evolución de la producción en el tiempo.
- Medición, cálculo y diagnóstico de la caída de presión en el sistema bifásico.
- Medición de vibraciones mecánicas en la tubería y estimar si las mismas son permisibles.
- Evaluación de alternativas para el incremento de la producción de flujo bifásico.
- Propuestas de readecuación de plataforma (elementos de operación) y de obras civiles encaminadas al drenado efectivo de agua meteórica acumulada en el lugar.
- Elaboración de propuesta de modificación de los equipos superficiales según análisis estructural, térmico e hidráulico realizado.

3 Antecedentes

El pozo productor, en el cual se centra el análisis de este documento, es un pozo que presenta una condición excepcional respecto al resto de pozos dada su alta producción de flujo bifásico que supera a la de los demás que componen el grupo de pozos productores que alimentan la central geotérmica. En cuanto a la central, éste es a condensación, de 95 MWe instalados, que inició su operación en El Salvador a mediados de 1975. Según registro histórico, la producción bruta promedio de la planta está entre 85 a 87 MWe y la inyectada de entre 76 a 78 MWe. Gráficamente los datos de diez años se muestran en la figura siguiente.

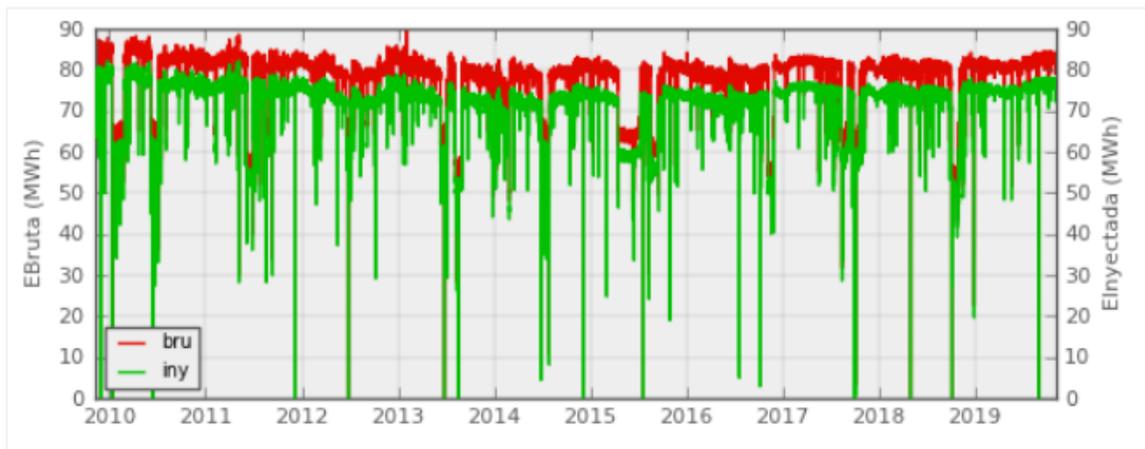


Fig. 1 Registro de producción de energía bruta y neta de la central geotermoeléctrica (Quijano, 2019)

En términos porcentuales, el aporte de flujo bifásico del pozo, denominado como AD-4Bis, representa un 13% de los 895 kg/s de flujo bifásico extraído del reservorio con calidad media de 18%. En cuanto vapor, el AD-4Bis aporta un promedio de 28.5 kg/s ó 17.1 % respecto al flujo de vapor total de la planta, siendo el más alto de todos los pozos.

En la tabla 1 se presenta el histórico de la producción de líquido y vapor del pozo a lo largo del tiempo desde su puesta en operación en 1996.

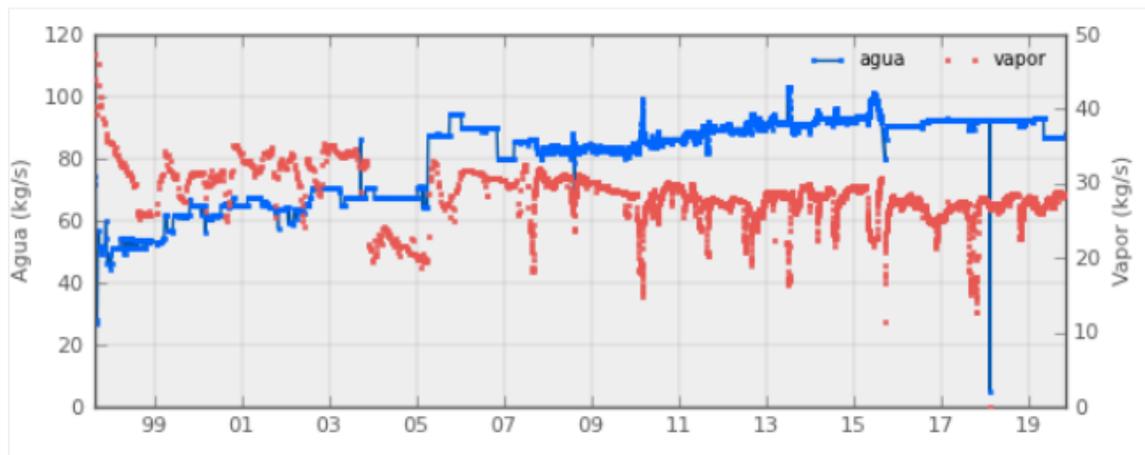


Fig. 2 Histórico de producción de líquido y vapor del pozo AD-4bis (Quijano, 2019)

Respecto a sus condiciones operativas, en la figura 2, se observa la evolución de la presión a lo largo del tiempo, mostrando una tendencia muy estable. El promedio de los registros de las variables termodinámicas se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 1 Registro promedio de variables termodinámicas (Quijano, 2019).

Variable medida	Magnitud promedio
PCab(bar-g)	7.90
PSep(bar-g)	5.23
Agua(kg/s)	87.25
vapor(kg/s)	27.78
x	0.24
h(kJ/kg)	1180.10

La variación de las presiones de cabezal y separación, desde su puesta en operación hasta la fecha, son presentadas en la gráfica de la figura 3.

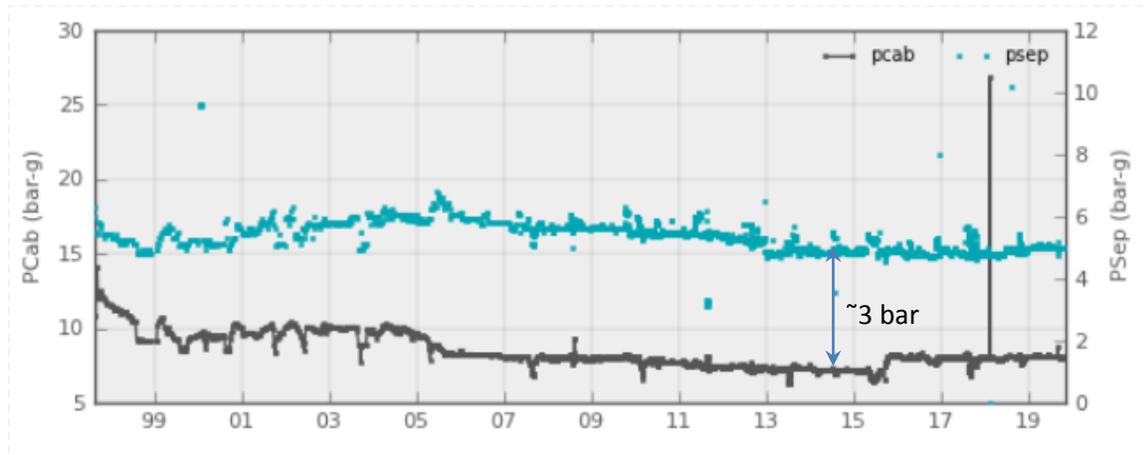


Fig. 3 Gráfico de la evolución de la presión de cabezal y separación a lo largo del tiempo (Quijano, 2019)

Según el gráfico de la figura 3, la caída de presión entre el cabezal del pozo y la estación de separación ha superado los 2 bar y en los últimos años se ha incrementado hasta 3.5 bar, siendo esto una condición anómala ya que, como criterio comúnmente aceptado, la caída de presión en la línea de acarreo bifásico debería ser menor o igual que 0.5 bar.

Lo anterior tiene relación con la cantidad de flujo bifásico extraído, así como también, el medio de transporte o sistema de acarreo utilizado entre el contrapozo y las estaciones de separación.

De acuerdo con lo anterior, si bien es cierto que este pozo tiene una gran contribución a la generación (12 MWe en promedio), sus condiciones operativas, según registros analizados, no son las más adecuadas y una de estas en la caída de presión en el sistema bifásico, por lo que es oportuno el cuestionamiento si al reducir la presión de cabezal del pozo, su flujo incrementaría y en qué magnitud. Para responder a lo anterior se analizó el diseño del pozo desde su construcción, el detalle en el apartado 3.1.

3.1 Diseño del pozo

El pozo AD-4Bis fue perforado en 1996 y es el remplazo del pozo AD-4, perforado a principio de los años 70s, que fue abandonado a principio de los años 90s por un colapso en su tubería de producción y la imposibilidad de ser recuperado.

El nuevo pozo AD-4Bis tiene características similares que su antecesor y su profundidad total es de 650 m. En la figura 4, se muestra las tres etapas que lo componen con sus respectivos diámetros de agujero y tubería de revestimiento. Como dato adicional, este pozo no posee tubería ranurada (Liner) como consecuencia de que durante su perforación y por falta de suficiente agua para controlar las descargas de gases y vapor, el pozo no pudo ser enfriado. De todo el campo geotérmico, éste es el único que no posee tubería ranurada.

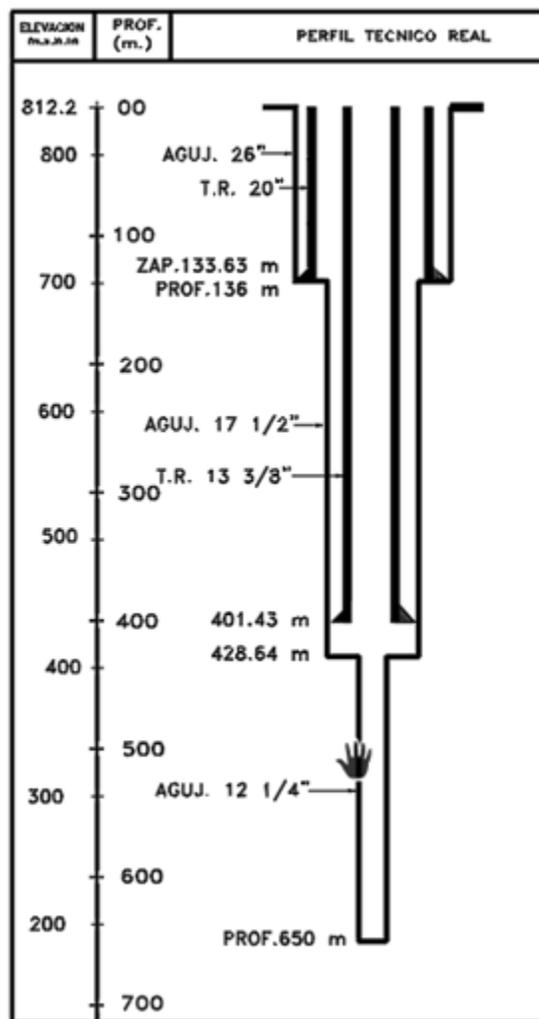


Fig. 4 Diseño del pozo productor AD-4Bis. (Quijano, 2019)

Por lo anterior, el diámetro efectivo del pozo es de $\phi 12 \frac{1}{4}$ ", un diámetro mayor que el estándar para la época.

Por otro lado, en la figura 5 se muestran el perfil P&T y una de las pruebas de producción del pozo. Según se observa, la temperatura a 600 metros es de aproximadamente 207.5 °C, con lo cual se puede estimar que el gradiente térmico es de 0.3°C/m, aproximadamente.

Otro dato importante es la presión de cabezal sin fluir, indicando que su nivel estático de agua está por encima del contrapozo lo cual significa que este pozo es del tipo artesiano.

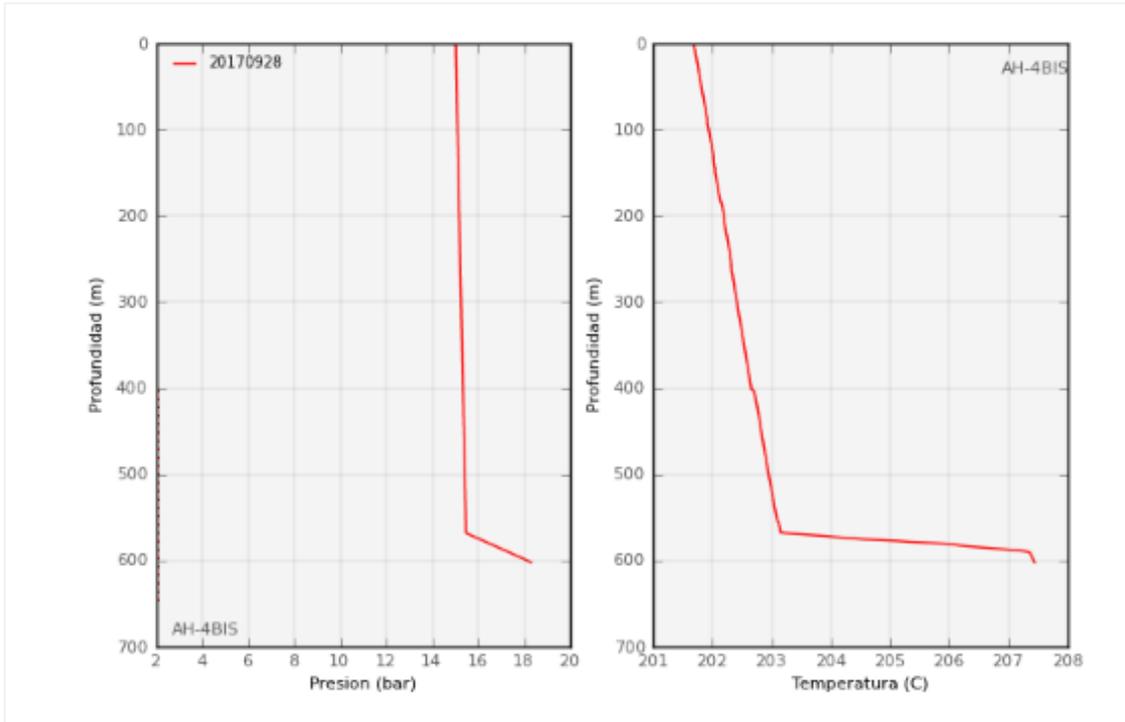


Fig. 5 Registro de presión y temperatura contra la profundidad, Pozo AD-4Bis (Quijano, 2019).

En cuanto a la producción del pozo, este se muestra en la figura 6, en el cual se aprecia la tendencia de la producción con respecto a la presión de cabezal.

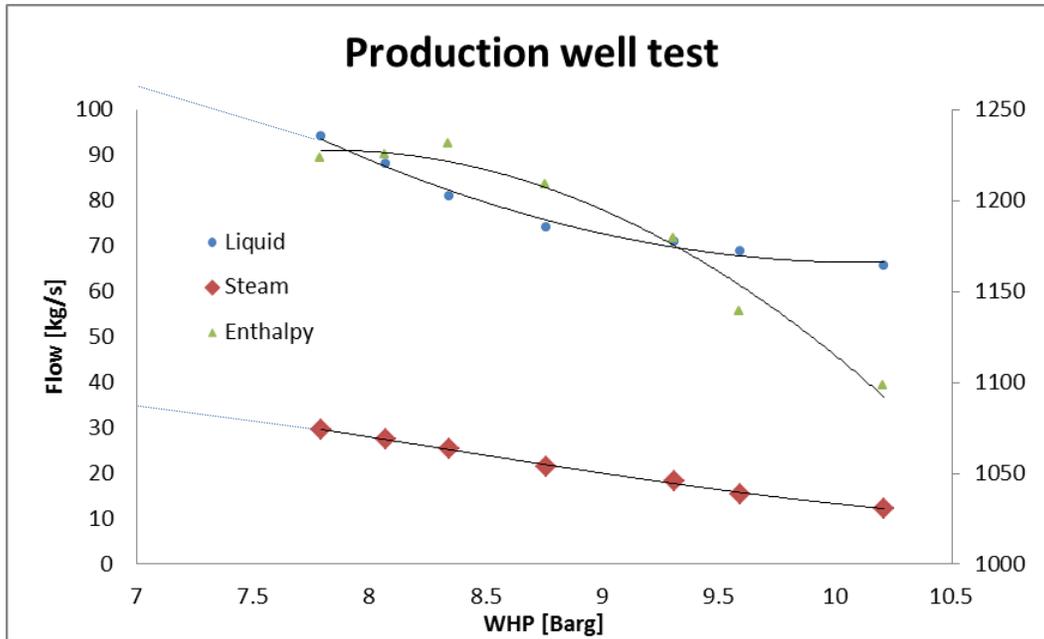


Fig. 6 Curva de producción del pozo AD-4Bis, elaboración propia con datos de (Quijano, 2019)

3.2 Principales hallazgos encontrados en la plataforma AD-4Bis

La razón por la cual se ha seleccionado la plataforma AD-4Bis para su estudio es debido al grado de importancia relativa que tiene su producción de vapor con respecto al total que necesita la central para poder operar; por lo que cualquier proyecto que se implemente tendrá una mayor relación costo/beneficio.

Con la justificación anterior se procedió a realizar una visita a la plataforma del pozo en la cual se evaluaron los componentes de las instalaciones superficiales, tales como:

1. Estado de obras civiles (condiciones de bases de soporte de tuberías y equipos de separación, estado de la terraza de la plataforma, drenajes de aguas lluvias, entre otros).
2. Evaluación mecánica de las instalaciones superficiales en tubería y equipo de separación (vibraciones, ruidos, desplazamientos excesivos por dilataciones, fugas en drenajes, grietas en tubería y soportes).
3. Revisión de parámetros operativos como, caída de presión en línea bifásica.

Entre las condiciones bajo las cuales está operando el pozo está el nivel de vibraciones de la tubería bifásica, principalmente en los primeros 20 metros desde el punto P0. Además, la superficie de la plataforma presenta saturación de agua meteórica que eleva el nivel de agua entre uno y tres centímetros.

En la figura 7, se muestra el contrapozo AD-4Bis y parte de la tubería bifásica que conecta con las dos estaciones de separación (ver figura 8) del pozo.



Fig. 7 Vista alzada del árbol del contrapozo AD-4Bis. El punto P0 y P6 representa el tramo de tubería analizada con mayor nivel de vibración según mediciones in-situ.



Fig. 8 Vista alzada de estación de separación tipo Webre de 550 tph.

Para ilustrar el sistema objeto de análisis, en la figura 8, se presenta el esquema con la conexión entre el pozo AD-4Bis y los equipos de separación desde donde se separa el

flujo bifásico en líquido y vapor. El sistema objeto de análisis es el que se muestra con una línea discontinua.

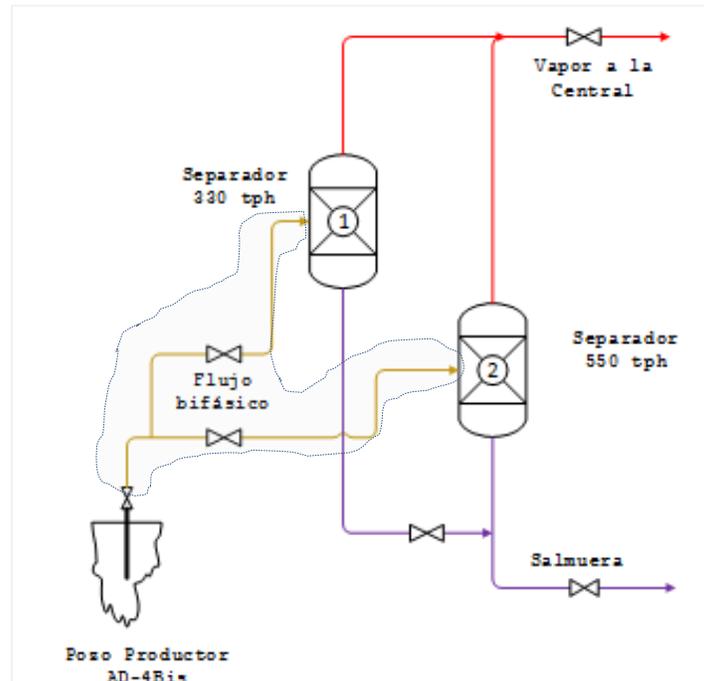


Fig. 9 Esquema de conexión de pozo y estaciones de separación. Encerrado en línea discontinua el sistema de tubería objeto de análisis.

4 Planteamiento del problema

Sobre la base de las observaciones hechas en el lugar tales como: vibraciones apreciables en el sistema de acarreo de flujo bifásico, caída de presión excesiva y saturación de agua en la terraza; las condiciones pueden o no derivar a futuro en un problema y, para determinarlo, se deberá medir y analizar las variables involucradas para concluir sobre el fenómeno que genera la condición anormal de funcionamiento.

En cuanto a las vibraciones mecánicas, lo más probable es que sean inducidas por el patrón de flujo bifásico que pasa por la tubería de conducción en superficie, pero que también, asciende desde el reservorio. Lo anterior, dependiendo de la magnitud de la velocidad y amplitud de la oscilación, puede provocar fatiga en el material de la tubería y por lo tanto una falla súbita; por lo que fue oportuno cuantificar el nivel de vibraciones y compararlo contra lo que recomienda la norma de referencia con mayor aplicación en la industria geotérmica (ASME OM-3).

Para el caso de la excesiva caída de presión de tres bares en la tubería de conducción, cuando la referencia es menor o igual que 0.5 bar, ésta es una condición evidente de operación anormal, la cual puede ser corregida ya sea cambiando el diámetro de la tubería, actualmente con un tramo en $\phi 24''$ y otro $\phi 20''$, y optimizando la cantidad de accesorios instalados como válvulas, discos de placa y orificios. Una alta caída de presión

incrementa también la presión de cabezal del pozo lo cual, según la curva de operación de la figura 6, reduce la producción de flujo del pozo.

Con base a lo anteriormente expuesto, una revisión de la caída de presión en la tubería podría significar una mayor producción de vapor e incremento en la generación global de la planta.

Con respecto a la saturación con agua del suelo de la plataforma, esta es una condición operativa que puede generar subsidencia en las bases de la tubería de acarreo y equipo de separación, además de generar una condición insegura al personal que permanece o visita la plataforma (vigilantes y personal operativo). Por lo anterior se realizó una propuesta de mejora del sistema de drenaje de agua meteórica que cae en la plataforma, éste será presentado más adelante.

5 Metodología empleada para evaluar las condiciones operativas

Para solucionar y/o mitigar las condiciones de operación antes citadas, en cada una se planteó la estrategia a seguir:

- A1. *Vibraciones mecánicas en tubería de flujo bifásico*: se efectuaron mediciones de vibraciones (velocidad y desplazamiento) en seis puntos de la tubería, analizando en cada caso el espectro (Over-All) de velocidad en (mm/s) y desplazamiento (μm) en cada punto. El resultado se compara con los valores recomendados por la norma (ASMEOM-S/G, 2000)., que fija un límite seguro de velocidad en sistemas de tuberías. El resultado se verificó mediante el cálculo de la velocidad admisible de vibración según ecuación (1) que relaciona la velocidad con el esfuerzo alternante máximo en el material.
- A2. *Excesiva caída de presión en la tubería*: se analizaron diferentes arreglos (dos) y diámetros de tubería para disminuir la caída de presión entre el contrapozo y el sistema de separación. El criterio seguido fue encontrar el arreglo óptimo desde el punto de vista de análisis de esfuerzos y caída de presión.
- A3. *Saturación de agua en el suelo de la plataforma*: Mediante las visitas de campo se verificó la existencia de un sistema de drenaje en la plataforma que tiene la capacidad para evacuar toda el agua de lluvia que cae. Con base a la información recopilada se elaboró un diagnóstico y propuesta con los detalles técnicos para su ejecución.

Dada la relación que existe entre A1 y A2, su análisis y propuesta de solución se presenta de forma conjunta.

Todo lo anterior fue verificado realizando un análisis de la quimismo del reservorio y gases difusos en la plataforma para determinar, entre otros aspectos, la relación entre la química y el patrón de flujo bifásico, así como una posible lixiviación en los alrededores del pozo.

6 Planteamiento de la solución

6.1 Análisis de las vibraciones mecánicas en tubería

En la figura 10 se presenta el árbol del contrapozo con la tubería que transporta el fluido bifásico (líquido y vapor de agua) entre el pozo AD-4Bis y las estaciones de separación según se mostró en la figura 9. El tramo desde P0 hasta P6 es donde se han identificado las oscilaciones.



Fig. 10 Sistema de tubería para transporte de flujo bifásico analizada. Los puntos indicados representan la ubicación del sensor para medición de velocidad y amplitud de la vibración.

Haciendo uso de un equipo portátil, se procedió con la medición del desplazamiento y velocidad de las vibraciones mecánicas en los puntos indicados en la tubería que se muestra en la figura 11.

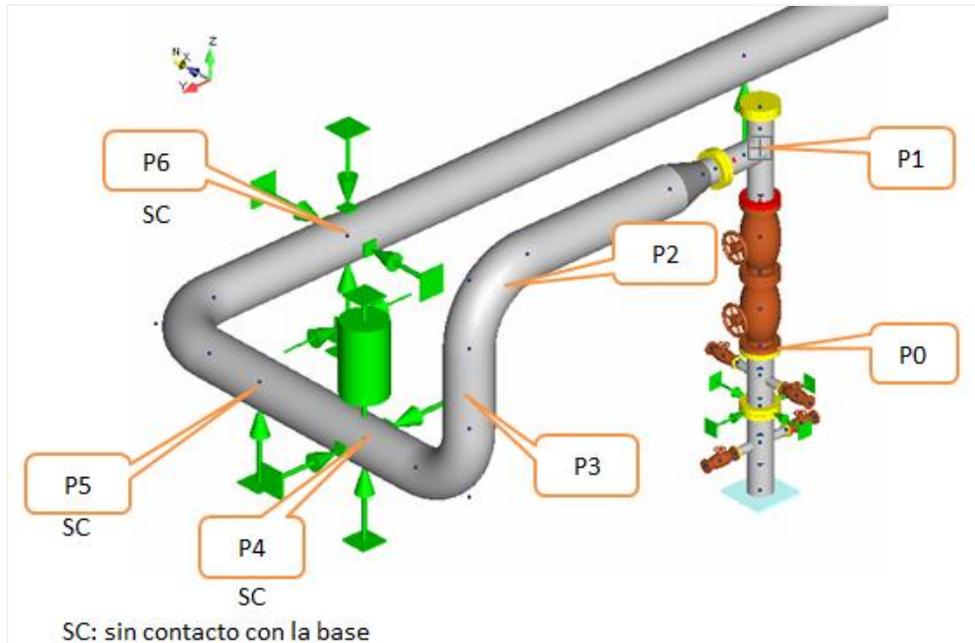


Fig. 11 Modelo del sistema de tubería analizado con los de puntos de muestreo de vibraciones (elaboración propia).

Las características técnicas del equipo empleado para medir las vibraciones son las siguientes:



DATOS TÉCNICOS	
• Marca:	Vibro Expert II
• Tipo	VIB 5.310
• Número de Serie	031427
• Tipo de sensor:	Acelerómetro
• Firmware Versión:	03.22 729

Fig. 12 Equipo empleado para medición de vibraciones fabricado por PROFTECHNIK.

La razón por la cual solo se midió en el tramo indicado en la figura 11 (P0 a P6) es porque ahí se presenta la vibración con mayor amplitud, velocidad y frecuencia. La medición en los tres ejes (X, Y y Z) respecto a los ejes coordenados, indicado en la figura 11, se presentan en las tablas 2, 3 y 4 según detalle.

Tabla 2 Desplazamiento y frecuencia máxima medida.

Punto Med.	Desplazamiento (μm , 0-P)			Frecuencia (Hz)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
P0	7.425	7.294		13.5	14.5	
P1	53.714	41.647		6.0	8.5	
P2	280.36	143.53		6.0	5.5	
P3	238.07	100.24	381.55	5.5	7.5	7.0
P4	143.96		200.63	7.5	7.0	
P5	99.456	84.299		8.0	7.5	
P6	73.291		447.9	10.0		6.0

Tabla 3 Velocidad y frecuencia máxima medida.

Punto Med.	Velocidad (mm/s, 0-P)			Frecuencia (Hz)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
P0	0.704	0.766		43.0	24.0	
P1	7.176	2.449		14.0	21.0	
P2	9.824	6.063		13.0	16.0	
P3	6.175	4.585	9.337	12.0	13.0	6.0
P4	8.117	7.859		10.0	7.0	
P5	7.832	2.485	19.986	9.0	12.0	6.0
P6	6.580		8.653	9.0		6.0

Tabla 4 Mediciones de velocidad y desplazamiento (máximos, RMS), medidos.

punto	Desplazamiento RMS (μm , 0-P)			Velocidad RMS (mm/s, 0-P)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
P0	10.847	12.014		1.728	2.042	
P1	61.836	60.398		8.557	5.541	
P2	374.04	189.56		15.919	9.478	
P3	275.48	137.6	388.69	11.727	8.192	14.469
P4	186.48		240.87	12.997	12.445	
P5	152.74	105.29		11.548	5.041	20.704
P6	109.27		321.76	8.231		9.472

6.1.1 Identificación de las causas de vibración en la tubería

De acuerdo con (MERIKOSKI, 2017), en términos generales, las vibraciones pueden ser inducidas por dos razones: mecánicas (equipo rotativo o alternativo) o inducidas por el flujo que circula internamente en la tubería; al mismo tiempo las vibraciones pueden ser catalogadas como de tipo estable, aleatoria y fluido-elástica. Según análisis preliminar de las vibraciones medidas en la tubería (ver tablas), estas son de frecuencia relativamente baja (< 50 Hz) y de amplitud variable. Por lo tanto, en vista de que la tubería no está conectada a un equipo rotativo y la vibración medida tiene desplazamientos y velocidad variables, preliminarmente se puede concluir que las vibraciones son de tipo aleatoria e inducida por el flujo bifásico que circula en el interior de la tubería.

A modo de referencia, (MERIKOSKI, 2017) propone un esquema jerárquico o árbol de decisión para identificar las causas o fenómenos que producen las anomalías de vibraciones, haciendo énfasis en análisis para luego hacer un plan de mitigación. Esquema similar fue empleado en este trabajo.

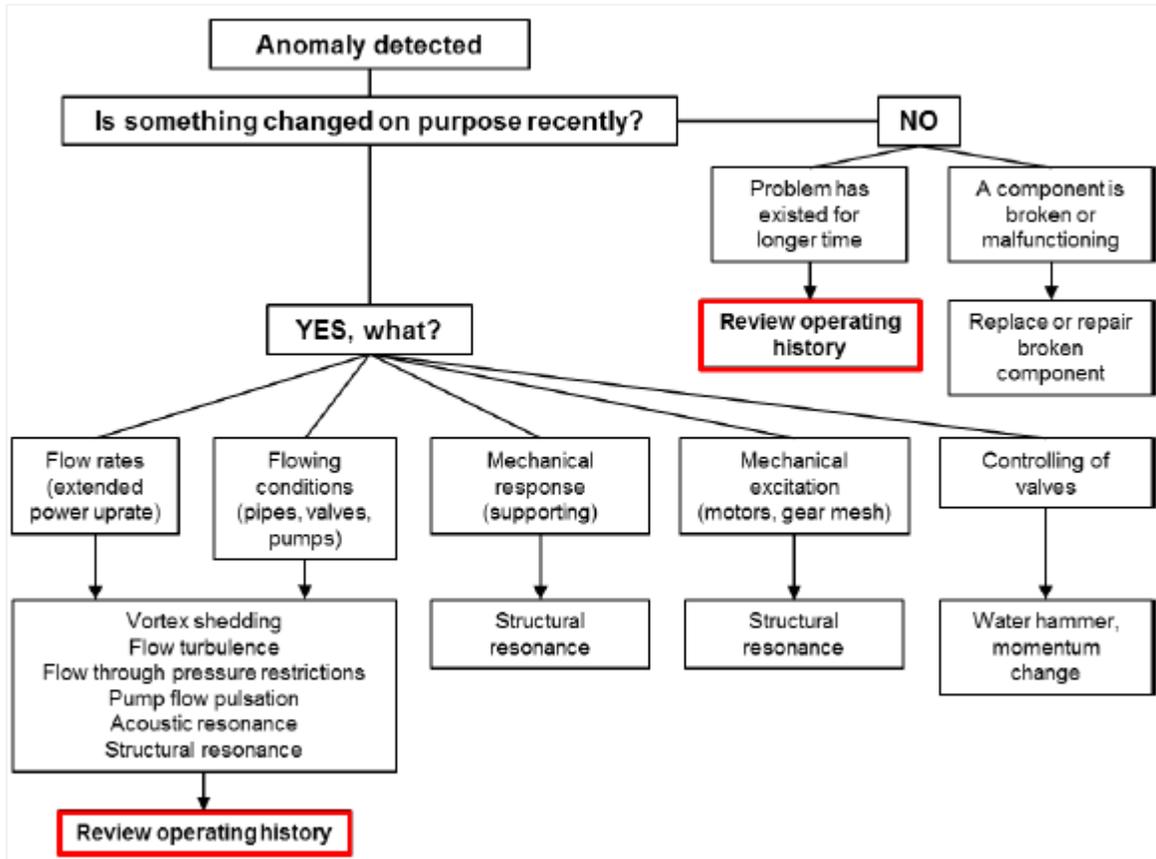


Fig. 13 Flujo para identificar las causas o fenómenos detrás de las vibraciones (MERIKOSKI, 2017).

De acuerdo con (STEWART, 2016), la tubería analizada debe estar diseñada e instalada para limitar las fluctuaciones de tensión o esfuerzos que no afecten su capacidad de servicio bajo las condiciones de operación. Las cargas que pueden causar fatiga incluyen: la acción de las vibraciones inducidas por vórtices o cambio de dirección de flujo. Las tuberías y los tramos ascendentes deben diseñarse para evitar la inducción de vibraciones resonantes por vórtices. Cuando las vibraciones deban ser toleradas o inevitables, el resultado de los esfuerzos, debido a la vibración, deben ser consideradas y comparadas con el esfuerzo de admisible con base a criterios de fatiga por carga cíclica que la tubería estará expuesta a lo largo de su vida de operación. Para el caso, el tipo de unión entre tubos que aplica (unión a tope por soldadura eléctrica), el estándar de aceptación empleado es el “API Standard 1104”, y el esfuerzo cíclico calculado deberá incluir la determinación del análisis de tensión cíclica, según como lo indica dicha norma.

Con respecto a las vibraciones observadas y medidas en la tubería entre los puntos P0 y P6 (ver figura 10), se tiene la hipótesis que dichas oscilaciones son inducidas por el

patrón de flujo bifásico por lo que se procederá a determinar el patrón de flujo de vapor y líquido en el interior de la tubería, realizando el análisis desde el reservorio hasta su descarga en los separadores, el análisis se describe a continuación.

El flujo bifásico no es un medio continuo y su aspecto es similar al que se muestran en la figura 14 y 15; que son patrones de flujo para fluidos típicos en tubería vertical y horizontal, respectivamente.

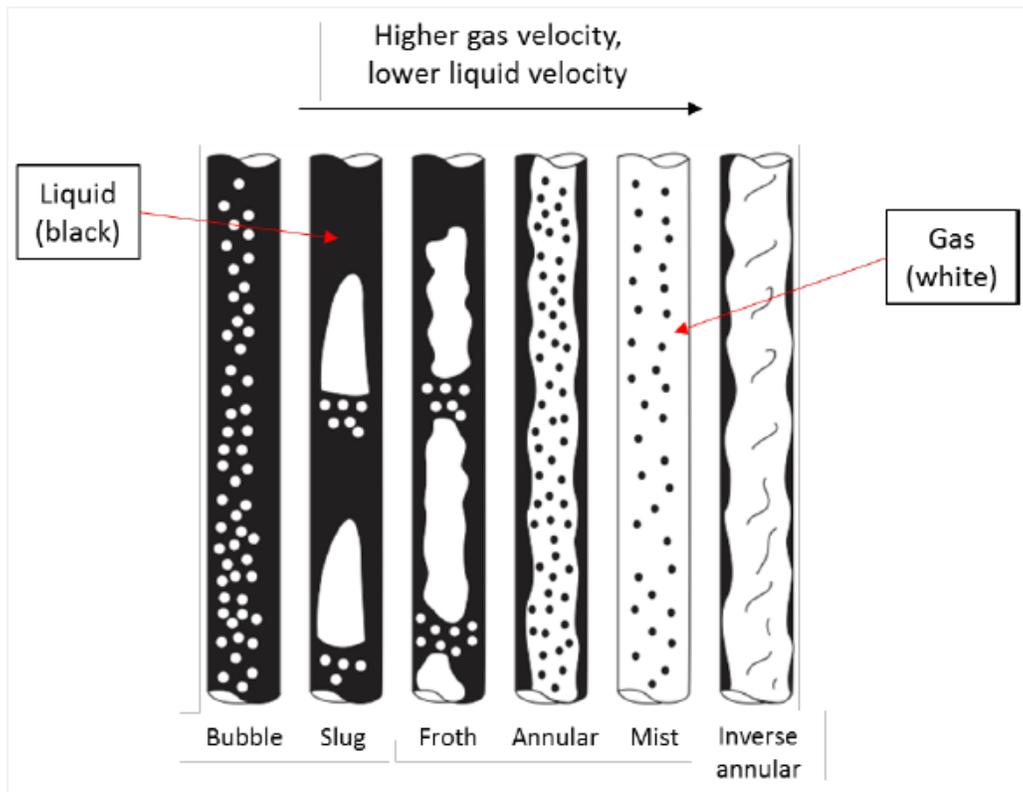


Fig. 14 Diferentes patrones de flujo para tubos verticales (Kaneko, 2014)

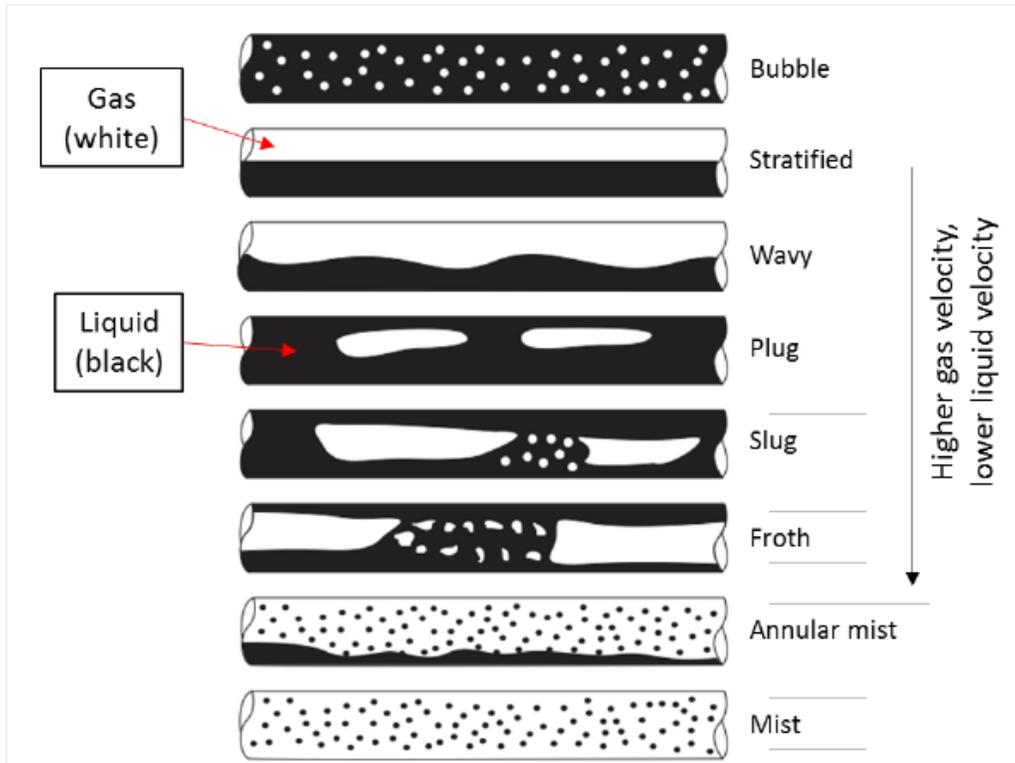


Fig. 15 Diferentes patrones de flujo para tubos verticales (Kaneko, 2014)

Según (MERIKOSKI, 2017), La tubería que transportan flujo bifásico son susceptible a presentar vibraciones en algunos patrones de flujo específicos como el “Slug”, siendo la velocidad, viscosidad y densidad del fluido en sus diferentes fases, así como también las características geométricas como diámetro y configuración de la tubería, las que más afectan el patrón de flujo. Con base a lo anterior, el riesgo de vibraciones, principalmente en el cambio de dirección como codos, reductores y T’s, se incrementa ya que el fluido ejerce fuerzas desbalanceadas: mayor fuerza del líquido que el gas, dada su diferencia de densidad. En la figura 16, se muestra un diagrama de fuerzas actuando en un codo y reductor concéntrico.

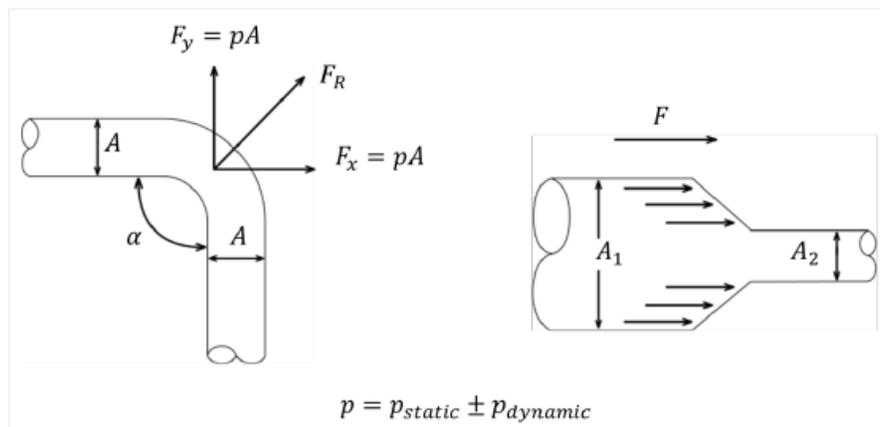


Fig. 16 ejemplo de fuerzas inducida por el fluido en accesorios de tubería (MERIKOSKI, 2017).

Con respecto a la simulación del flujo bifásico, ésta se efectuó en dos etapas:

- 1 Simulación del flujo en el interior del pozo empleando el programa informático “HOLA” para la simulación de múltiples zonas de alimentación en pozos geotérmicos (Bjornsson & Arason, 1993). Los resultados completos de las simulaciones termodinámica para cada diez metro y para diferentes tasas de flujo, se presentan en ANEXOS.
- 2 Simulación de flujo de fluidos en superficie empleando correlaciones para flujo bifásico como: *Friedel, Chisholm, Lockhart Martinelli y Muller Steinhagen Heck*, dependiendo de la configuración de la tubería, si es horizontal, vertical o inclinada. El cálculo se basó en procedimiento dinámico en el cual se subdividió la tubería en segmentos más pequeños de no más de un metro y en los accesorios se empleó las correlaciones recomendadas por la (ESDU_89012). El resultado para la caída total de presión es la integración de la caída de presión individual en cada tramo.

6.1.1.1 Simulación del flujo en el pozo

Para el primer caso, el resumen se presenta en la tabla 5. Éste se obtuvo variando la presión de cabezal y el flujo según curva de producción (ver figura 6) del pozo en cuestión.

Tabla 5 Resumen de la simulación de flujo bifásico ascendente en el pozo AD-4bis, variando el flujo y la presión de cabezal (elaboración propia).

Profundidad [m]	Diámetro tub. [Pulg]	Flujo [kg/s]		
		100	115	150
0	13 3/8	Trans	Trans	Mist
132.01		Slug	Slug	Trans
401.43		Slug	Slug	Slug
650	12 1/4	Slug	Slug	Slug
Presión de cabezal [Bara]		9.44	9.04	8.44

Según el resultado, el flujo ascendente para la condición de 100 y 115 kg/s es principalmente del tipo “Slug”, mientras que para 150 kg/s, el patrón en superficie obtenido es del tipo “Mist”, un patrón más homogéneo que el “Slug”.

Según el resultado obtenido, si se incrementa el flujo bifásico del pozo, el patrón de flujo cambiará a un más uniforme con el menor riesgo de inducción de vibraciones.

Dada la buena permeabilidad del reservorio según registro de producción, el único mecanismo para lograr un incremento (según capacidad de producción) del flujo del pozo es bajando su presión en cabezal, no obstante, lo anterior puede también estar limitado por la excesiva caída de presión en la tubería de conducción en superficie. Según registro histórico mostrado en la figura 3, con el sistema de acarreo actual (ver figura 17), la caída de presión entre el cabezal y las estaciones de separación es de tres bares, un valor excesivo si se compara con una caída de presión típica ($\Delta P < 0.5$ bar).

6.1.1.2 Reducción de pérdidas de presión en tubería de acarreo

El cálculo de la pérdida de presión por fricción para el flujo bifásico es un proceso complejo. El flujo coexistente de dos fases complica los enfoques teóricos y empíricos disponibles lo cual significa que no es posible una solución analítica completa; por lo que se hace uso de correlaciones empíricas (anteriormente citadas) que fueron empleadas en los sistemas mostrados en la figura 17 (modelos del sistema de tubería existente) y figura 18 de la propuesta, cuyo cambio principal se indican en la respectivas figuras.

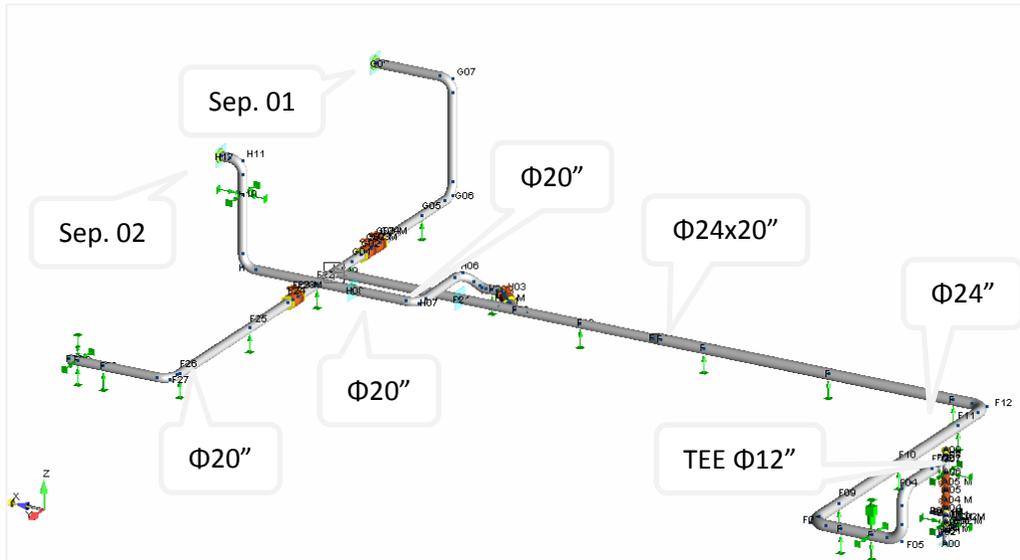


Fig. 17 Modelo de tubería superficial existente entre pozos y estaciones separadoras.

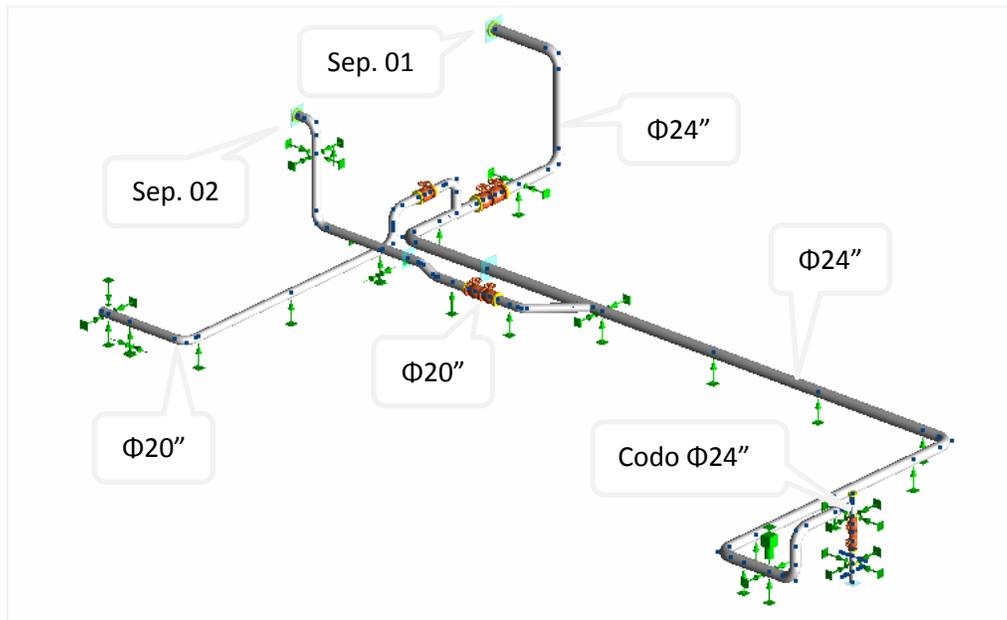


Fig. 18 Modelo de tubería propuesta entre pozos y estaciones separadoras. La propuesta sugiere el cambio de accesorios en la salida del contrapozo y la ampliación de diámetro de la tubería (Propuesta de Quijano, J, 2006).

Con respecto al contrapozo, se propone cambiar la T de $\phi 12''$ del árbol de pozo por un reductor $\phi 24 \times 12''$ y codo $\phi 24''$, con esto se reducirán las pérdidas por cambio abrupto de dirección.

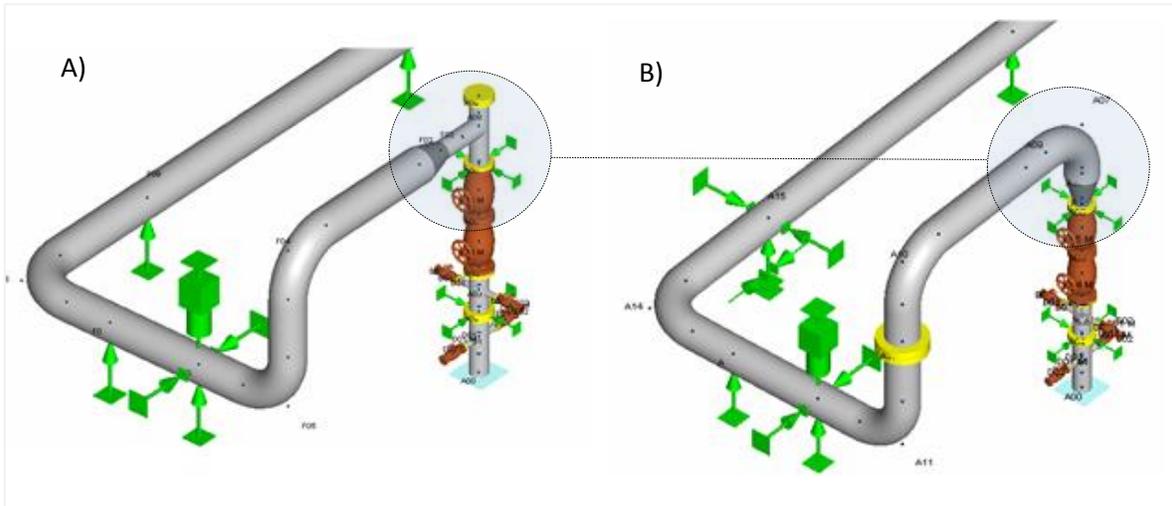


Fig. 19 A) Configuración árbol de contrapozo existente; B) Configuración de árbol de contrapozo propuesto.

Según nueva configuración de tubería, la máxima caída de presión con diferentes flujos entre el pozo y el separador, es la que se presenta en la tabla siguiente:

Tabla 6. Resumen de caída de presión para diferentes condiciones de flujo.

Flujo [kg/s]	Flujo [tph]	Calidad	Δp (bar)	Patrón de flujo	
				Horizontal	Verical
100	360	0.20	0.28	Stratified Wavy	Anular
110	396	0.20	0.35	Stratified Wavy	Anular
150	540	0.21	0.53	Anular	Anular

Según los resultados y de acuerdo con (Shigehiko, Tomomichi, Fumio, & Minoru, 2008) en el diseño de tuberías que transportan flujo de dos fases o bifásico, se prefieren patrones de flujo estables como: el flujo anular para evitar la vibración de la tubería. Sin embargo, en el caso de tuberías verticales que transportan hacia arriba flujo, los patrones de flujo tienden a ser inestables, por ejemplo, flujo de "Slug", porque la presión disminuye a medida que el fluido bifásico fluye. Para patrones de flujo de "Froth" (espuma) o "Slug", a veces se produce una vibración extrema de la tubería. En este caso, la tubería repite las vibraciones libres no periódicamente a su frecuencia natural porque las fuerzas inducidas por el flujo de dos fases son aleatorias. Una vez que se producen grandes vibraciones en las tuberías debido al flujo de dos fases, generalmente es difícil cambiar el patrón de flujo como contramedida. Algunas estructuras de soporte se pueden unir a la tubería, teniendo en cuenta el estrés térmico, para evitar la vibración de la tubería.

6.1.2 Relación entre velocidad de vibración y el esfuerzo admisible

Para determinar si el nivel de vibraciones medido en la tubería es aceptable o si éste presenta algún riesgo que produzca una posible falla de tubería, la norma ASME OM-3 ha desarrollado una ecuación que relaciona la velocidad de vibración y el esfuerzo cíclico admisible del material según curva de fatiga (S-N).

Antes de presentar dicha ecuación, se brindará una breve introducción a las vibraciones mecánicas en la tubería iniciando con la interpretación de los datos mostrados en las tablas 2, 3, y 4, los cuales son los valores máximos instantáneos y RMS de velocidad y desplazamiento medidos en la tubería. Pues bien, todas estas frecuencias forman parte de una señal compleja de vibración la cual no es más que una sucesión de señales fundamentales de diferente frecuencia y magnitud, además éstas pueden ser representadas tanto en el dominio del tiempo como frecuencia, lo anterior también se explica gráficamente en la figura 20.

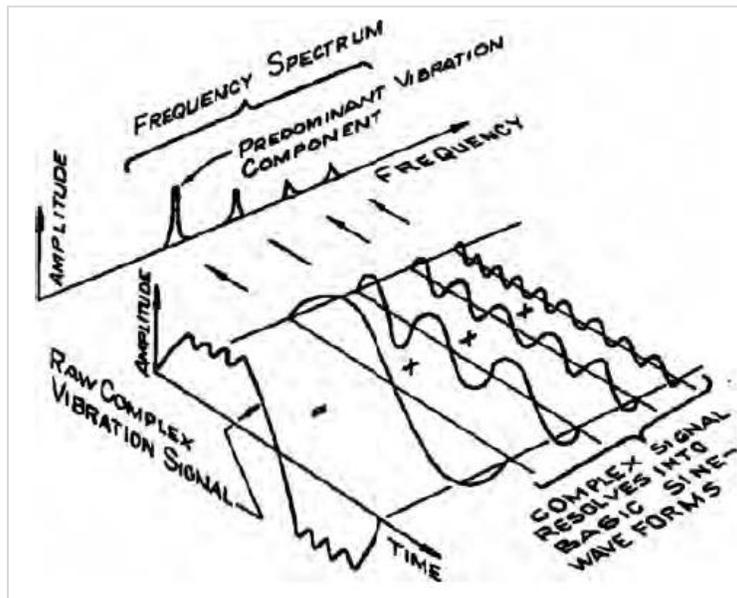


Fig. 20 Composición de una señal de vibración compleja en sus ondas fundamentales (Leishear, 2009)

Si se compara la gráfica de la figura 20 con una de las mediciones hechas en la tubería (ver anexos 12.4), es evidente la ventaja de medir el espectro en el dominio de la frecuencia ya que permite conocer las componentes (amplitud y frecuencia) predominante de la vibración. Como ejemplo, de la Tabla 3, la componente predominante en la dirección Z (eje vertical) del punto P5 tiene una velocidad de 19.986 mm/s (0-pico) a una frecuencia de 6 Hz, esta es la vibración predominante.

En términos estructurales, la tubería analizada puede ser considerada como una viga simplemente apoyada y, en función de su forma geométrica y punto de apoyo, ésta tendrá múltiples modos de vibración y frecuencia, según grados de libertad; mientras más grados de libertad, más compleja la forma de onda de la vibración. La primera de estas frecuencias se le conoce como “natural” y armónicas al resto.

En la figura 21 se muestra el caso de una viga con un extremo empotrado y el otro libre con sus posibles 4 modos de vibración con sus respectivas frecuencias.

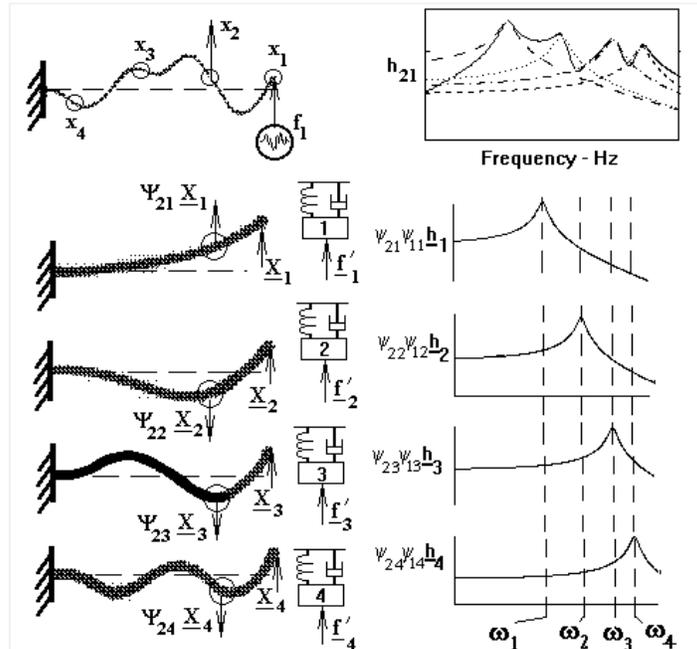


Fig. 21 Formas de vibración de una viga con un extremo empotrado y otro libre. W1 es la frecuencia fundamental, W2 es el primer armónico de 3. (Coleman, 2019).

El efecto final de la vibración según severidad, se verá reflejado en la reducción del esfuerzo admisible en el material de la tubería dado que ésta generará un esfuerzo resistivo a las acciones de las cargas alternas que se generen mientras se encuentre en operación. Gráficamente en la figura 22 se presenta un ejemplo de esfuerzo inducido por una carga aleatoria y su variación en el tiempo.

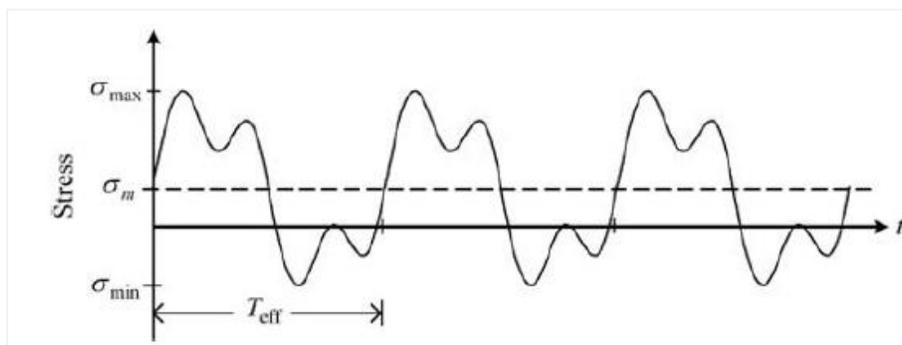


Fig. 22 Definición de esfuerzo alternante en un material (Alan, 2016)

Según el número de ciclo que se alternen las cargas según figura 22, así también se verá disminuido la resistencia admisible o límite de fatiga (S_A). Por ejemplo, según diagrama de la figura 23, para una vida infinita o con un número de ciclos mayor o igual que 1×10^6 , el esfuerzo admisible en el material deberá ser menor o igual que 13 Ksi [89.93 Mpa].

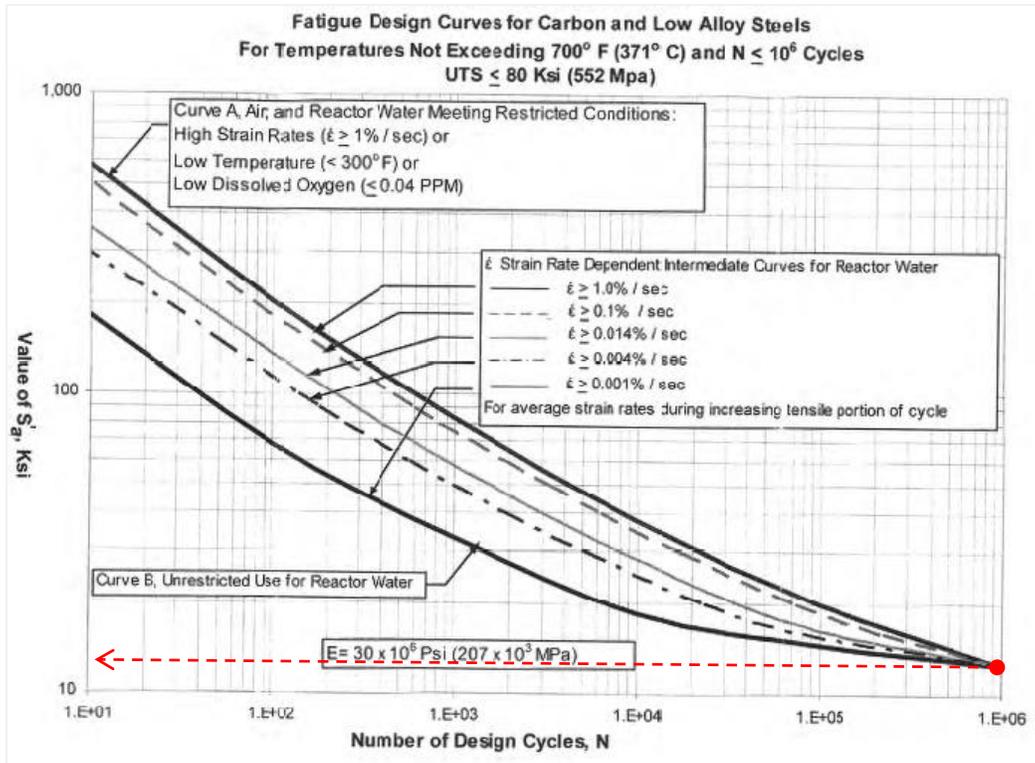


Fig. 23 curva de fatiga (S-N), para aleaciones de acero. (Leishear, 2009)

Habiendo expuesto lo anterior, ahora se procederá con la definición de la ecuación de velocidad de vibración admisible según ASME OM-3.

6.1.2.1 Velocidad de vibración admisible

La relación básica entre la velocidad pico y el esfuerzo permisible según norma ASME OM-3 ha sido desarrollada con base a la asunción que la forma del modo de vibración coincide con la forma de la primera frecuencia natural, la ecuación queda de la manera siguiente:

$$V_{Allow}^{Peak} = \frac{C_1 C_4}{C_3 C_5} \times \frac{3.64 \times 10^{-3}}{C_2 K_2} \times \frac{0.8 S_A}{\alpha} \left[\frac{in}{s} \right] \quad (1)$$

Dónde:

V_{Allow}^{Peak} = La velocidad de vibración admisible (in/s);

S_A = es el esfuerzo fluctuante a 10^6 ciclos para aleaciones de acero al carbón o 10^{11} ciclos para acero inoxidable según curva ASME S-N, en psi;

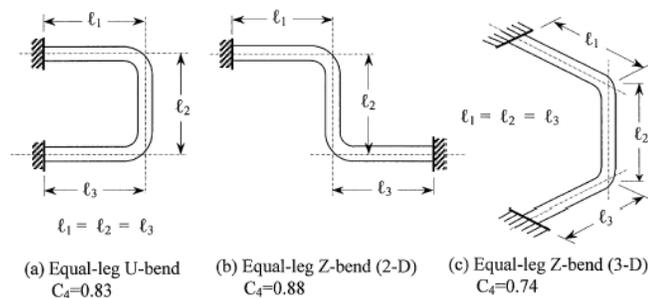
C_1 = Factor de corrección para compensar pesos concentrados como válvulas a lo largo de los puntos de apoyo en la tubería. $C_1 = \frac{1}{C_x} = 1 / (1 + 1.375 \sqrt{\frac{M_{mass}}{(ml)}})$, $C_x =$

es la razón del peso concentrado entre la masa del tramo de tubería entre soportes.

C_2K_2 = Es el factor de esfuerzo reforzado según definición del código ASME. Para muchos sistemas de tubería, $C_2K_2 < 4$ para la mayoría de tubería.

C_3 = Factor de corrección por si la tubería tiene aislamiento térmico; $C_3 = (C_w)^{\frac{1}{2}}$ donde C_w es la relación entre el peso distribuido del sistema tubería, fluido y aislamiento térmico, y el peso del metal de la tubería.

C_4 = Factor de corrección por tipo de apoyo (simplemente apoyado, extremos empotrados, con diferentes distancias de apoyo. Generalmente es un valor mayor que 0.7, siendo este un valor conservador.



C_5 = es un factor empleado cuando la frecuencia medida difiere de la frecuencia natural del espaciamiento de los soportes de la tubería, generalmente 1

α = Factor de reducción de esfuerzo permisible, generalmente 1.3 para acero al carbón y 1 para el acero inoxidable.

Empleando la ecuación [1] para la tubería analizada de la figura 10 entre los puntos P1 y P6, la velocidad de vibración admisible queda de la siguiente:

$$C_1 = 0.216; C_2K_2 = 4; C_3 = 1.45; C_4 = 0.74; C_5 = 1 \text{ y } S_A = 0.8 * 13 \frac{Ksi}{1.3} = 8 \text{ Ksi}$$

$$V_{Allow}^{Peak} = \frac{(0.216) * (0.74)}{(1.45) * (1)} * \frac{3.64 * 10^{-3}}{4} * 8000 = 0.8 \left[\frac{in}{s} \right] \text{ ó } 20.35 \left[\frac{mm}{s} \right]$$

Al comparar el resultado del cálculo con la velocidad máxima medida en el punto P5 de la tubería, la calcula es un 5% mayor, por lo que, según lo anterior, el sistema está en el límite de la zona permisible.

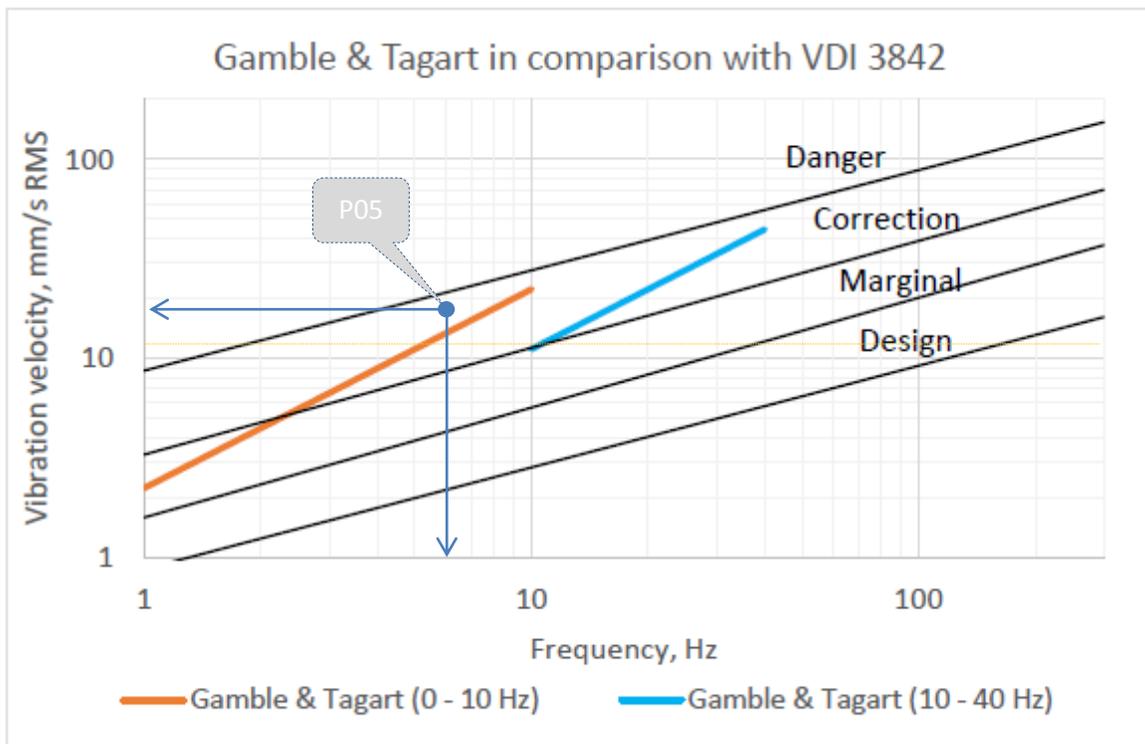
En cuanto al cálculo de los ciclos de trabajo de la tubería desde que se hizo el cambio de tubería de $\phi 20''$ a $\phi 24''$ (2014 hasta la fecha), éstos son:

$N_{ciclos} = \text{Frecuencia (Hz)} * \text{tiempo [s]} = [6 \text{ ciclos/s}] * [31.53 * 10^6 \text{ s/año}] * [5 \text{ años}] = 946 * 10^6$ ciclos. El resultado del cálculo es mayor que $1 * 10^6$ ciclos, por lo que, con base a fatiga, la tubería tendría una vida infinita.

No obstante, de lo anterior, la norma ASME OM-3 proporciona un parámetro para clasificar si la velocidad de vibración de un sistema de tubería es aceptable. Este valor es 0.5 [in/s] ó 12.7 [mm/s] pico.

De acuerdo con (Liang-Chuan & Tsen- Loong, 2009), el criterio de la velocidad de vibración permisible parece ser mucho más confiable que el criterio de desplazamiento de vibraciones y la velocidad puede ser convertida en desplazamiento siempre que sea conocida su frecuencia.

(MERIKOSKI, 2017) propone un gráfico que ayuda a clasificar el nivel de vibración en una tubería. Como ejemplo, al graficar la medición de 20.70 mm/s RMS y 6 Hz del P05 en la figura 24, éste se ubica en la zona de corrección, por lo que, según la norma ASME OM-3, se deberá realizar alguna mitigación de las vibraciones y reducir su magnitud hasta la zona de marginal o tolerable.



Para ampliar el criterio de aceptación con base a una norma, en la tabla 7 se presentan diferentes criterios recomendados con los límites aceptables para sistemas de tuberías en plantas nucleares pero que, perfectamente pueden ser empleados en geotermia. El límite se ha dividido en tres rangos. Al obtener un valor no permisible, se requiere un análisis adicional y la mitigación es requerida. Las vibraciones por debajo de lo permisible son consideradas como seguro y no requiere acción correctiva.

Tabla 7 Compilación de velocidad de vibración en tubería (MERIKOSKI, 2017)

	Allowable	Additional analyses required	Mitigation required
ASME Omb-S/G-2002 (ASME 2002, p. 45)	< 12.7 mm/s (0-Peak)	> 12.7 mm/s (0-Peak)	-
Russian boiler standard RD 10-249-98 (Kostarev et al. 2007)	< 15 mm/s (0-Peak)	15 - 25 mm/s	> 25 mm/s
Loviisa nuclear power plant (Kostarev et al. 2007)	< 7.5 mm/s (RMS) & < 20 mm/s (0-Peak)	> 7.5 mm/s (RMS) & > 20 mm/s (0-Peak)	-
Germany, nuclear power plants (Fomin et al. 2001)	-	-	> 20 mm/s (RMS)
France, nuclear power plants (Seligmann & Guillou 1995)	< 12 mm/s (RMS)	> 12 mm/s (RMS)	-
Kostarev et al. (1999)	< 7.5 mm/s (RMS)	7.5 - 15 mm/s	> 15 mm/s

6.1.3 Análisis de resultados

En razón de que la magnitud de las vibraciones de la tubería es muy impredecible, es muy difícil tenerlo en cuenta durante la fase de diseño. No obstante, consideraciones adicionales deberán ser tomadas para anticipar los problemas asociados a las vibraciones inducidas por el fluido si se sabe que el tipo de fluido transportado es de tipo bifásico o pulsante. La mayoría de los problemas de vibración se manejan cuando surgen.

Según (Liang-Chuan & Tsen- Loong, 2009), la aceptabilidad de un sistema de tubería que vibra está relacionado con el nivel de esfuerzo al que esté sometido la tubería, el cual deberá ser calculado preferentemente mediante un análisis de Elemento Finito, y a consideraciones psicológicas que se relacionan en mayor medida con la percepción de inseguridad que puede causar alarma cuando se ve y se escucha una tubería vibrar o hacer ruido. Amplitudes de hasta 1/16 pulg. [1.5 mm] puede causar alarma en sistema de tubería en interiores, y ¼ pulg. [6 mm] para grandes sistemas de tubería en exteriores.

Analizando en concreto el sistema actual, ha quedado comprobado que el nivel de vibraciones es inducido por el flujo que circula en el interior de la tubería, adicionalmente por la distancia entre los puntos de apoyo de la tubería (entre P0 a P6) que, si bien en el punto P4 hay un resorte, éste sirve como punto pivote o balancín dónde la tubería invierte su desplazamiento. Además, el uso del resorte contribuye, inclusive, tiende a amplificar las vibraciones. En la figura 25 se presenta la frecuencia natural típicas de tubería en función del diámetro y la distancia entre apoyos (Span), según esto la tubería en cuestión presenta exceso de flexibilidad dado que los apoyo que deberían estar entre 9 y 12m,

están en aproximadamente 24m, lo anterior es por la acción del resorte que hacer que la tubería pierda contacto con sus punto de apoyo .

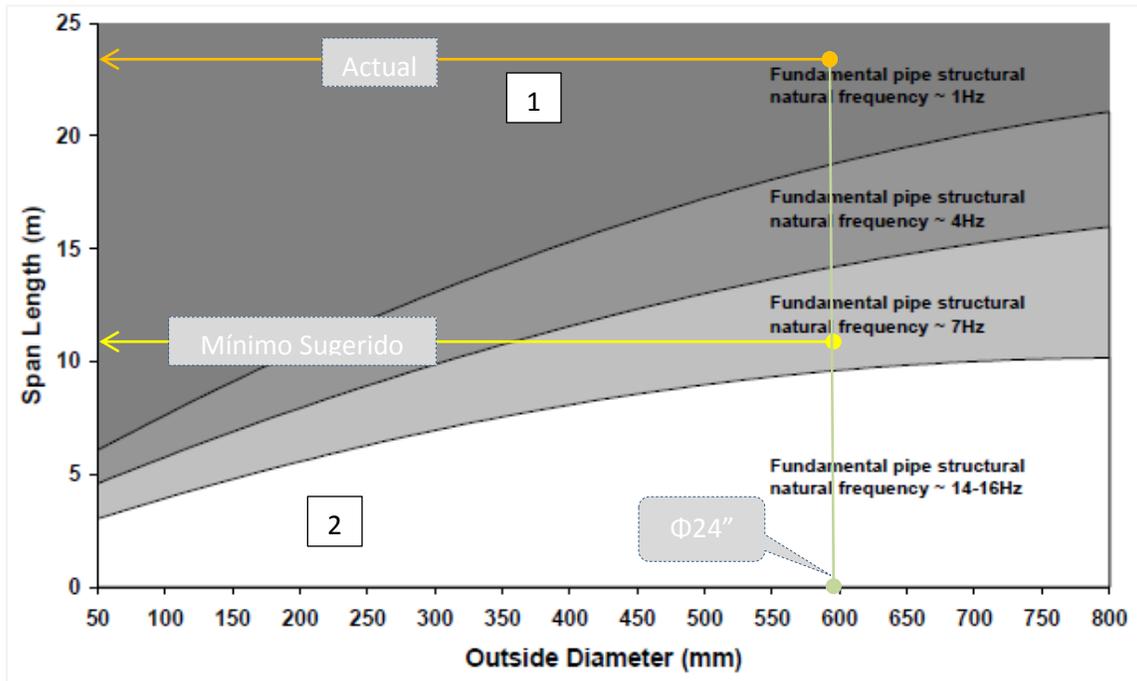


Fig. 25 Frecuencia natural para diferentes diámetros de tubería y distancia entre soportes. 1) más flexible, 2) más rígida. (Energy Institute, 2019)

Teniendo en cuenta que la frecuencia de la fuerza de excitación es igual o cercana a la frecuencia natural de la tubería, definida según la ecuación $f = \omega/2\pi = \frac{1}{2\pi}\sqrt{k/m}$, que relaciona la frecuencia natural (f) de la tubería con su rigidez (k) y masa (kg), las opciones para reducir las vibraciones en la tubería son, por un lado, incrementar la masa mediante peso adicional o aumentar la rigidez (ver figura 25) haciendo que la tubería tenga contacto entre los puntos de apoyo que, la acción del resorte, no lo tiene. No obstante, el uso de criterios como los expuestos por la norma ASME OM-3 o los de la tabla 7, son de mucha ayuda para clasificar el nivel de vibración de un sistema de tubería y plantear un plan de acción correctivo para mitigar las vibraciones.

Con respecto a lo anterior en la figura 26 se propone un árbol de decisión basado en el presentado por (Fei, Lei, & Wenxin, 2012), para evaluar la condición de operación en un sistema de tubería con vibraciones mecánicas.

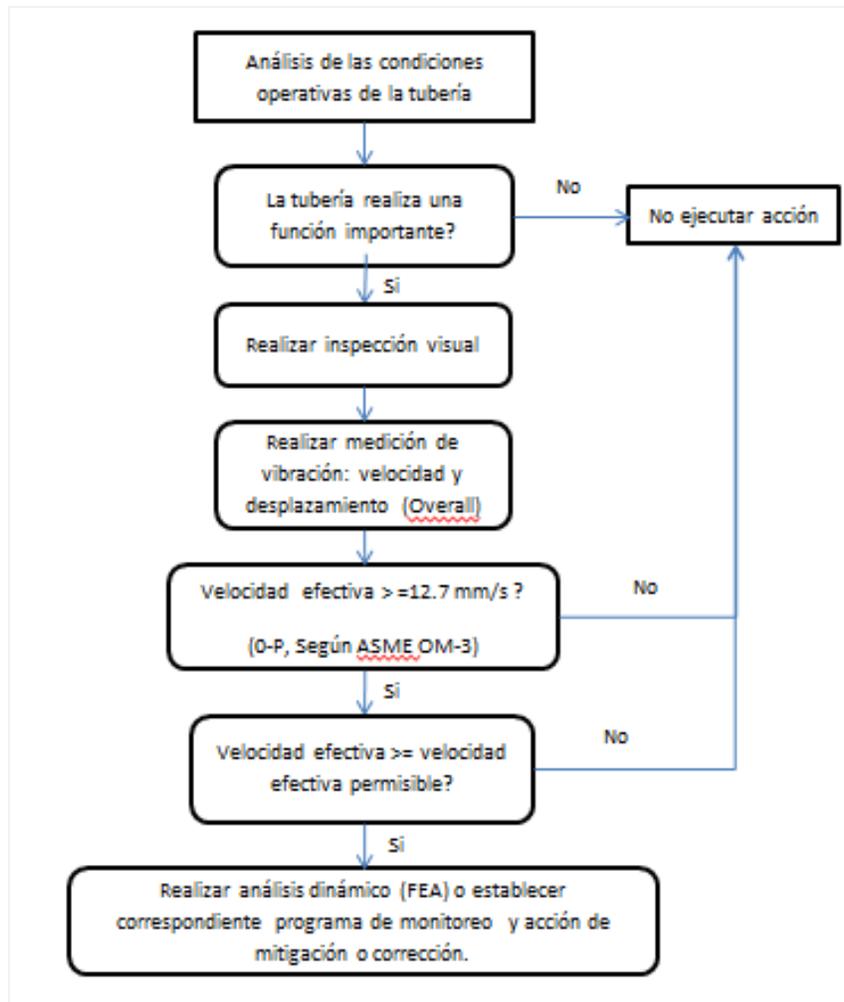


Fig. 26 Diagrama de flujo de procedimiento para evaluación de vibraciones, basado en diagrama de (Fei, Lei, & Wenxin, 2012).

6.2 Comportamiento de la entalpía del pozo AD-4Bis con respecto al incremento de masa extraída del reservorio

Envista que las vibraciones están relacionadas con la tasa de extracción de masa del reservorio, a continuación, se presenta un análisis del comportamiento de la entalpía del reservorio con respecto al planteamiento de un posible incremento de flujo con la eliminación de la restricción en la tubería de conducción. Para lo anterior se analizaron los cambios específicos con respecto al tiempo de los indicadores geoquímicos de los pozos, pueden proveer información más clara de procesos en el reservorio cercanos al pozo. Las diferentes razones de respuesta de los geotermómetros de Na-K-Ca (Sodio, Potasio, Calcio) y SiO₂ (sílice) combinado con la medición de la entalpía In Situ provee información del estado del fluido y de la temperatura a las distancias cercanas y lejanas del pozo (Truesdell, Lippmann, Quijano, & F.D'Amore, 1995). En la figura 27 se presenta el cambio en la entalpía de los compuestos antes citados con respecto a presión y entalpía medida en superficie.

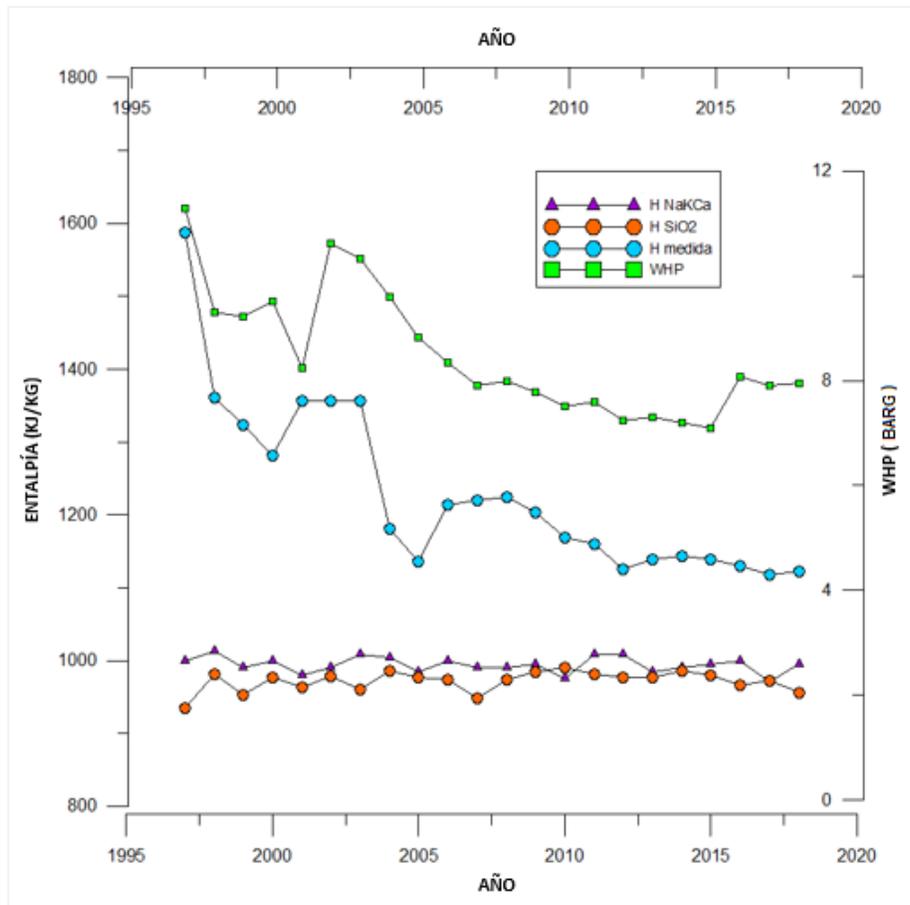


Fig. 27 Cambios de las entalpías del fluido con respecto al tiempo del pozo productor.

Según (Truesdell, Lippmann, Quijano, & F.D'Amore, 1995) el comportamiento que se presenta en la Figura 27, el patrón $h_{medida} > h_{geotermómetro}(Na - K - Ca) = h_{geotermómetro} SiO_2$, se interpreta como la existencia de un proceso de mezclado de agua en equilibrio con vapor, formado por ebullición en una región ajena o externa al pozo.

La presión de cabezal (WHP) representa la restricción establecida en su manejo y operación, la entalpía medida, al valor de energía reportado y extraído según las mismas condiciones que determina la WHP y los geotermómetros de sílice y Na-K-Ca simbolizan la energía disponible desde el reservorio, ya que, el comportamiento que determina el geotermómetro de sílice, por encontrarse en equilibrio dentro del sistema, sufre una precipitación a una velocidad superior a la de otros compuestos. Además, en la Figura X se puede apreciar un comportamiento equivalente en algunos años (por ejemplo: 2002, 2005, 2010) de las entalpías (h) reportadas por parte de los geotermómetros de NaKCa y H SiO₂ representando mezclas en equilibrio de agua líquida y vapor previamente formado en zonas alejadas al pozo, dicho comportamiento usualmente indica una ebullición extendida (no localizada) con fases segregadas y separadas de entradas diferentes de vapor y agua. (Truesdell, Lippmann, Quijano, & F.D'Amore, 1995).

Con base a lo anterior, si se analiza el comportamiento de la restricción impuesta por el operador, la WHP, entre las tres entalpías, se puede atisbar en la figura 27, que el comportamiento de las entalpías de Na-K-Ca y SiO₂ es independiente, caso contrario para la entalpía medida. Por ende, se concluye que el grado de restricción del pozo solo afecta a la fase vapor del sistema y no perturba el líquido que ingresa en el pozo ni la entalpía química del pozo. Por consiguiente, dicho fenómeno permitirá manejar el patrón de flujo del pozo sin ningún inconveniente si se instauraran condiciones diferentes de operación con el fin de disminuir las vibraciones, no obstante, afectara la producción, pero dicha medida representa una manera más sostenible de manejar el pozo.

7 Saturación de agua en el suelo de la plataforma AD-4Bis

7.1 Planteamiento de la condición operativa actual

Durante el recorrido realizado en la plataforma se pudo observar condiciones de saturación de agua en el suelo. La existencia de esta condición combinado con el problema de vibraciones en la tubería bifásica, representan un riesgo o condición insegura tanto para los que la visitan (personal operativo) como también para las obras civiles existentes; por lo tanto, a continuación, se presenta una alternativa de solución que busca mitigar dichos aspectos.

La problemática de la plataforma AD-4Bis, con un área de 4899.24m², está focalizado principalmente en su obra civil, en donde están distribuidos los equipos principales del pozo AD-4Bis, que incluyen válvulas, cabezales, tubería de acarreo, entre otros. El acceso del personal en la época húmeda tiene inconvenientes, ya que el terreno cuenta con material que no permite la absorción adecuada del agua. La saturación de humedad es el resultado de lluvias fuertes o continuas que sobrepasan la capacidad de absorción del suelo, la cual es limitada por el tipo de material superficial que se encuentra en la plataforma, por tanto, es propensa a inundación, generándose la condición de riesgo antes citada.

La frecuencia de saturación del agua en la plataforma es debido a condiciones climáticas, geomorfología, la topografía del terreno, pendientes y falta de salidas de agua lluvias, entre otros factores identificados durante la visita y que pueden contribuir a la acumulación de agua.

Otro factor muy fundamental en esta plataforma es la vegetación existente que se muestra en la figura 28 A, ya que no permite la evaporación del agua acumulada o que sea absorbida por la tierra por causa de que existe una capa de arcilla plástica a pocos metros de la superficie. Todo lo anterior abona a la problemática. Una vista de la cantidad de árboles y arbustos son presentados en la figura 28 B.

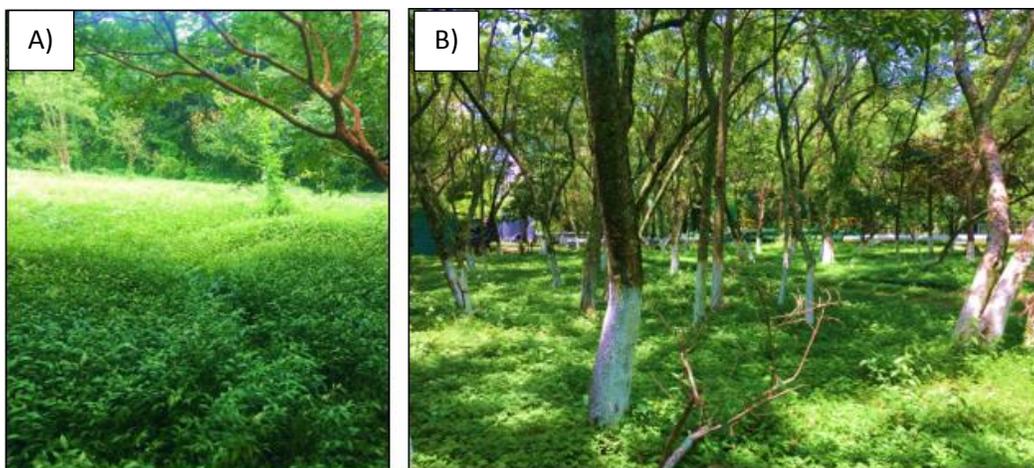


Fig. 28 A) Vegetación existen la mayor parte del año; B) Saturación de árboles, en crecimiento desordenado, afectan para la permeabilidad de la zona.

En la figura 29 A y B se observa el tipo de suelo en la plataforma, que, en su mayoría es conformada por barro, lo cual limita el acceso y maniobra del personal y equipos en ciertas áreas de la plataforma para realizar las actividades operativas rutinarias.

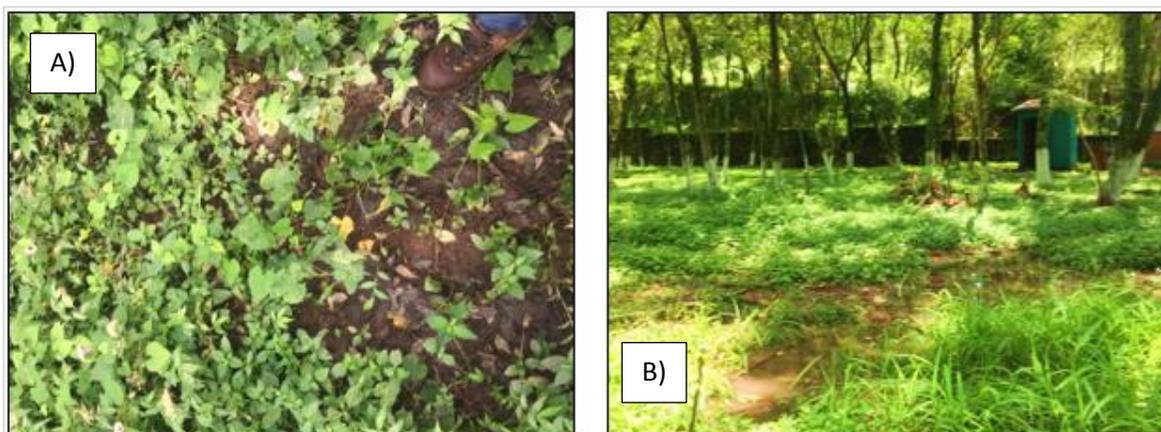


Fig. 29 El Exceso de humedad, provoca en el terreno una especie de inestabilidad B) Saturación del agua, falta de evacuación

En la plataforma se cuenta con dos canaletas perimetrales existentes para la evacuación del agua: la primera es una canaleta perimetral de profundidad 0.25m, ancho 0.6m y 98m de largo, ubicada al costado sur como se muestran en la figura 30 A; la segunda canaleta se encuentra en el costado ESTE con una profundidad de 0.2m 0.3m y 15m de largo, ambas pueden ser observadas en la figura 30 B, su baja pendiente no permite una correcta escorrentía.



Fig. 30 A) Canaleta Sur, de 98m de longitud B) Canaleta Este, de 15m de longitud.

Según se ha podido verificar, con las canaletas existentes no es factible evacuar toda el agua que colecta la plataforma considerando que éstas no tienen una pendiente adecuada y no se encuentran en el terreno con una inclinación favorable para poder realizar la descarga por gravedad y, en ocasiones, crea rebalsa, ocasionando pequeñas áreas fangosas alrededor de los accesos vehiculares.

Otro de los factores que contribuyen al estancamiento del agua recolectada en la plataforma, es la obstrucción de los desagües existentes, evitando así que el agua salga de la plataforma como puede ser notado en la figura 31 A. El tubo que recolecta el agua (ver figura 31 B), se encuentra en su 60% obstruido por factores como basura, tierra que baja de la pendiente de la calle, entre otros, siendo la tubería la única que podría conducir el agua de la plataforma a la quebrada más cercana.

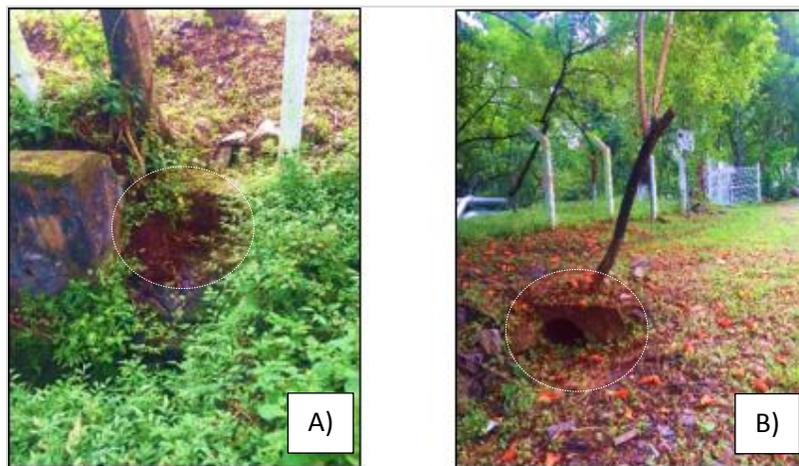


Fig. 31 A) Obstrucción a la caja de recolección de agua B) Obstrucción de canaleta al salir de la plataforma.

Entre las dificultades civiles del funcionamiento está la acumulación de agua en las bases que soportan la tubería de acarreo de flujo bifásico hacia el separador, sin que se observe algún tipo de socavaciones por el impacto que genera el agua estancada en la plataforma; no obstante, se puede afirmar que la plataforma no ha presentado hundimiento aparente del terreno. Por otro lado se observó, en algunos tramos donde existen soportes, que la tubería ha perdido contacto con sus bases. Un ejemplo de lo anterior puede ser visto en el tramo de la figura 32, donde hay cinco soportes y la tubería únicamente hace contacto en los extremos.

Se puede verificar que durante el montaje y operación de la tubería no ha habido asentamiento de la misma en las bases, lo cual podría generar libertad de movimiento de la misma, facilitando la vibración, sobretodo porque la holgura de la tubería sobre las bases es de entre 3 a 6 mm.



Fig. 32 Problemática de inundación, soportes de ramas, entra tubería y bases de anclaje.

Según lo antes expuesto, a continuación, se presenta la alternativa de solución para mitigar las condiciones mencionadas.

7.2 Propuesta de mejora y recomendaciones

Entre los factores propuestos para la solución de las condiciones civiles de la plataforma en estudio se cuenta con varios puntos a tratar para el mejoramiento de la instalación, entre las cuales se menciona las siguientes:

- **MAYOR FRECUENCIA DE PODA Y LIMPIEZA DE LA PLATAFORMA Y DRENAJES.** Para minimizar los factores que abonan a la saturación de humedad y reducen la evaporación y evacuación de agua en la zona que permanece acumulada durante una cantidad significativa de tiempo.



Fig. 33 A) Plataforma en época seca; B) plataforma en época húmeda.

En los suelos la humedad es muy importante porque determina la capacidad de éstos para resistir las cargas y mantener su estructura en condiciones estables de trabajo hasta ciertas humedades. Éstos pueden mantener resistencias aceptables, pero cuando hay excesos de agua se debilitan y pierden la resistencia que se manifiesta en hundimientos, grietas, hinchamientos, etc.

En la época de invierno los suelos se vuelven débiles, ya que el agua que absorben los hace perder resistencia hasta llegar a la saturación. Mientras que en la época de verano pierden humedad y se vuelven muy duros o muy resistentes; en la superficie donde los vehículos circulan, la acción abrasiva de las llantas hace que las partículas pierdan la cohesión abundantemente para producir capas de polvo, con lo cual el deterioro superficial llega a ser severo.

La permeabilidad es la propiedad que posee un suelo para permitir la circulación del agua a través de sí, y depende de los factores como: la viscosidad del fluido, distribución del tamaño de los poros, distribución granulométrica, relación de vacíos, rugosidad de las partículas minerales y el grado de saturación del suelo.

Para el caso del suelo del pozo AD-4Bis (arcillosos), la estructura juega un papel importante en la permeabilidad. Otros factores que afectan la permeabilidad de las arcillas son la concentración iónica y el espesor de las capas de agua adheridas a las capas de arcilla, tal cual es el caso de la plataforma AD-4Bis, que en su mayoría se podría mencionar que está conformada con arcillas plásticas que evitan la evacuación factible de la humedad existente en periodo de invierno, y provoca el estancamiento de agua en ciertas áreas dañadas por la saturación de agua. Para estas áreas, una de las soluciones más factibles recomendadas es la restitución selectiva del suelo, aunque lo recomendable es su sustitución total, debida que en la plataforma no se pueden realizar trabajos con maquinaria pesada. A continuación, se proporcionan las alternativas de solución planteadas según inspección realizada.

- MEJORAMIENTO DE SUELO:

Según el planteamiento anterior, el procedimiento para la sustitución es excavación de 20cm de suelo dañado y sustitución por suelo cemento al 20% del volumen total. Con esto se crea una capa que facilita el acceso y evita que continúen la vulnerabilidad de la estructura del suelo.

El balasto más la aplicación de cemento, es otra de las condiciones favorables para la restitución de las áreas afectadas, cumpliendo el balasto por ser una materia árida usada como base de pavimentaciones y cumpliendo la función de estabilidad, adicionalmente proporciona otras funciones importantes como: lo es la distribución de presiones, ofrece una muy buena amortiguación de las vibraciones y permite un buen drenaje de las aguas pluviales, evitando así que se deteriore el conjunto.

- MEJORA EN CANALETAS EXISTENTES:

Se propone la construcción de nuevos conductos para salidas de humedad, que contribuyan a la evacuación del agua empozada en el área, mejorando el sistema de drenaje actual.

La propuesta de canaletas con un sistema auto sostenible, ayuda a la evacuación de agua en gran cantidad, cumpliendo con la función de auto filtración o evaporación por medio de un sistema factible de absorción.

Los sistemas urbanos de drenaje sostenible son aquellos elementos participantes en el drenaje de las aguas captadas en llanuras, terracería con poca o nulo porcentaje de inclinación, facilitando la filtración y disminuyendo de forma notable la cantidad de contaminantes que arrastran las escorrentías.

Estos sistemas no son solamente estructurales, se considera como un elemento de sostenibilidad en el drenaje ya que evita la saturación de agua en las alcantarillas, creando en ellas un sistema de absorción y filtración del recurso.

Aporta una alternativa de solución agilizando las tareas de formación y diseño con la propuesta de los sistemas urbanos de drenaje sostenible, siendo estos un factor favorable para la problemática del acceso a la ubicación de la plataforma en general. Un ejemplo de este sistema se presenta en la figura 34.

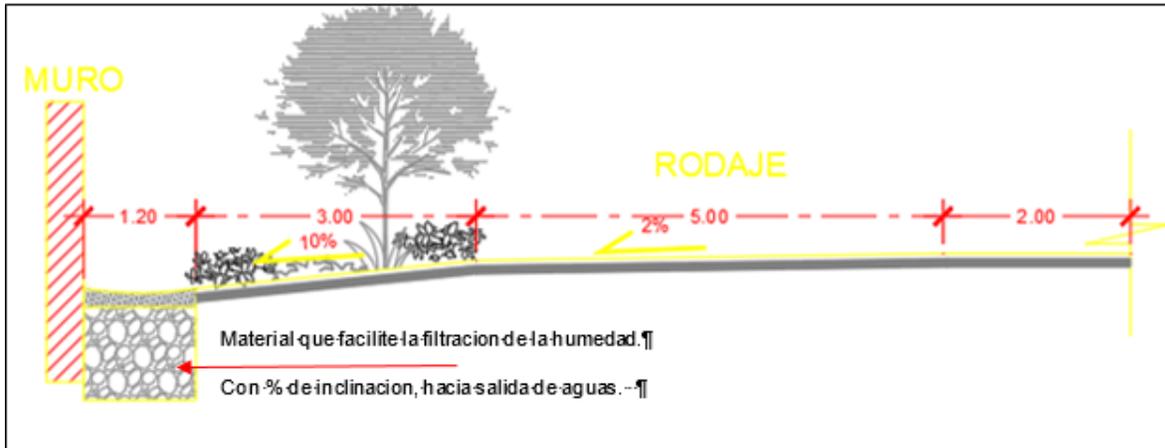


Fig. 34 Propuesta de canaleta sostenible (elaboración propia)

Es importante tomar en cuenta en el diseño y propuesta de las canaletas de tipo sostenible para mantener la vegetación en el perímetro, siendo ésta una de las mejores opciones, puesto que en la plataforma se cuenta con una gran cantidad de árboles sembrados. La propuesta también incluye la colocación de zacate Vetiver. éste es uno de los más usados en la implementación de este tipo de canaletas, entre sus usos directos encontramos que, cuenta con ventajas en la conservación del suelo y del agua, estabilización de la tierra y taludes, es una muy buena opción para crear una barrera vida que contribuye a la absorción del agua estancada en la plataforma y en época seca, mantiene sus condiciones y es una planta que requiere pleno sol para desarrollarse bien.

7.2.1 Propuesta de construcción de badenes y canaleta perimetral en el costado norte y este y conectarla con canaleta existente:

Para la evacuación de aguas estancadas en áreas cercanas a las tuberías de acarreo de fluido bifásico se propone la construcción de un badén u otro tipo de obra de drenaje que se adecua a las características de la topografía, con el objetivo facilitar el tránsito estable tanto de personal como de vehículos y conectando este sistema a la canaleta sostenible, facilitando así la evacuación del exceso de humedad (ver figura 35 A).

El drenaje de la plataforma se determina en función de la sección transversal para el caso, según topografía del lugar, la pendiente deberá ser 1%, lo cual permitirá el escurrimiento del agua. El diseño de la canaleta deberá considerar que en éstas se recogerá el agua procedente de la propia plataforma y de los taludes, canalizando hasta los puntos de desagüe.

En cuanto a los materiales, el revestimiento de ambas puede ser de mampostería, hormigón o mortero.

Finalmente, para la mejora de la plataforma, se recomienda la colocación de una capa de grava o chispa sobre toda la plataforma, evitando así el crecimiento descontrolado de la vegetación, abonando al fácil acceso del personal y creando una estabilidad en el terreno.

Para que todo lo anterior realmente funcione se deberá de garantizar que el agua podrá ser evacuada efectivamente de la plataforma por lo drenajes que actualmente está obstruidos.

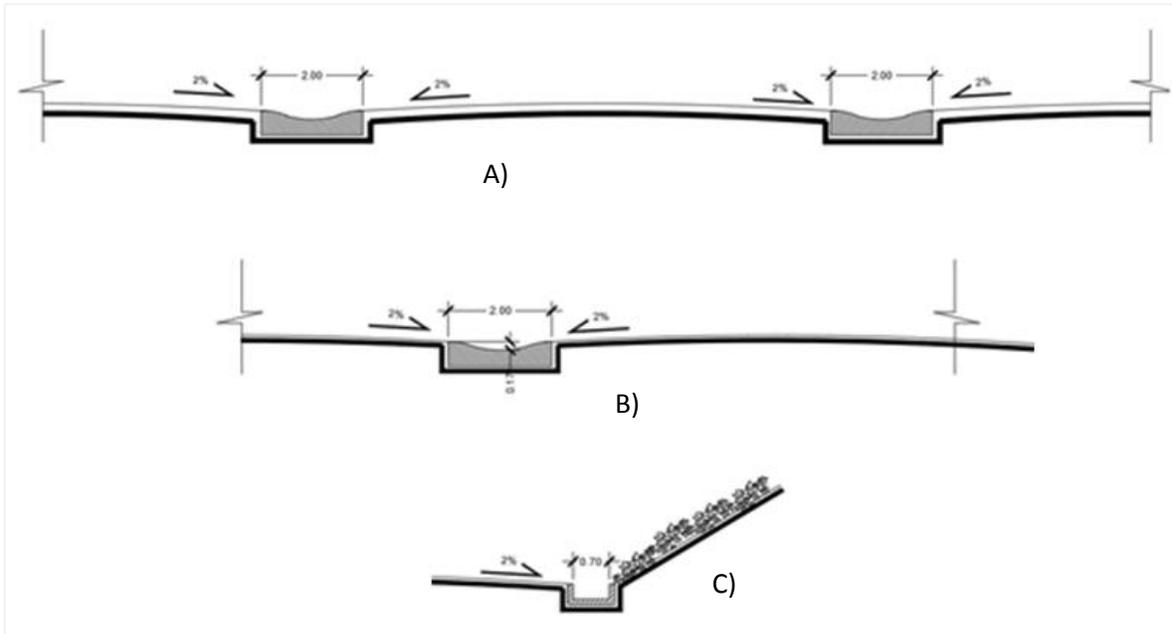


Fig. 35 Propuesta de sistema de canaletas y badenes. A) Badenes norte-sur con conexión a canaleta sostenible; B) badén proyectado norte-sur a canaleta existente y C) Canaleta proyectada a conectarse con existente.

El presupuesto estimado para las obras civiles proyectadas se presenta en la tabla siguiente:

Tabla 8 Presupuesto estimado para ejecutar obras de mitigación y mejora de drenaje de agua lluvia en plataforma.

ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	OBRAS PRELIMINARES				\$1,500.00
1.1	LIMPIEZA Y DESALOJO	1000	M2	\$1.50	\$1,500.00
2	TRATAMIENTO DEL SUELO				\$47,997.25
2.1	RESTITUCIÓN CON SUELO CEMENTO 5% DE 0.3M ESPESOR	145.35	M3	\$69.76	\$10,139.62
2.2	COVERTURA CON 0.20M DE GRAVA	649.4	M3	\$55.02	\$35,729.99
2.3	REVEGETACIÓN CON ZACATE VETIVER	303.95	M2	\$7.00	\$2,127.65
3	INFRAESTRUCTURA				\$86,427.05
3.1	CALLE DE PIEDRA A=2.5 M	416	M2	\$86.48	\$35,975.68
3.2	BADÉN A=2M	129.71	ML	\$172.13	\$22,326.98
3.3	CANALETA A=0.7M	181.1	ML	\$71.48	\$12,945.03
3.4	CANALETA SOSTENIBLE A=1.2M	121.61	ML	\$124.82	\$15,179.36
3	OBRAS DE FINALIZACIÓN				\$300.00
3.1	LIMPIEZA FINAL Y DESALOJO	1	SG	\$300.00	\$300.00
SUBTOTAL COSTOS DIRECTOS E INDIRECTOS					\$136,224.30
SUBTOTAL COSTOS IMPREVISTOS					\$145,760.01
TOTAL					\$281,984.31

8 Análisis de gases difusos en la plataforma del pozo en estudio

El análisis de gases difusos se lleva a cabo con la finalidad de mapear las zonas frágiles existentes en la plataforma del pozo en análisis. Consecuentemente se evalúa si en la zona donde se ha emplazado el pozo, se encuentra en alteración. La alteración del suelo se da cuando los minerales de las rocas reaccionan con los gases. Cuando las rocas se alteran se pierden sus propiedades originales y se transforman en arcillas o minerales de alteración acida. El análisis también establece el avance de las zonas de emanación de los gases y las zonas de gran alteración que requieren mitigación. (López, 2019)

8.1 Flujo de H₂S (g/m² día)

En la Figura 36 se ilustra la aparición intermedia de H₂S en las zonas aledañas al contrapozo.

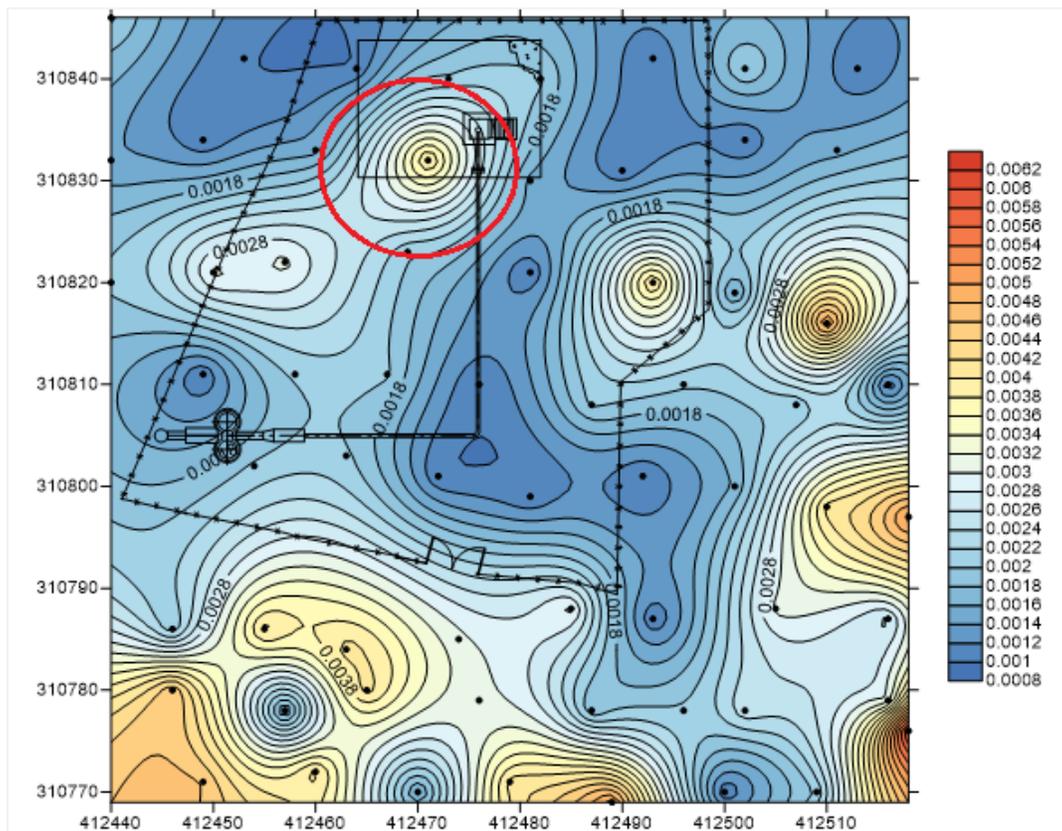


Fig. 36 Mapeo del flujo de H₂S en la plataforma del pozo.

El Sulfuro de Hidrógeno es el segundo gas más abundante en la descarga total y es de las especies más solubles en medio acuoso. El flujo de H₂S, representa la existencia de una región de alta temperatura y presión, que se traduce como la presencia de fluido geotérmico de gases difusos (Jolie & García, 2018).

8.2 Diferencial de concentración de He (ppm)

La Figura 37 muestra una desgasificación media de He en las cercanías de la plataforma lo que indica permeabilidad vertical pues el comportamiento de la especie es directamente vertical. Si se llevara a cabo un mapeo de Radón, se observaría el mismo comportamiento. (López, 2019)

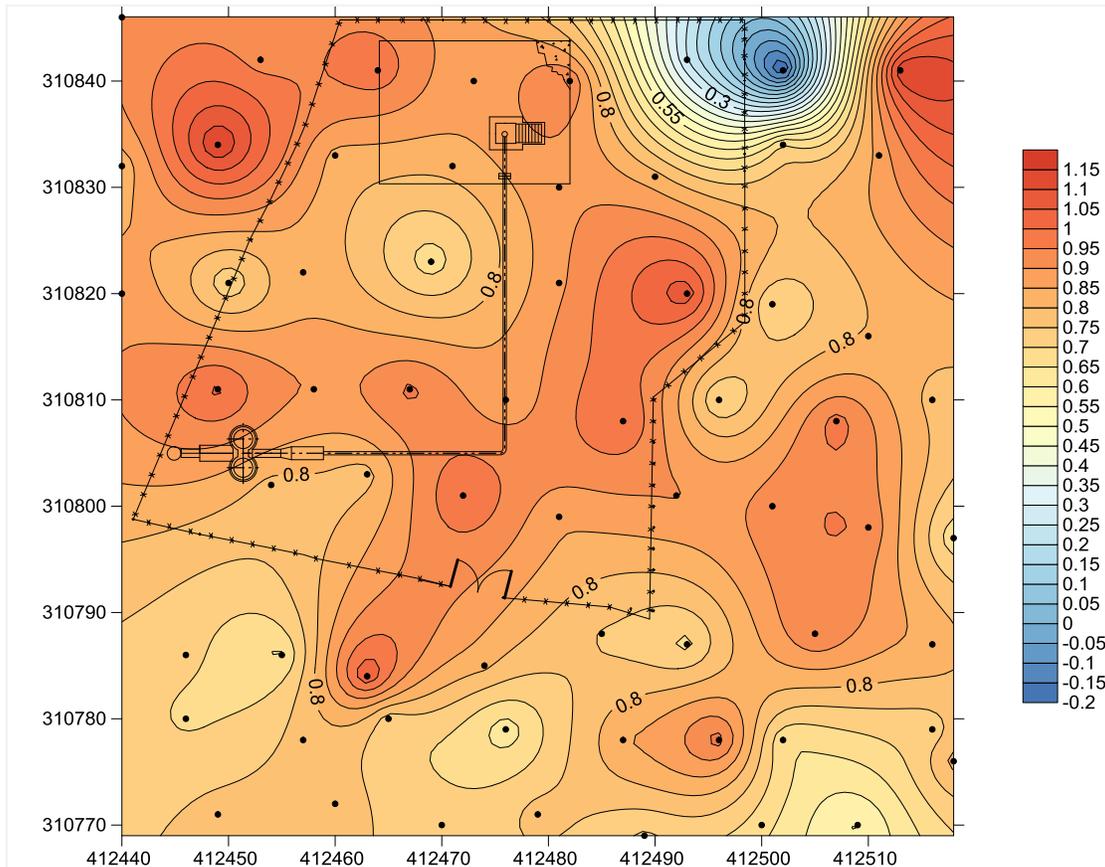


Fig. 37 Mapeo de la concentración de He en la plataforma del pozo.

El Helio es un indicativo de rocas con niveles significativos de Uranio y minerales que contienen Torio. Además, delimitan efectivamente los márgenes de los campos y zonas de fallas permeables aisladas que son explotadas por el gas ascendente. (Nicholson, 1993)

8.3 Concentración de CO₂ (ppm)

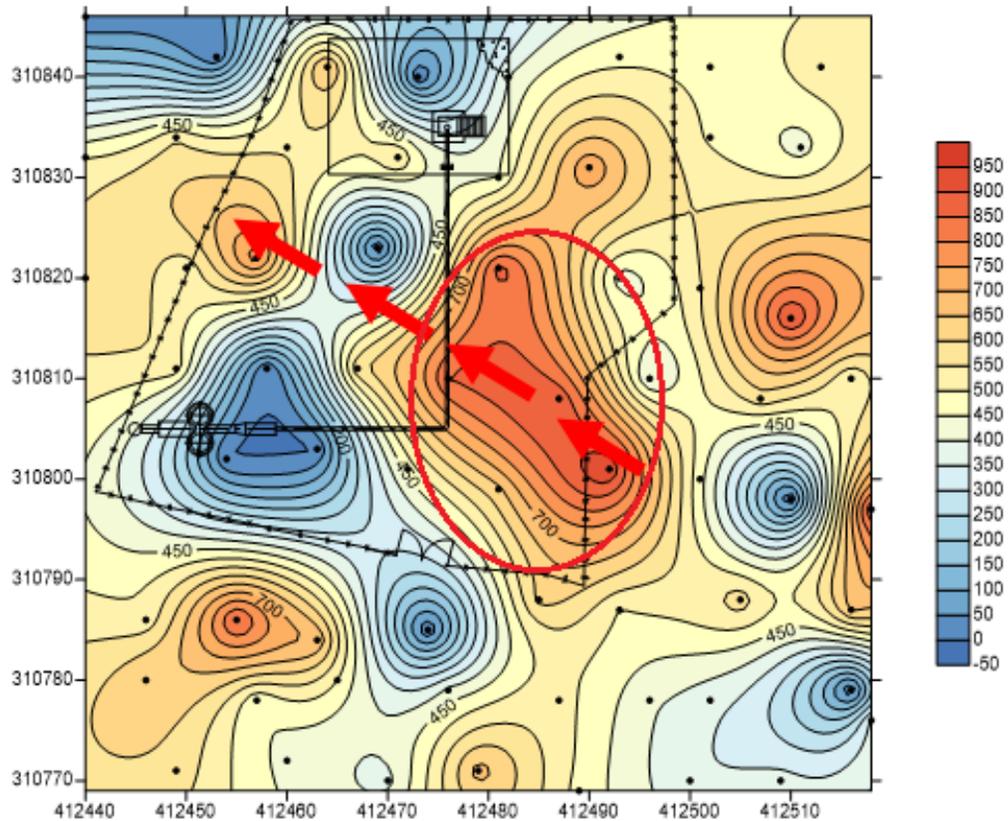


Fig. 38 Mapeo de la concentración de CO₂ en la plataforma del pozo.

El Dióxido de Carbono es el gas más abundante en la atmósfera y puede alcanzar hasta una concentración del 85%, en vapor seco a alta temperatura. Es utilizado de forma efectiva como un trazador de desgasificación del magma debido a su baja solubilidad en fundidos de silicatos y a su presión moderada. Concentraciones altas de la especie indican que probablemente proviene de alteraciones hidrotermales por presencia de fluido geotérmico (Jolie & García, 2018).

Como el CO₂ es mayoritario en el vapor geotérmico, este inhibe la aparición de H₂S si se comparan las Figuras 36 y 38 se observa dicha moción claramente; solo si existe una permeabilidad del suelo muy considerable se manifiestan los dos gases. Por lo tanto, la presencia de Dióxido de Carbono establece la presencia de vapor geotérmico. Las zonas más críticas de desgasificación han sido remarcadas en la Figura 38 y se ha establecido el patrón de la dirección de migración de la alteración, del SE al NO.

8.4 Flujo de CO₂ (g/m² día)

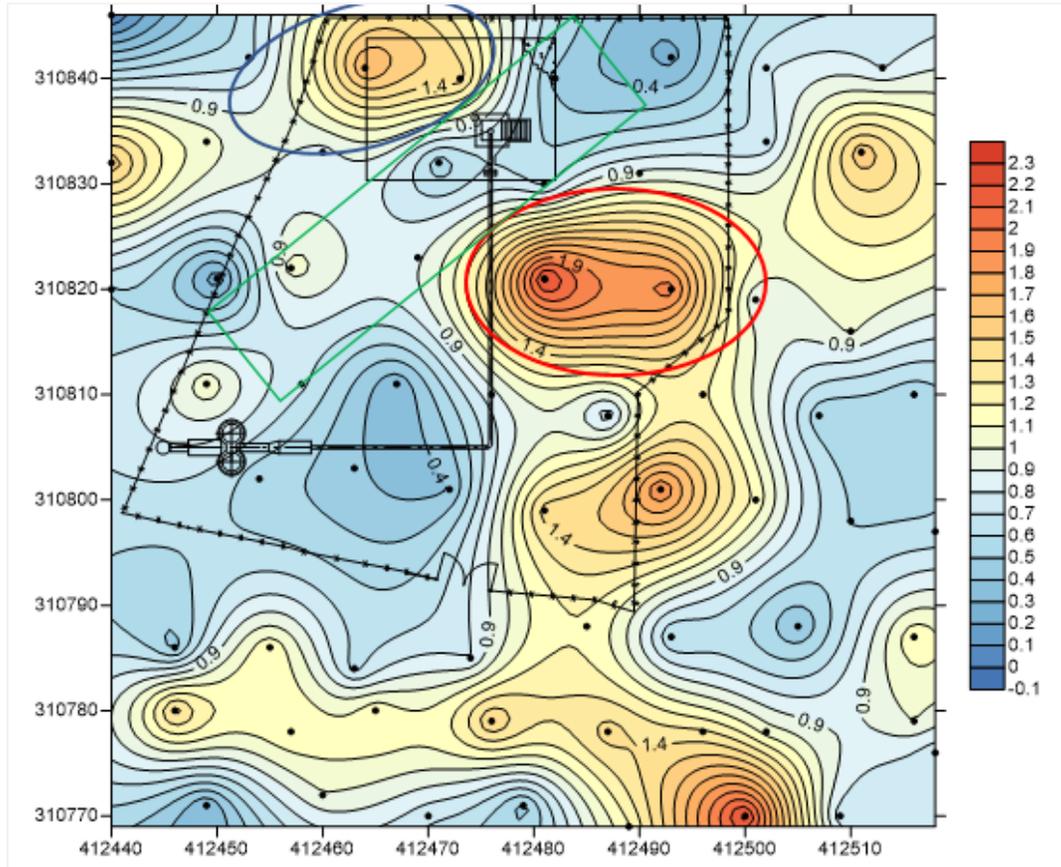


Fig. 39 Mapeo del flujo de CO₂ en la plataforma del pozo.

El estudio de los flujos de dióxido de carbono ha sido una de las técnicas exploratorias geoquímicas más importantes, debido a que es uno de los gases más abundantes en los sistemas geotermales asociados a volcanismo. Esta medición se usa como una herramienta para cuantificar la actividad geotermal en superficie (Jolie & García, 2018).

Donde hay flujo y concentración, es una zona con mucha alteración y permeabilidad, como es el caso de la zona remarcada en la Figura 38 y 39. Existe una gran posibilidad que la presencia de CO₂ este generando un minado del suelo pues presenta una gran alteracion según los mapas que estipulan el comportamiento de la especie. De no mitigarse dicho fenómeno (zona remarcada en el rectangulo verde), la alteración seguira creciendo en la direccion SE-NO, ocasionando en el futuro problemas mayores de estabilidad en el suelo (López, 2019).

8.5 Temperatura del suelo (°C).

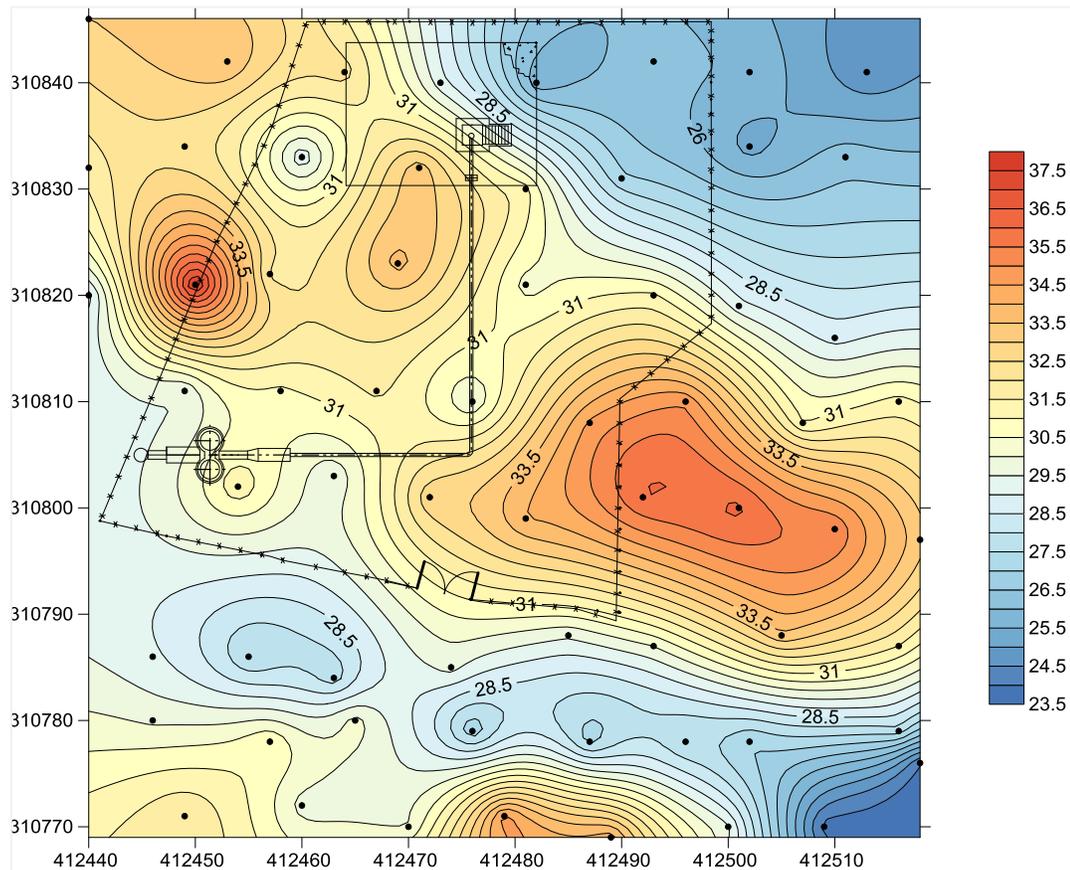


Fig. 40 Mapeo de la temperatura del suelo en la plataforma del pozo.

Las mediciones de la temperatura del terreno, la temperatura del aire, y los cambios de temperatura de fluidos que circulan dentro de los elementos de cimentación, son realizadas con el objeto de comprobar las predicciones preliminares del sistema realizadas con las herramientas de termodinámica, hidráulica, geología, y la geotecnia, entre otros (Jolie & García, 2018).

En el mapeo de la temperatura del suelo (figura 40) se ve claramente la dirección de migración de la alteración. Seguramente el fenómeno seguirá creciendo si no se realizan medidas de mitigación, ya que, si el suelo no está alterado tiene una temperatura baja constante y caso contrario, si hay presencia de gases o, mejor dicho, si se cuenta con una alteración del suelo, estos generan una respuesta térmica (zonas con mayor temperatura reportada).

En conclusión, el mapeo ilustrado en la figura 40, indica una elevada presencia de gases y vapor geotérmico en las zonas aledañas al contrapozo suscitando la inestabilidad o cambio en la matriz del suelo (cambio de las propiedades físicas del suelo); consecuentemente, dichas alteraciones generan arcillas plásticas (Caolinita y

Montmorillonita) que no atenúan el movimiento producido en el sistema, al contrario lo transmiten (López, 2019).

8.6 Concentración total de H₂S (ppm)

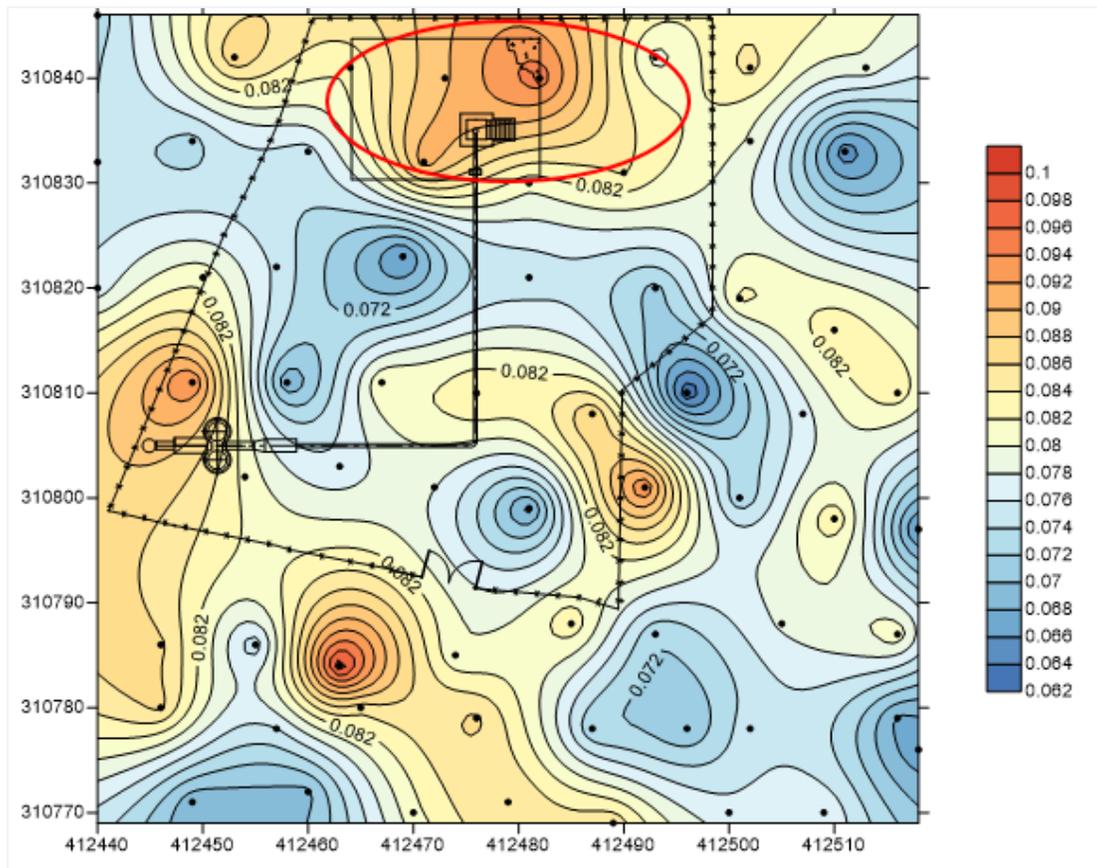


Fig. 41 Mapeo de la concentración de H₂S en la plataforma del pozo.

El sulfuro de hidrógeno es la especie de azufre dominante en condiciones hidrotermales y en fumarolas de baja temperatura, donde las emisiones se originan a partir de un sistema hidrotermal profundo (Giggenbach, 1980).

El análisis del comportamiento del H₂S establece las zonas con influencia de vapor geotérmico. En este caso, como se aprecia en la Figura 41, la alteración remarcada comienza a generarse, avalando el resultado obtenido en el análisis de dióxido de carbono. Por lo tanto, podría inferirse que la zona indicada en la Figura 41 corresponde a la zona de alteración secundaria o intermedia.

8.7 Diferencial de concentración de H₂ (ppm)

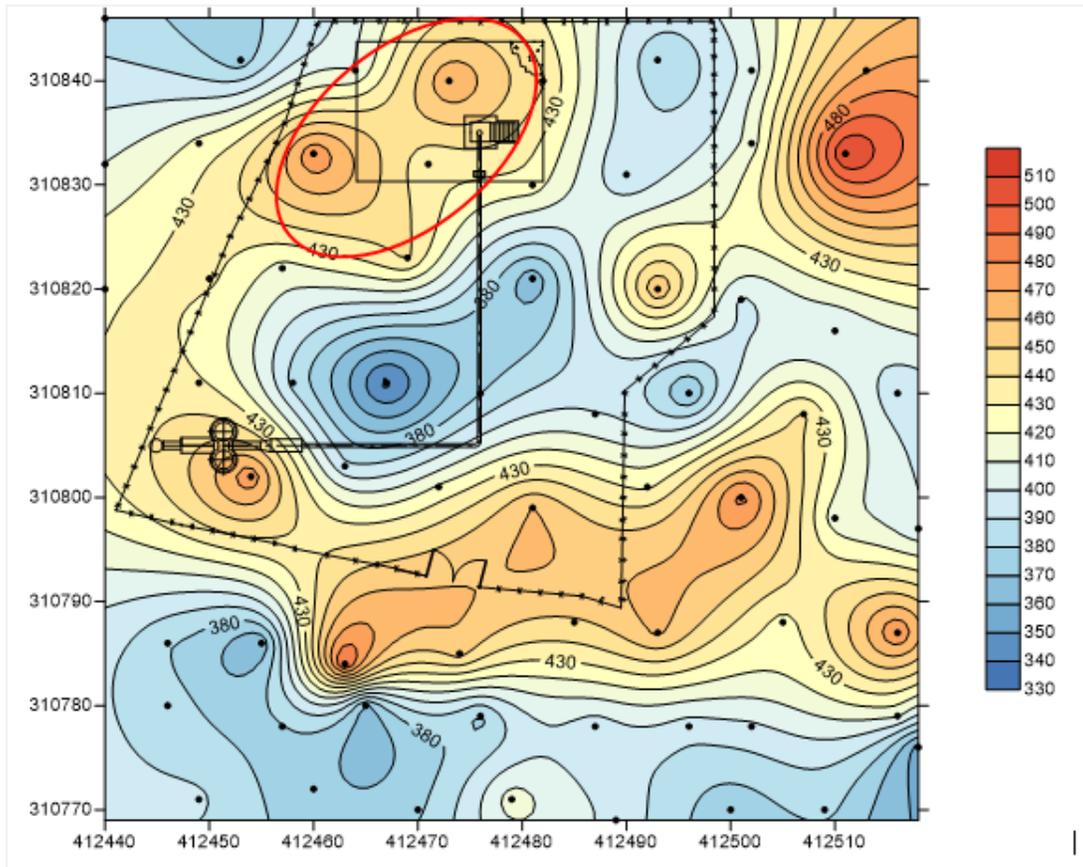


Fig. 42 Mapeo de la concentración de H₂ en la plataforma del pozo.

El Hidrógeno es uno de los mejores indicadores geoquímicos de procesos magmáticos que operan en sistemas magmáticos en profundidad, debido a sus propiedades químicas y características físicas, tales como: bajo peso y baja solubilidad en aguas subterráneas y fluidos hidrotermales. Además, el H₂ se considera una de las especies "trazador" más abundantes en los sistemas volcánico-hidrotermales y un participante clave en muchas reacciones redox que ocurren en el depósito hidrotermal de gas (Giggenbach, 1987; Chiodini y Marini, 1998).

El análisis del comportamiento del H₂ valida la zona de alteración secundaria establecida en el estudio de sulfuro de hidrógeno, remarcada en la Figura 42.

8.8 Concentración de Hg (ppm)

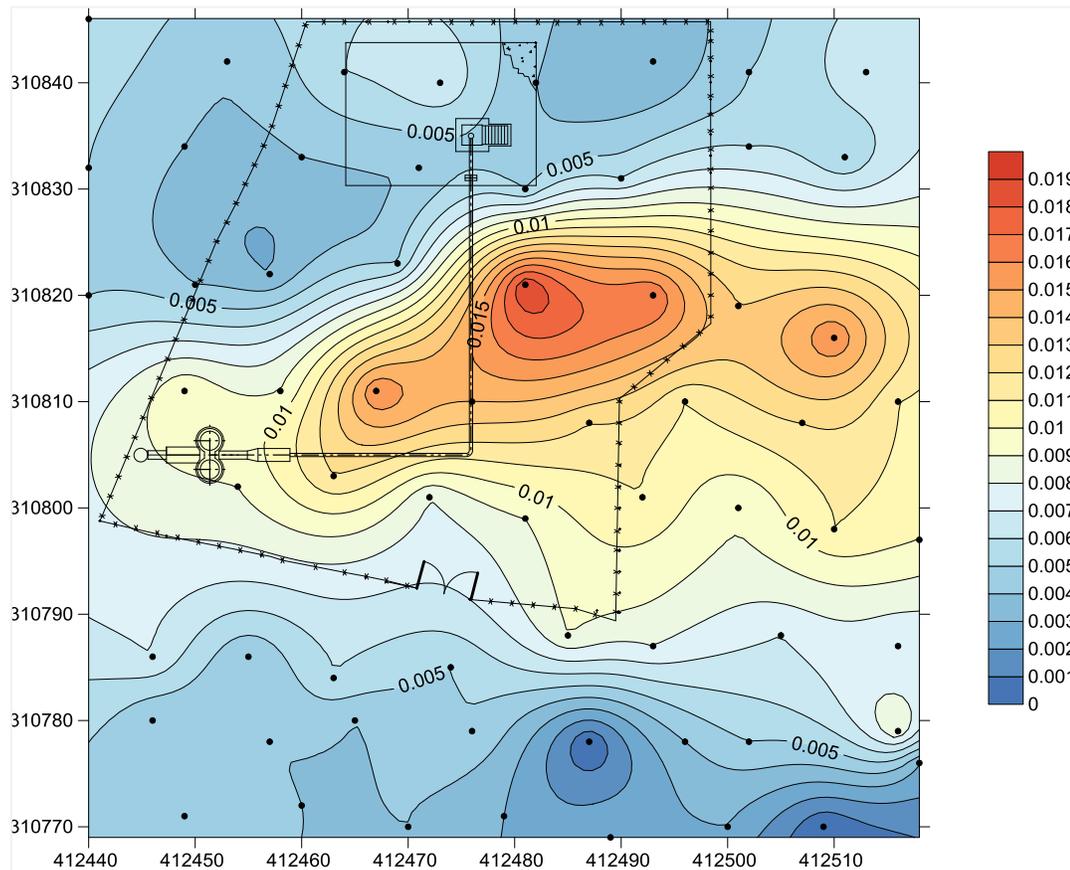


Fig. 43 Mapeo de la concentración de Hg en la plataforma del pozo.

La prospección geoquímica de elementos volátiles como el vapor de Mercurio (Hg) en los suelos, se ha utilizado como una herramienta muy útil para la detección de zonas anómalas de flujo de calor y áreas con mayor permeabilidad donde los fluidos ascienden hacia la superficie (Varekamp y Buseck, 1983; Jolie y Rodríguez García 1984; Padrón et al., 2003). El Mercurio es un gas magmático que está asociado con estructuras volcánicas activas, lo que indica el origen directamente de la desgasificación del magma saturado. La desgasificación es entonces estudiada en superficie como una herramienta para la exploración de recursos geotérmicos, y la identificación de sistemas hidrotermales. Los altos valores de Mercurio, en conjunto con datos geológicos, permiten definir los bordes de un reservorio y dar una imagen general sobre la geometría del campo geotérmico. El Mercurio se vaporiza en profundidad, y su emisión se da desde sistemas geotérmicos activos de alta temperatura hacia la superficie, por medio de difusión, a través de regiones permeables (Jolie & García, 2018).

Generalmente, la presencia de Hg es acompañado de la existencia de CO_2 . Por lo tanto en el análisis que concierne al pozo productor en estudio, ratifica la existencia de vapor geotérmico en las zonas anteriormente indicadas y delimitadas como las alteraciones geotérmicas principales. Lo anterior se evidencia en la figura 43.

8.9 Conclusión del análisis geoquímico del pozo

A partir de los resultados obtenidos del análisis de las especies implicadas en el análisis de gases difusos se obtiene la Figura 44, en la que se esboza y delimitan las zonas de alteración principal y secundaria.

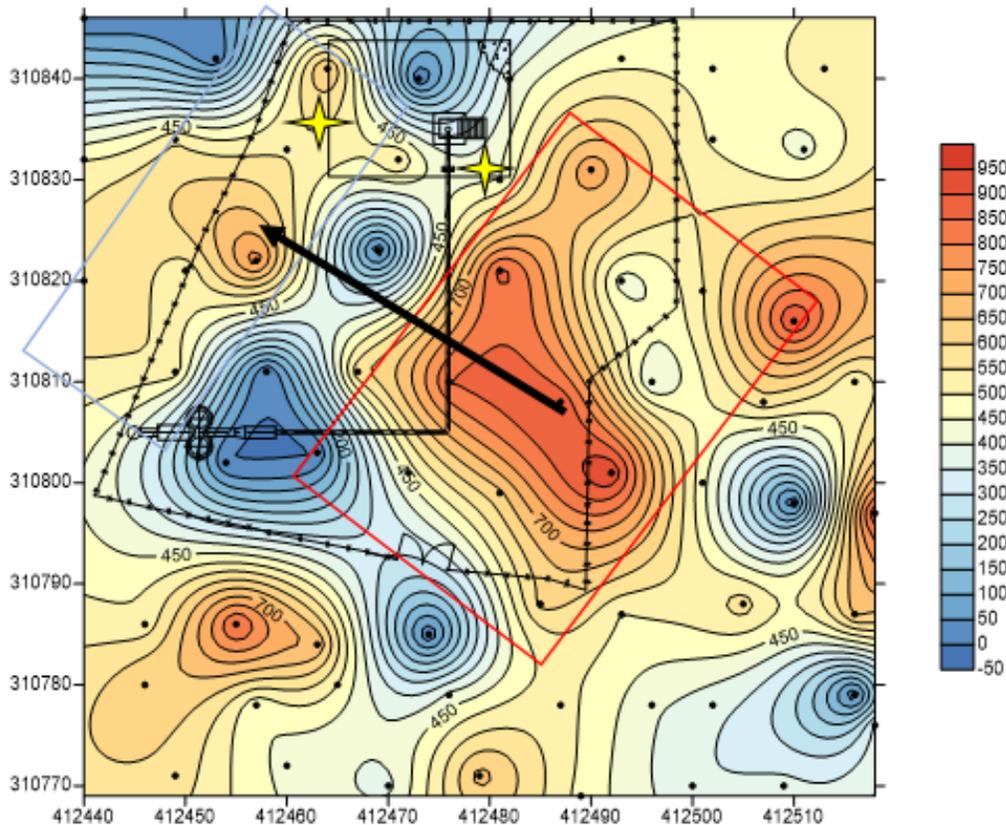


Fig. 44 Ilustración resumen del fenómeno constatado en la plataforma del pozo.

La región indicada en rojo en la Figura 44, es el sector con mayor concentración de CO_2 y Hg, comportamiento característico de la presencia de vapor geotérmico. Por lo que es la zona de mayor alteración.

La circunscripción en amarillo se define como la zona de alteración secundaria. Ya que gases como: H_2S , H_2 y He se manifiestan, dando la extrospección del afloramiento de una alteración primaria.

La migración de la zona de alteración es indicada con una flecha en la Figura 44 y la locación de la propuesta de realización de obras de mitigación es indicada con estrellas, ya que se establecen como las áreas de mayor prioridad.

Las obras que se recomiendan llevar a cabo son respiraderos para de esa forma evitar el avance de la alteración del suelo y de esa forma preservar la integridad de la plataforma.

9 Conclusiones

Según el resultado del análisis realizado, se concluye lo siguiente:

1. Las vibraciones en la tubería de conducción del pozo productor analizado son inducidos por el patrón de flujo bifásico tipo “Slug” que asciende por la tubería de producción del pozo desde el reservorio. Las vibraciones son amplificadas por la forma (3D, según ASME) y falta de rigidez de la tubería en los tramos analizado (P0 a P6), donde se ha observado que la tubería no tiene contacto con sus bases o soportes.
2. Tanto la velocidad como el desplazamiento de la vibración medidas presentan un valor máximo en la ubicación P5, punto próximo al soporte con resorte de carga constante que sostiene, aproximadamente, 22 metros de tubería, distancia en la cual la tubería no tiene contacto con su base. Según norma ASME B31.1, el máximo espaciamiento (Span) entre soportes para una tubería de Ø24” es entre 9.8 y 12.8 m, lo anterior depende si el fluido es líquido o vapor de agua. Con base a lo anterior, es evidente que la separación adicional (más de 9 m) produce una mayor flexibilidad en la tubería que reduce su frecuencia natural, siendo esta más fácil de igualar por la frecuencia de la fuerza de excitación inducida por el fluido bifásico.
3. Según la ecuación que relaciona la frecuencia natural con la rigidez y la masa de la tubería $\{f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m} [Hz]\}$, para desfasar (adelantar o retroceder) las frecuencias entre la natural de la tubería y la correspondiente a la fuerza de excitación, se puede hacer modificando (aumentar o disminuir) la tasa de flujo del pozo, cambiando así el patrón de flujo hasta hacerlo del tipo “Annular Mist”. No obstante, reducir el flujo del pozo no es conveniente por la reducción de vapor para la central geotérmica y la respectiva pérdida en generación. Por otro lado, aumentar el flujo puede ser una opción factible, no obstante, éste no puede ser incrementado a voluntad en vista que existen límites impuestos por la permeabilidad del reservorio aledaño al pozo y las pérdidas por rozamiento en la tubería de conducción en superficie.
Por el lado de la tubería, la opción de incrementar la masa de la tubería (actualmente de 14 toneladas entre P0 y P6) para reducir su frecuencia natural es una posibilidad, sin embargo agregar más masa representa un peso muerto con un costo que podría ser considerable; la cantidad de masa a agregada se determinará haciendo un análisis más detallado como el FEA. Por otro lado, también se puede incrementar la rigidez de la tubería, ya sea incrementando su diámetro o aumentando el contacto entre la tubería y sus soportes.
4. Parte del análisis también concluyó que el uso del soporte tipo resorte sin amortiguación contribuye con el incremento de las vibraciones ya que, tanto la fuerza como el desplazamiento de vibración ascendente están en fase. Como parte del análisis también se consideró una configuración sin resorte en el P4, el resultado muestra que los esfuerzos principales no se incrementan de forma considerable.

5. Según el resultado del cálculo con la ecuación [1], para el tramo de tubería analizado, la velocidad de vibración admisible es de 20.35 mm/s, un valor cercano al máximo medido en P5. No obstante, la norma ASME OM-3 sugiere un límite admisible de 12.7 mm/s, por encima del cual se recomienda realizar una evaluación más detallada para reducir dichos valores.
6. El esfuerzo de operación en el punto P5, según configuración actual, es 49.24 MPa, valor bajo comparado con el límite de fatiga de 89.93 MPa indicado en la figura 23 para vida infinita. Lo anterior indica que la tubería aún está en la zona segura de operación pese a la cantidad de ciclos de operación desde su puesta en operación (2014) hasta la fecha.
7. En visto de que la magnitud de las vibraciones de la tubería es muy impredecible, es muy difícil tenerlo en cuenta durante la fase de diseño. No obstante, consideraciones adicionales deberán ser tomadas para anticipar los problemas asociados a las vibraciones inducidas por el fluido si se sabe que el tipo de fluido por ser transportado es de tipo bifásico o pulsante.
8. La aceptabilidad de un sistema de tubería que vibra está relacionado con el nivel de esfuerzo al que esté sometido la tubería, el cual deberá ser calculado preferentemente mediante Análisis de Elemento Finito (FEA), y a consideraciones psicológicas que tiene que ver más con la percepción de inseguridad que puede causar alarma cuando se ve y escucha una tubería vibrar o hacer ruido.
9. Con la implementación de la propuesta de restauración de canaletas existentes y fabricación de según propuesta, El costo total es de \$281,984.31, del cual \$83,345.29 es para obra de mitigación la cual contempla: limpieza de la plataforma, restitución con suelo cemento en las áreas más afectadas por la humedad; cobertura en toda la plataforma con grava según especificaciones técnicas. En caso que no se realice la aplicación de grava, se recomienda crear un acceso con empedrado fraguado según especificaciones técnicas.

10 Recomendaciones

Entre las principales recomendaciones de este documento, se citan las siguientes:

1. Se recomienda realizar un análisis de vibraciones más detallado combinando mediciones con técnicas de Análisis de Elemento Finito para determinar si no existe riesgo de falla en la tubería al mismo tiempo para confirmar que la magnitud de velocidad calculada para la tubería es el admisible.
2. Se recomienda realizar las modificaciones en la tubería según propuesta indicadas en las figuras 18 y 19, con lo cual se reducirá considerablemente la caída de presión (< 0.5 bar) entre el cabezal y las estaciones de separación, respecto al valor actual (2.67 bar). Con la reducción de las pérdidas también se reducirá la presión de cabezal, incrementando así la producción de flujo bifásico y por lo tanto el flujo de vapor hacia la planta. Se estima que el incremento de vapor incremente la generación entre 2.5 y 3.5 MW, magnitud que deberá ser verificada mediante pruebas de producción.
3. Como acción inmediata, se recomienda hacer los ajustes en el brazo del resorte (punto P4) para permitir el contacto de la tubería con sus soportes para reducir las vibraciones. Al mismo tiempo, evaluar la conveniencia de ejercer una precarga en la tubería agregando, por ejemplo, lámina de acero de 1/16" de espesor, entre el patín y la base de la tubería con lo cual se aumentará la fuerza de fricción. Luego de lo anterior verificar nuevamente las vibraciones y comprar el resultado de la medición con la línea base existente, así como también contra el valor de referencia de 12.7 mm/s recomendado por la norma ASME OM-3.
4. Con la modificación del sistema de acarreo de flujo bifásico se espera un incremento de flujo del pozo, predominantemente hacia el separado de 550 tph. Por lo anterior, Se recomienda mantener conectado el pozo a ambos separadores para balancear los flujos.
5. Se recomienda instalar un sistema de medición de flujo de vapor y líquido en la salida de cada separador para así hacer un balance de flujo másico más efectivo. Como recomendación, el flujo máximo por separador no deberá superar el 90% de su capacidad de diseño.
6. Según el patrón obtenido en el análisis de entalpías para el pozo productor, se presupone la entrada de vapor separado en conjunto con la ebullición en el reservorio. Se recomienda realizar un estudio posterior con el objetivo de conocer la cantidad de vapor adicional que ingresa al sistema para determinar y avalar el patrón de flujo determinado por la simulación en HOLA.
7. Ejecutar una nueva campaña de análisis de gases difusos en la plataforma del pozo, en los mismos puntos de muestreo anteriores para respaldar y examinar las zonas de alteración problemáticas determinadas en este estudio y de dicha forma instalar respiradores en las zonas indicadas.

11 Bibliografía

- Alain, N., Luis, B., & Laurence, D. (2011). *FATIGUE DESIGN OF STEEL AND COMPOSITE STRUCTURES, Eurocode 3: Design of Steel Structures*. Wiley Blackwell Ernst & Sohn.
- Alan, P. (2016). *Vibration Theory and Applications with Finite Element and Active Vibrations Control*. Wiley.
- ASMEOM-S/G. (2000). "Standards and Guides for Operation and Maintenance of Nuclear Power Plants – Part 3 Requirements for Pre-operational and Initial Start-up Vibration Testing of Nuclear Power Plant Piping Systems". New York, NY.
- Bjornsson, G., & Arason, P. (1993). A Multiple-Feedzone Geothermal wellbore Simulator. Reykjavik, Iceland.
- Coleman, N. (08 de Noviembre de 2019). *Signalysis, Inc*. Obtenido de <https://www.signalysis.com/company/signalysis-at-work/dynamic-defect-detection-part-i-theory/>
- Energy Institute. (2019). *Guidelines for the avoidance of vibration induced fatigue failure in process pipework*. London: Energy Institute.
- ESDU_89012, I. (s.f.). *Two-phase flow pressure losses in pipeline fittings*. Recuperado el 8 de Noviembre de 2019, de https://www.esdu.com/cgi-bin/ps.pl?sess=unlicensed_1191109034831tky&t=doc&p=esdu_89012a
- Fei, X., Lei, L., & Wenxin, T. N. (2012). *VIBRATION ASSESSMENT METHOD AND ENGINEERING APPLICATIONS TO SMALL BORE PIPING IN NUCLEAR POWER PLANT*. IAEA-CN-155-055.
- Jolie, E. &. (12-14 de Febrero de 2018). Gases and emanations at the geosphere-atmosphere interface and their relevance for geothermal system analysis. *Engineering Stanford University, Stanford*.
- Kaneko, S. N. (2014). *Flow-induced Vibrations*. Academic Press, Oxford.
- Kostarev, V., Tuomas, A., & Heinz Reinsch, K. (2007). Resolving of Steam and Feed-Water Piping Vibration Matter at Loviisa NPP. 8.
- Leishear, R. (2009). *Fluid Mechanics, Water Hammer, Dynamics Stresses and Piping Design*. NY: ASME PRESS.
- Liang-Chuan, P., & Tsen- Loong, P. (2009). *Pipe Stress Engineering*. ASME Press.
- López, N. (8 de Noviembre de 2019). Asesoría. (M. Alegría, Entrevistador)

MERIKOSKI, M. (2017). *PIPE VIBRATIONS IN NUCLEAR APPLICATIONS, REPORT 2017:451NUCLEAR*. ISBN 978-91-7673-451-3.

Nicholson, K. (1993). *Geothermal Fluids. Chemistry and Exploration Techniques*. Berlin Heidelberg: © Springer-Verlag.

Quijano, J. (2019). *Producción/Reservorios LaGEO S.A. de CV*. Recuperado el 01 de Noviembre de 2019, de Producción/reservorios

Shigehiko, K., Tomomichi, N., Fumio, I., & Minoru, K. (2008). *Flow-Induced Vibrations*. UK: Elsevier.

STEWART, M. (2016). *Surface Production Operations, Facility Piping and Pipeline Systems VIII*. UK: ELSEVIER.

Truesdell, A., Lippmann, M., Quijano, J., & F.D'Amore. (1995). *Chemical and physical indicators of reservoir processes in exploited high-temperature, liquid dominated geothermal fields*. Florencia, Italia: Proc. world geothermal congress.

12 Anexos

12.1 Resultado de la simulación en hola para un flujo de 100 kg/s

Wellhead pressure (bar-a)	:	9.44
Wellhead temperature (úC)	:	177.40
Wellhead dryness (%)	:	20.19
Wellhead enthalpy (kJ/kg)	:	1160.00
Wellhead total flow (kg/s)	:	102.00

Feedzone	Depth (m)	Flow (kg/s)	Enthalpy (kJ/kg)
1	580.0	102.00	1173.15

Depth (m)	Press (bar-a)	Temp (úC)	Dryness (%)	Hw	Hs	Ht	Vw	Vs	Dw	Ds	Rad	Reg
				---- (kJ/kg) ---			---- (m/s) ----		-- (kg/m3) --			(mm)
0	9.4	177.4	20.2	752	2774	1160	49.89	55.92	889.7	4.9	157	Tr
20	9.9	179.6	19.8	761	2776	1160	51.20	52.17	887.3	5.1	157	Tr
40	10.6	182.6	19.3	775	2778	1161	32.01	48.32	884.1	5.5	157	S1
60	11.2	184.7	18.9	784	2780	1162	30.17	45.43	881.8	5.7	157	S1
80	11.7	186.7	18.6	793	2782	1162	28.55	42.69	879.7	6.0	157	S1
100	12.1	188.5	18.3	801	2783	1163	27.10	40.62	877.7	6.2	157	S1
120	12.6	190.3	17.9	809	2784	1163	25.80	38.59	875.8	6.4	157	S1
140	13.1	191.9	17.6	816	2786	1164	24.62	36.76	873.9	6.7	157	S1
160	13.5	193.5	17.4	823	2787	1164	23.54	35.09	872.1	6.9	157	S1
180	14.0	195.0	17.1	830	2788	1164	22.55	33.56	870.4	7.1	157	S1
200	14.4	196.5	16.8	836	2789	1165	21.65	32.15	868.7	7.3	157	S1
220	14.9	197.9	16.6	843	2790	1165	20.80	30.85	867.1	7.5	157	S1
240	15.3	199.2	16.3	849	2790	1166	20.02	29.64	865.6	7.7	157	S1
260	15.7	200.6	16.1	855	2791	1166	19.29	28.52	864.0	8.0	157	S1
280	16.2	201.8	15.8	861	2792	1167	18.61	27.46	862.5	8.2	157	S1
300	16.6	203.1	15.6	866	2793	1167	17.97	26.48	861.1	8.4	157	S1
320	17.0	204.3	15.4	872	2793	1167	17.36	25.55	859.6	8.6	157	S1
340	17.4	205.5	15.2	877	2794	1168	16.79	24.68	858.2	8.8	157	S1
360	17.8	206.6	15.0	882	2795	1168	16.25	23.85	856.9	9.0	157	S1
380	18.2	207.8	14.7	888	2795	1169	15.74	23.07	855.5	9.2	157	S1
400	18.7	208.9	14.5	893	2796	1169	15.25	22.32	854.2	9.4	157	S1
420	19.1	209.9	14.3	897	2796	1170	14.81	21.65	852.9	9.6	157	S1
440	19.4	210.9	14.2	902	2797	1170	14.40	21.03	851.7	9.8	157	S1
460	19.8	211.9	14.0	906	2797	1171	14.02	20.45	850.5	9.9	157	S1
480	20.2	212.8	13.8	911	2797	1171	13.65	19.89	849.4	10.1	157	S1
500	20.6	213.8	13.6	915	2798	1171	13.29	19.35	848.2	10.3	157	S1
520	20.9	214.7	13.4	919	2798	1172	12.95	18.83	847.1	10.5	157	S1
540	21.3	215.6	13.3	923	2798	1172	12.62	18.33	845.9	10.7	157	S1
560	21.7	216.5	13.1	927	2799	1173	12.30	17.85	844.8	10.9	157	S1
580	22.1	217.4	12.9	932	2799	1173	11.99	17.38	843.7	11.1	157	S1

12.2 Resultado de la simulación en hola para un flujo de 115 kg/s

```

Wellhead pressure (bar-a)      :      9.04
Wellhead temperature (úC)     :      175.55
Wellhead dryness (%)          :      20.53
Wellhead enthalpy (kJ/kg)     :     1160.00
Wellhead total flow (kg/s)    :     115.50
    
```

```

Feedzone      Depth      Flow      Enthalpy
              (m)        (kg/s)    (kJ/kg)
-----
1             580.0      115.50    1172.34
-----
    
```

Depth (m)	Press (bar-a)	Temp (úC)	Dryness (%)	Hw ----- (kJ/kg)	Hs	Ht	Vw ----- (m/s)	Vs	Dw -- (kg/m3)	Ds	Rad	Reg (mm)
0	9.0	175.5	20.5	743	2772	1160	11.69	73.90	891.6	4.7	157	Tr
20	9.9	179.5	19.8	761	2776	1160	11.11	65.98	887.4	5.1	157	Tr
40	10.7	183.0	19.2	776	2779	1161	10.61	59.64	883.7	5.5	157	S1
60	11.5	186.2	18.6	791	2781	1161	10.18	54.41	880.2	5.9	157	S1
80	12.3	189.2	18.1	804	2784	1162	9.80	50.01	877.0	6.3	157	S1
100	13.1	191.9	17.6	816	2786	1162	9.46	46.23	873.9	6.7	157	S1
120	13.8	194.5	17.1	828	2787	1163	9.15	42.94	871.0	7.0	157	S1
140	14.6	196.9	16.6	839	2789	1163	8.87	40.05	868.2	7.4	157	S1
160	15.3	199.2	16.2	849	2790	1163	8.61	37.47	865.6	7.7	157	S1
180	16.0	201.5	15.8	859	2792	1164	8.37	35.16	863.0	8.1	157	S1
200	16.7	203.6	15.4	869	2793	1164	8.14	33.07	860.5	8.5	157	S1
220	17.5	205.6	15.0	878	2794	1165	7.93	31.17	858.1	8.8	157	S1
240	18.2	207.6	14.6	887	2795	1165	7.73	29.43	855.7	9.2	157	S1
260	18.9	209.4	14.2	895	2796	1165	7.55	27.90	853.5	9.5	157	S1
280	19.5	211.1	13.9	903	2797	1166	7.39	26.56	851.5	9.8	157	S1
300	20.1	212.7	13.6	910	2797	1166	7.23	25.31	849.5	10.1	157	S1
320	20.8	214.3	13.2	918	2798	1167	7.08	24.14	847.5	10.4	157	S1
340	21.4	215.9	12.9	925	2799	1167	6.93	23.04	845.5	10.6	157	S1
360	22.1	217.4	12.6	932	2799	1168	6.79	22.00	843.6	11.1	157	S1
380	22.7	219.0	12.3	939	2800	1168	6.66	21.02	841.7	11.4	157	S1
400	23.4	220.4	12.0	946	2800	1168	6.52	20.09	839.8	11.7	157	S1
420	24.1	221.9	11.7	953	2800	1169	6.40	19.21	837.9	12.0	157	S1
440	24.7	223.4	11.4	959	2801	1169	6.27	18.37	836.1	12.4	157	S1
460	25.4	224.8	11.1	966	2801	1170	6.15	17.57	834.2	12.7	157	S1
480	26.1	226.2	10.8	972	2801	1170	6.02	16.81	832.3	13.1	157	S1
500	26.8	227.6	10.5	979	2802	1171	5.91	16.08	830.5	13.4	157	S1
520	27.5	229.0	10.2	986	2802	1171	5.79	15.38	828.7	13.7	157	S1
540	28.2	230.4	9.9	992	2802	1171	5.67	14.70	826.8	14.1	157	S1
560	28.9	231.7	9.6	998	2802	1172	5.56	14.06	825.0	14.4	157	S1
580	29.6	233.1	9.3	1005	2802	1172	5.45	13.43	823.1	14.8	157	S1

12.3 Resultado de la simulación en hola para un flujo de 150 kg/s

```

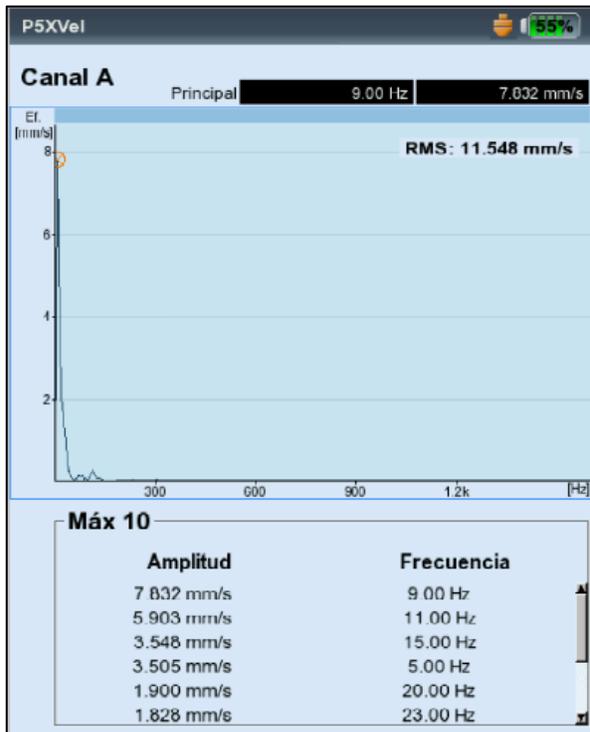
Wellhead pressure (bar-a)      :      8.44
Wellhead temperature (úC)     :      172.65
Wellhead dryness (%)          :      21.05
Wellhead enthalpy (kJ/kg)     :      1160.00
Wellhead total flow (kg/s)    :      152.00
    
```

```

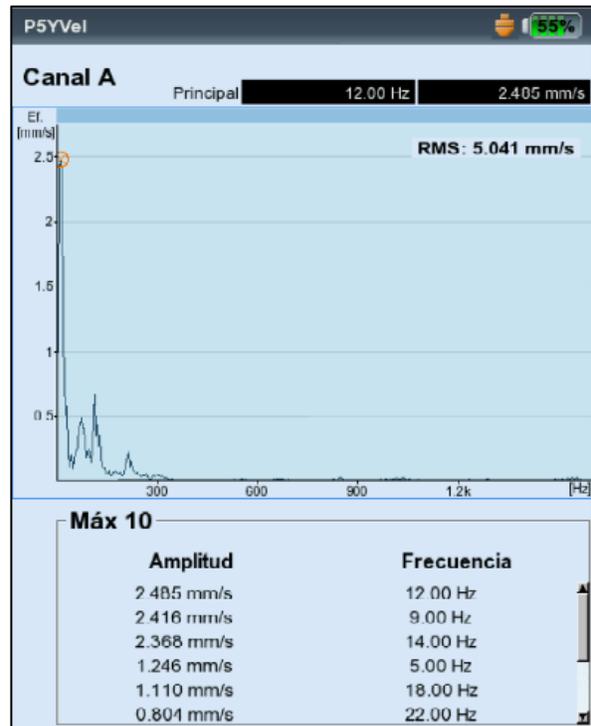
Feedzone      Depth      Flow      Enthalpy
              (m)        (kg/s)    (kJ/kg)
-----
1             580.0      152.00    1174.84
-----
    
```

Depth (m)	Press (bar-a)	Temp (úC)	Dryness (%)	Hw ----	Hs (kJ/kg)---	Ht ----	Vw ----	Vs (m/s)----	Dw --	Ds (kg/m3)--	Rad	Reg
0	8.4	172.6	21.1	731	2770	1160	96.10	96.10	894.6	4.4	157	Mi
20	10.0	179.9	19.8	763	2776	1162	71.97	77.58	887.0	5.1	157	Tr
40	11.4	185.7	18.9	788	2781	1164	49.18	65.84	880.8	5.8	157	S1
60	12.4	189.6	18.1	806	2784	1164	43.95	58.63	876.5	6.3	157	S1
80	13.4	192.9	17.5	821	2786	1165	39.85	53.00	872.7	6.8	157	S1
100	14.3	196.0	17.0	834	2788	1165	36.53	48.45	869.3	7.2	157	S1
120	15.1	198.7	16.4	846	2790	1166	33.75	44.66	866.2	7.7	157	S1
140	15.9	201.2	16.0	858	2792	1166	31.39	41.44	863.3	8.1	157	S1
160	16.7	203.5	15.5	868	2793	1167	29.35	38.66	860.6	8.4	157	S1
180	17.5	205.6	15.1	878	2794	1167	27.56	36.23	858.1	8.8	157	S1
200	18.2	207.6	14.7	887	2795	1168	25.97	34.08	855.7	9.2	157	S1
220	18.8	209.3	14.4	894	2796	1168	24.74	32.42	853.7	9.5	157	S1
240	19.3	210.6	14.1	901	2796	1168	23.80	31.15	852.1	9.7	157	S1
260	19.8	211.9	13.9	906	2797	1169	22.92	29.97	850.5	10.0	157	S1
280	20.3	213.1	13.6	912	2798	1169	22.10	28.87	849.0	10.2	157	S1
300	20.8	214.3	13.4	917	2798	1169	21.34	27.83	847.5	10.4	157	S1
320	21.3	215.5	13.2	923	2798	1170	20.61	26.86	846.1	10.7	157	S1
340	21.7	216.6	12.9	928	2799	1170	19.93	25.95	844.6	10.9	157	S1
360	22.2	217.7	12.7	933	2799	1171	19.28	25.08	843.2	11.1	157	S1
380	22.7	218.8	12.5	938	2800	1171	18.67	24.26	841.9	11.4	157	S1
400	23.1	219.9	12.3	943	2800	1171	18.09	23.48	840.5	11.6	157	S1
420	23.6	220.9	12.1	948	2800	1172	17.53	22.73	839.2	11.8	157	S1
440	24.1	221.9	11.9	953	2800	1172	17.00	22.02	837.9	12.1	157	S1
460	24.5	222.9	11.7	957	2801	1173	16.49	21.34	836.6	12.3	157	S1
480	25.0	223.9	11.5	962	2801	1173	16.00	20.69	835.3	12.5	157	S1
500	25.5	224.9	11.3	966	2801	1173	15.53	20.06	834.0	12.7	157	S1
520	25.9	225.9	11.1	971	2801	1174	15.07	19.46	832.8	13.0	157	S1
540	26.4	226.8	10.9	975	2802	1174	14.64	18.88	831.5	13.2	157	S1
560	26.9	227.8	10.7	980	2802	1174	14.21	18.32	830.3	13.4	157	S1
580	27.3	228.7	10.5	984	2802	1175	13.80	17.77	829.0	13.7	157	S1

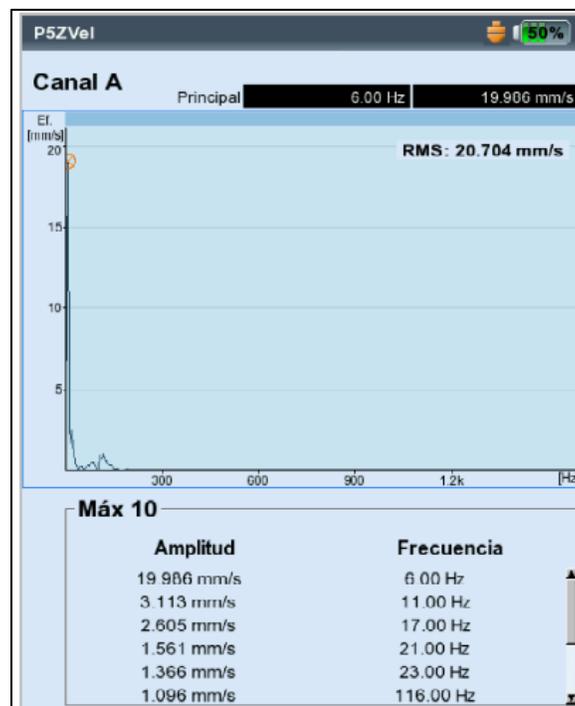
12.4 Gráficos de medición de velocidad de vibración en punto p5



Vibrovelocidad en dirección X (P5)

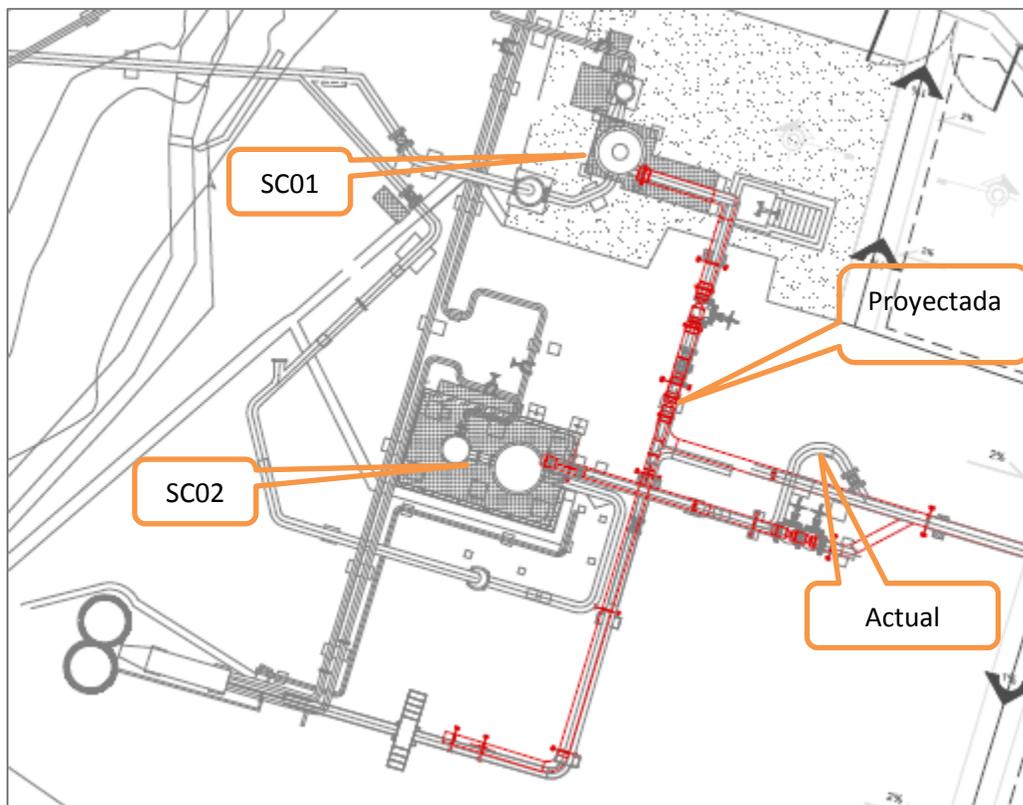
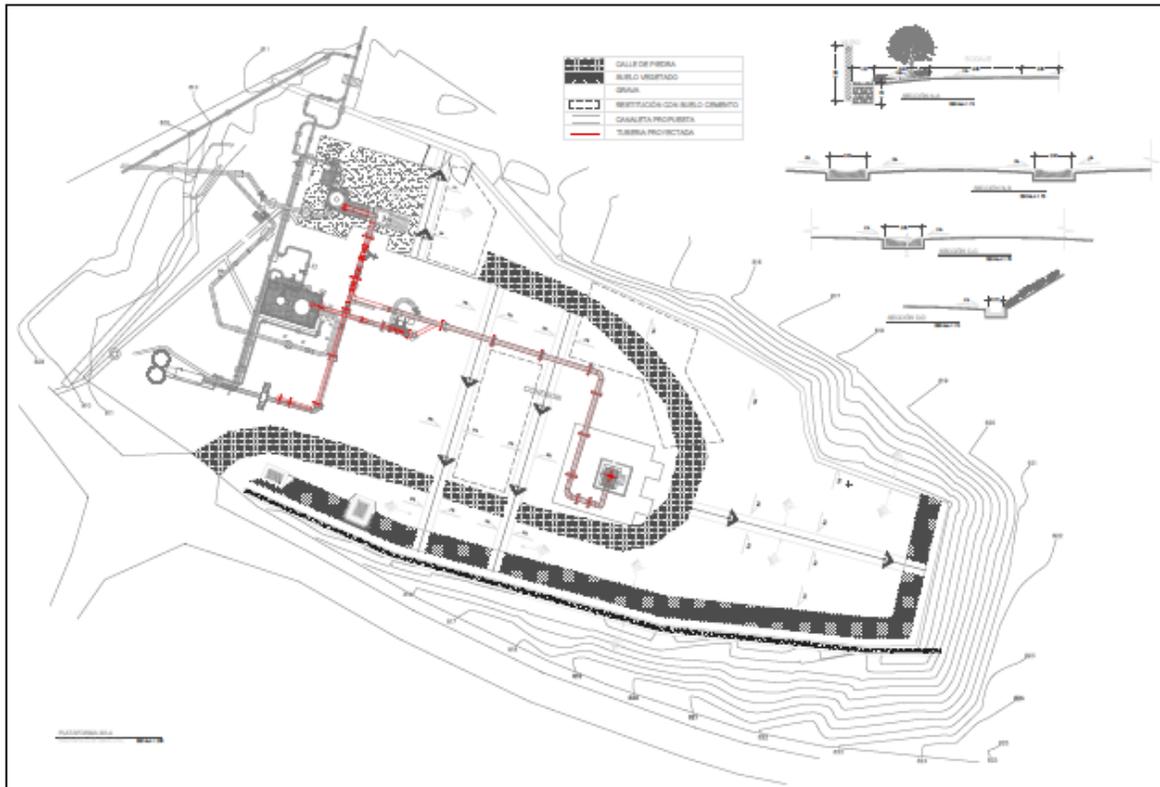


Vibrovelocidad en dirección y (P5)

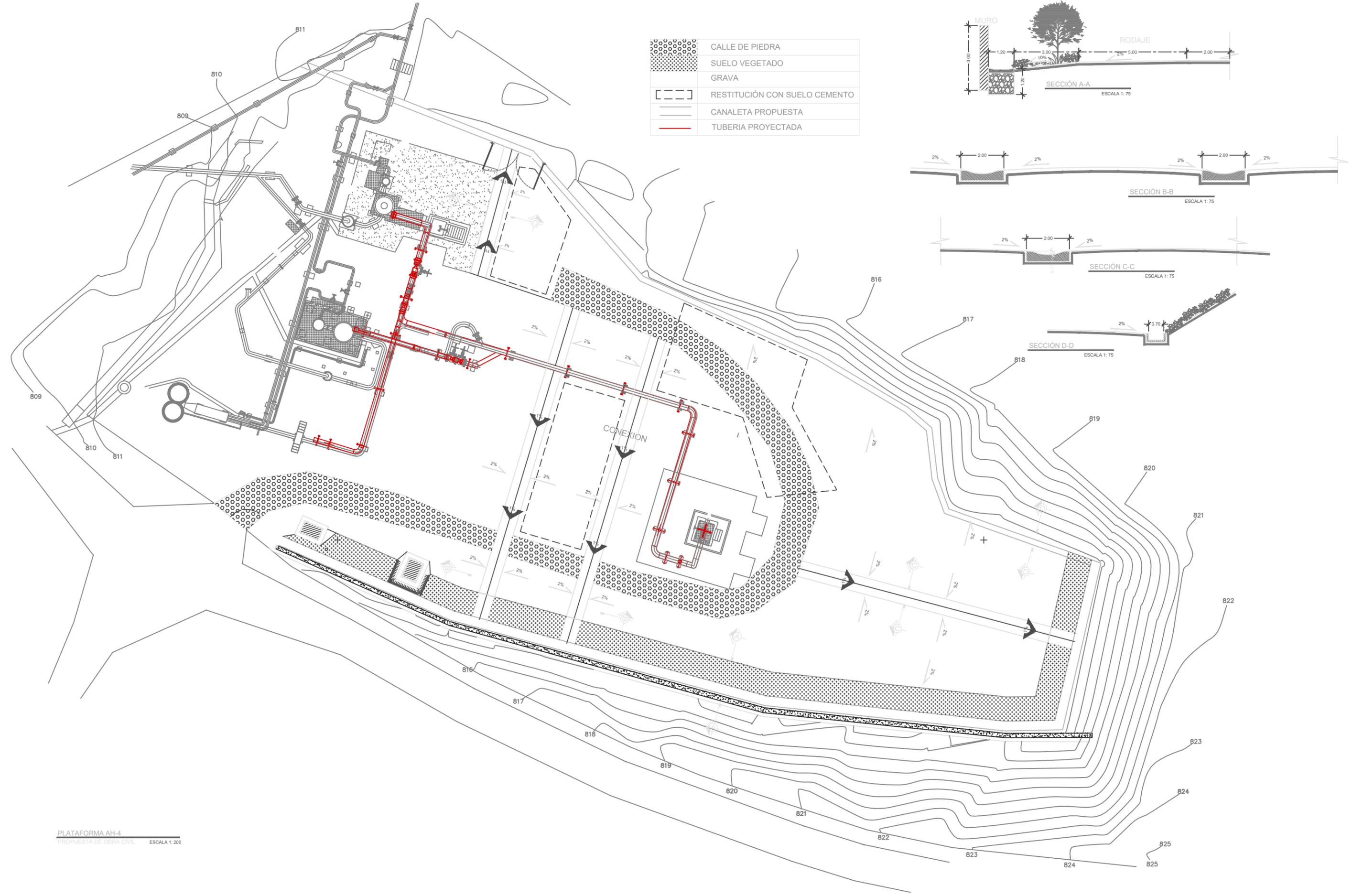
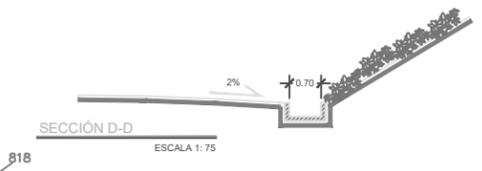
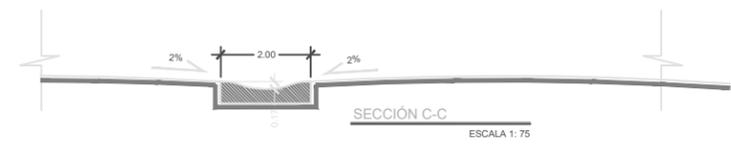
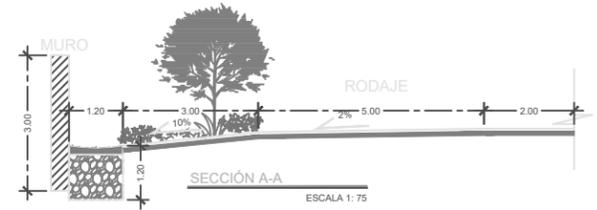


Vibrovelocidad en dirección Z (P5)

12.5 Propuesta de modificación de sistema de acarreo (color rojo)



	CALLE DE PIEDRA
	SUELO VEGETADO
	GRAVA
	RESTITUCIÓN CON SUELO CEMENTO
	CANALETA PROPUESTA
	TUBERIA PROYECTADA



***“DIAGNÓSTICO Y PROPUESTA PARA OPTIMIZACIÓN DE
LAS CONDICIONES OPERATIVAS DE UN POZO
GEOTÉRMICO PRODUCTOR EN EL SALVADOR”.***

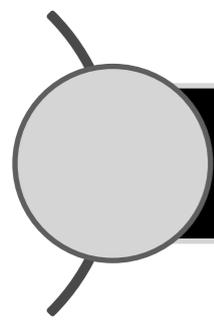
Presentado por:

Alegría, M.; Román, E.; Flamenco, A.

supervisó: Ing. Jorge Castillo/ Ing. Miguel Servellón

Contenido:

- Objetivos.
- Justificación.
- Descripción de las condiciones operativas.
- Análisis de la información recopilada.
- Propuestas de solución.
- Respuesta a preguntas de investigación



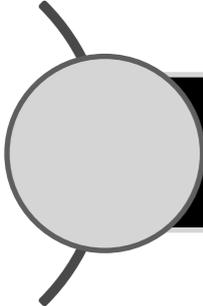
Objetivo:

OBJETIVO GENERAL:

Evaluación las instalaciones superficiales y condiciones operativas de un pozo geotérmico productor en El Salvador, para identificar oportunidades de mejora y así hacer más eficiente su producción de fluido geotérmico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Analizar registro histórico de variables medidas.**
- Listar y analizar condiciones operativas.**
- Proponer acciones de mejora para optimizar su producción.**

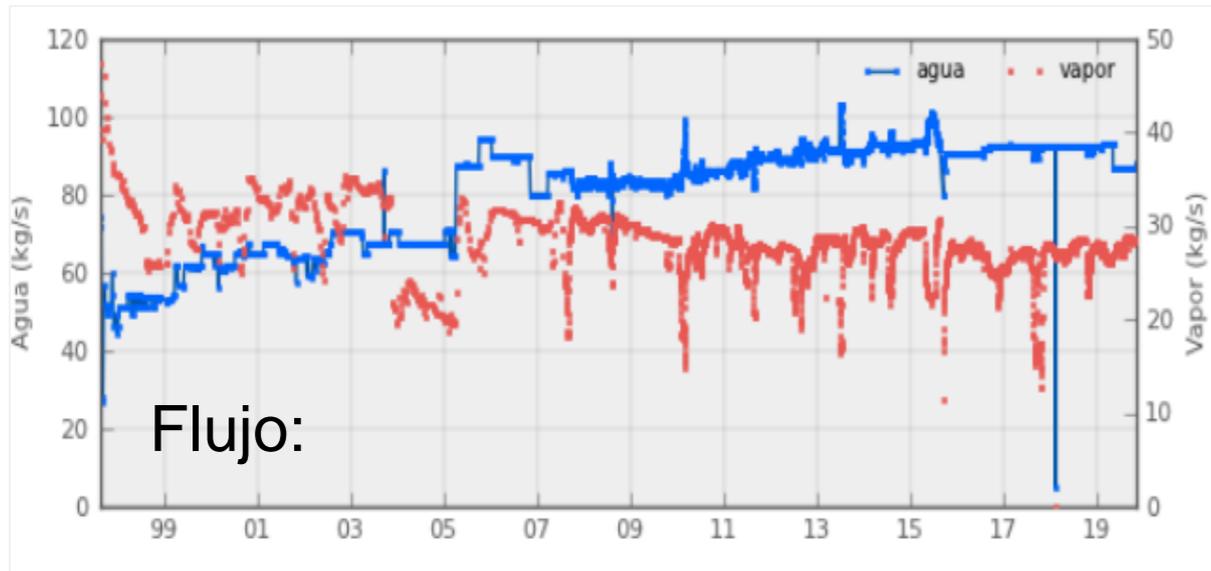


Justificación:

- ❖ Dada la contribución (12 MWe) que tiene este pozo respecto a la generación total (87MWe) de la Planta, se ha considerado apropiado hacer un análisis de la condición de operación actual y evaluar si existen alternativas que permitan incrementar su extracción de flujo másico en condiciones más eficientes, estables y seguras.

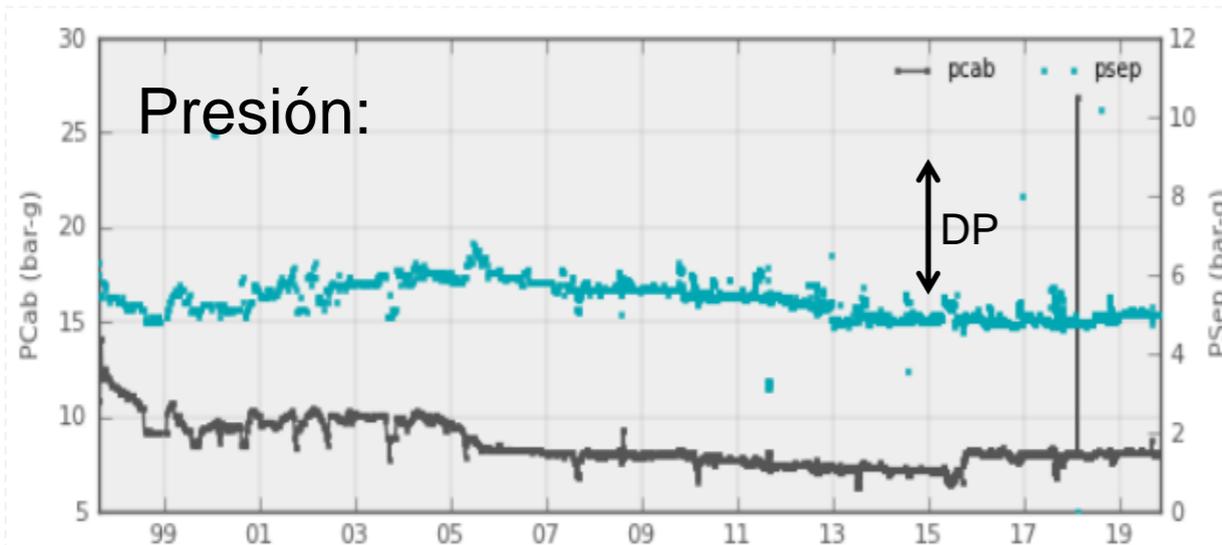
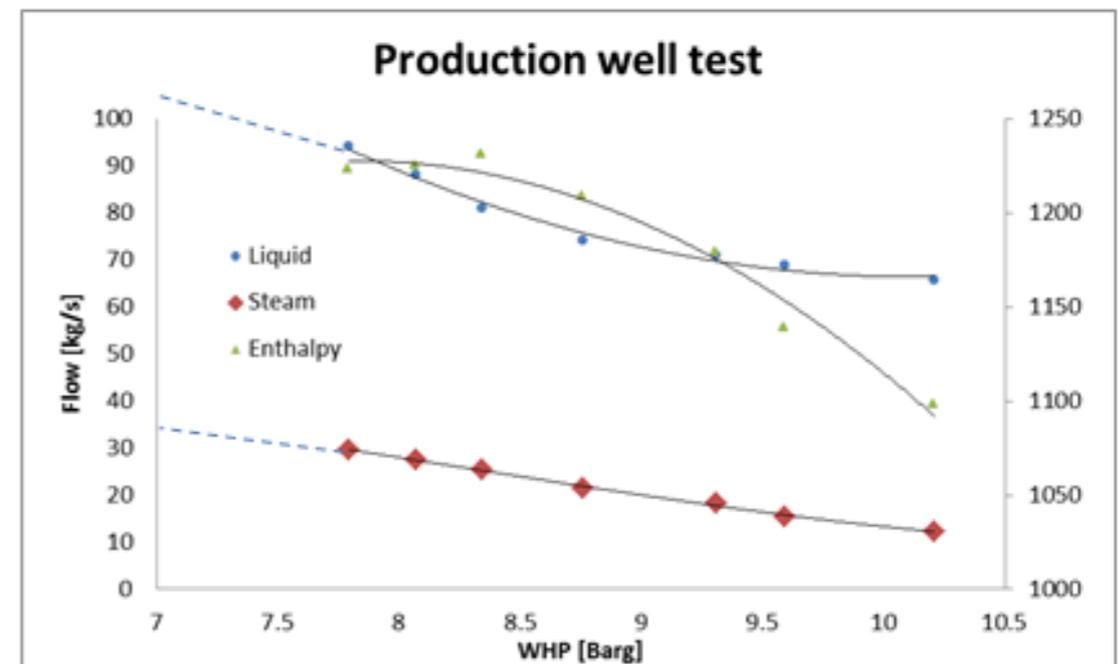
Justificación:

Características operativas del pozo analizado:



Variable medida	Magnitud promedio
PCab(barg)	7.90
PSep(barg)	5.23
Agua(kg/s)	87.25
vapor(kg/s)	27.78
x	0.24
h(kJ/kg)	1180.10

DP=2.67 bar



Condiciones operativas observadas



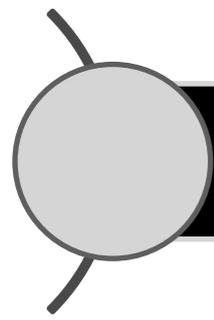
2) Vibraciones en separador ciclónico



Vibraciones mecánicas en tubería de conducción.
(medición por: Ing. Mario Herrera, CGAh).



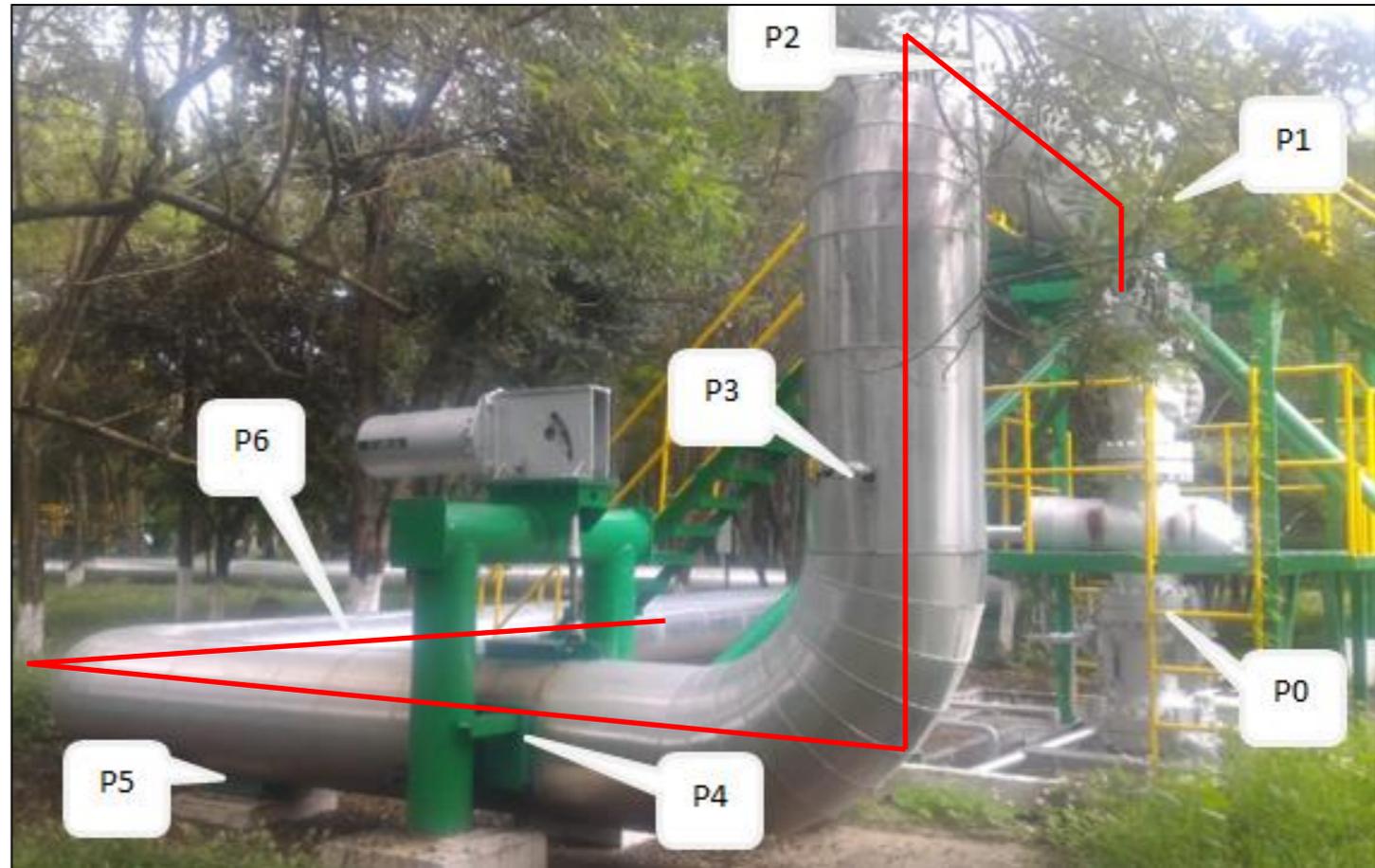
3) Caída de presión en tubería de conducción; 4) Suelo saturado con agua;



Vibraciones mecánicas:

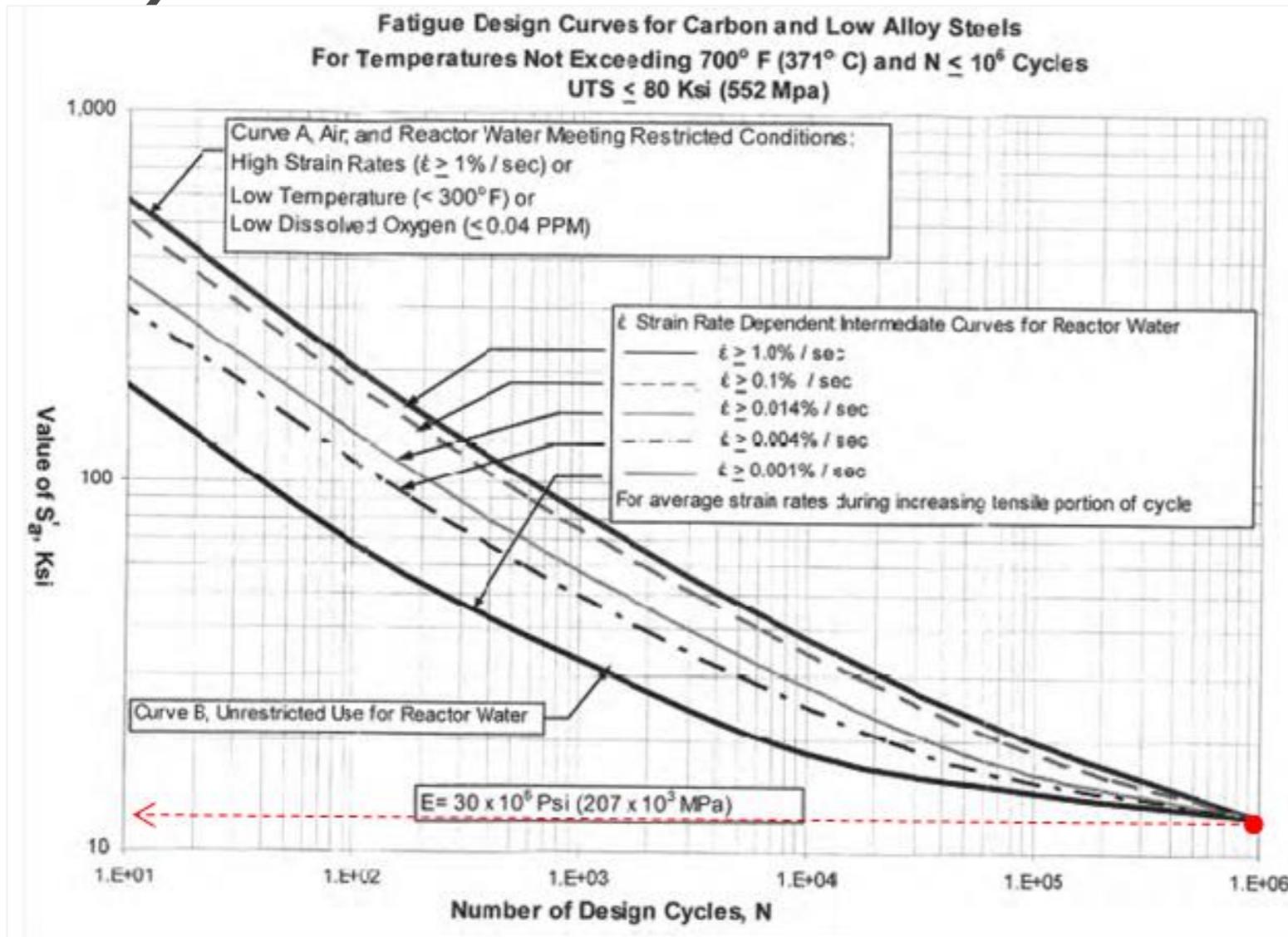
Resultado de mediciones:

1. Máximo valor de vibro-velocidad: 19.98 mm/s a un frecuencia de 6 Hz en P5.
2. En los punto P4, P5 y P6 la tubería no tiene contacto con sus soportes, P4 es un resorte que sostiene la tubería.
3. La vibración a 19.98 mm/s (0-P) es una condición de riesgo para la tubería?



Punto Med.	Velocidad (mm/s, 0-P)			Frecuencia (Hz)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
P0	0.704	0.766		43.0	24.0	
P1	7.176	2.449		14.0	21.0	
P2	9.824	6.063		13.0	16.0	
P3	6.175	4.585	9.337	12.0	13.0	6.0
P4	8.117	7.859		10.0	7.0	
P5	7.832	2.485	19.986	9.0	12.0	6.0
P6	6.580		8.653	9.0		6.0

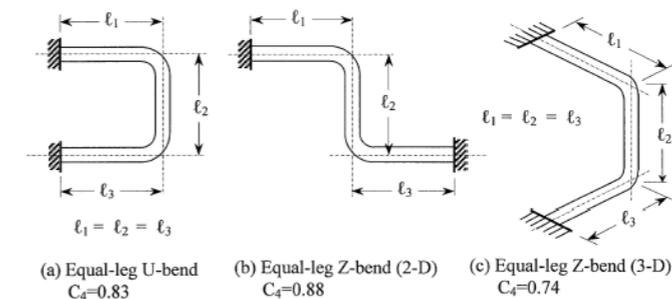
Velocidad admisible de vibración (Ø24)



curva de fatiga (S-N), para aleaciones de acero. (Leishear, 2009)

Según ASME OM-3

$$V_{Allow}^{Peak} = \frac{C_1 C_4}{C_3 C_5} \times \frac{3.64 \times 10^{-3}}{C_2 K_2} \times \frac{0.8 S_A}{\alpha} \left[\frac{in}{s} \right]$$



C4

$$C_1 = 0.216; C_2 K_2 = 4; C_3 = 1.45; C_4 = 0.74; C_5 = 1 \text{ y } S_A = 0.8 * 13 \frac{Ksi}{1.3} = 8 \text{ Ksi}$$

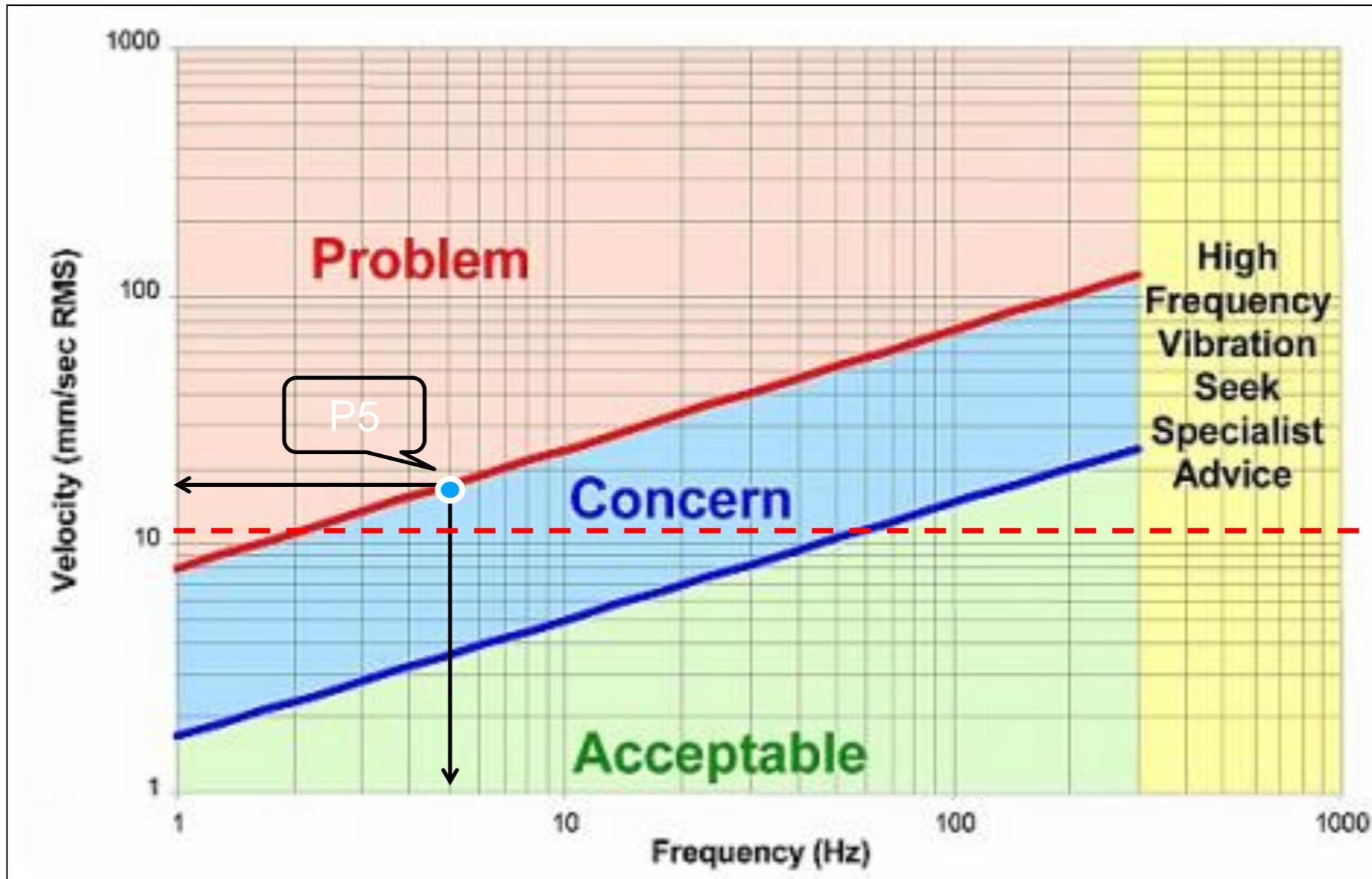
$$V_{Allow}^{Peak} = \frac{(0.216) * (0.74)}{(1.45) * (1)} \times \frac{3.64 \times 10^{-3}}{4} \times 8000 = 0.8 \left[\frac{in}{s} \right] \text{ ó } 20.35 \left[\frac{mm}{s} \right]$$

Velocidad de vibración admisible:

	Allowable	Additional analyses required	Mitigation required
ASME OMB-S/G-2002 (ASME 2002, p. 45)	< 12.7 mm/s (0-Peak)	> 12.7 mm/s (0-Peak)	-
Russian boiler standard RD 10-249-98 (Kostarev et al. 2007)	< 15 mm/s (0-Peak)	15 - 25 mm/s	> 25 mm/s
Loviisa nuclear power plant (Kostarev et al. 2007)	< 7.5 mm/s (RMS) & < 20 mm/s (0-Peak)	> 7.5 mm/s (RMS) & > 20 mm/s (0-Peak)	-
Germany, nuclear power plants (Fomin et al. 2001)	-	-	> 20 mm/s (RMS)
France, nuclear power plants (Seligmann & Guillou 1995)	< 12 mm/s (RMS)	> 12 mm/s (RMS)	-
Kostarev et al. (1999)	< 7.5 mm/s (RMS)	7.5 - 15 mm/s	> 15 mm/s

Compilación de velocidad de vibración en tubería (MERIKOSKI, 2017)

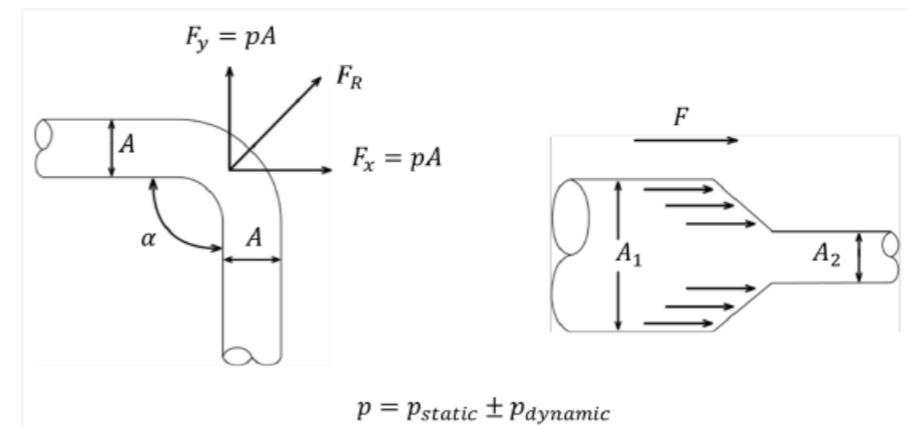
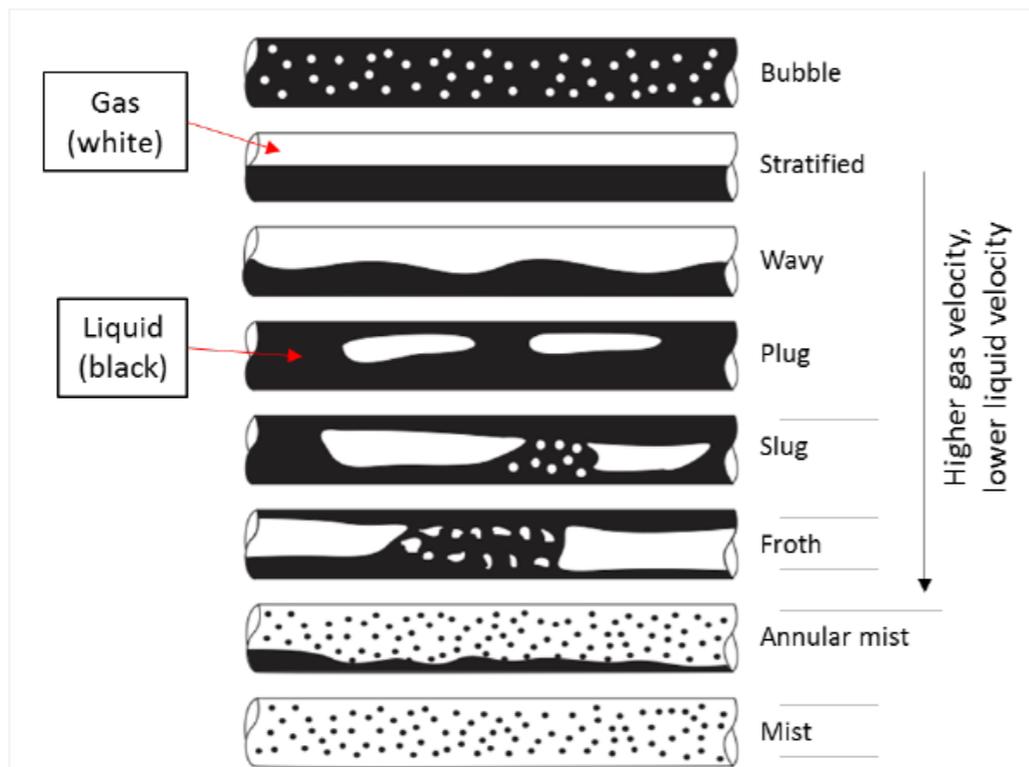
Velocidad de vibración admisible:



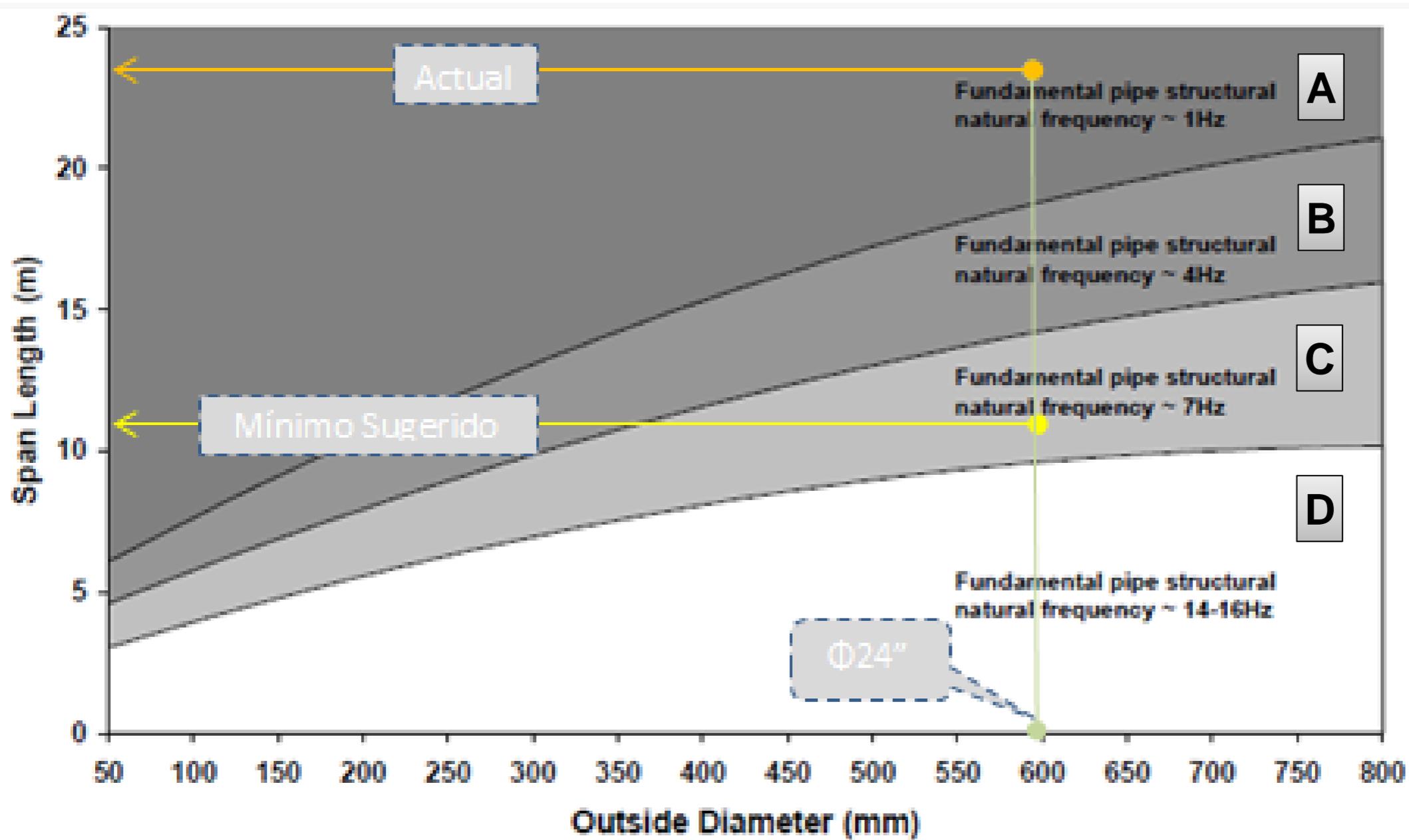
«Verein Deutscher Ingenieure» (VDI) Standard 3842:2004-06 curves

Qué provoca las vibraciones:

«Las vibraciones mecánicas son provocadas por el tipo de flujo que circula y la falta de rigidez de la tubería».



Velocidad de vibración admisible:



- A) flexible
- B) semi flexible
- C) semi rígida
- D) Rígida

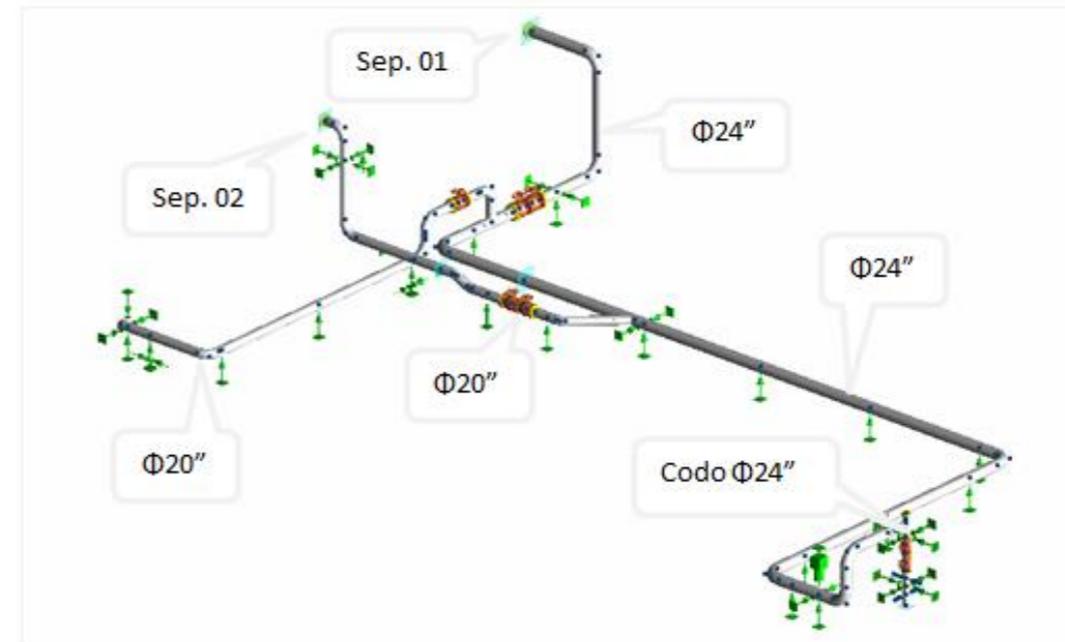
Frecuencia natural para diferentes diámetros de tubería y distancia entre soportes (Energy Institute, 2019)

Caída de presión:

Existente

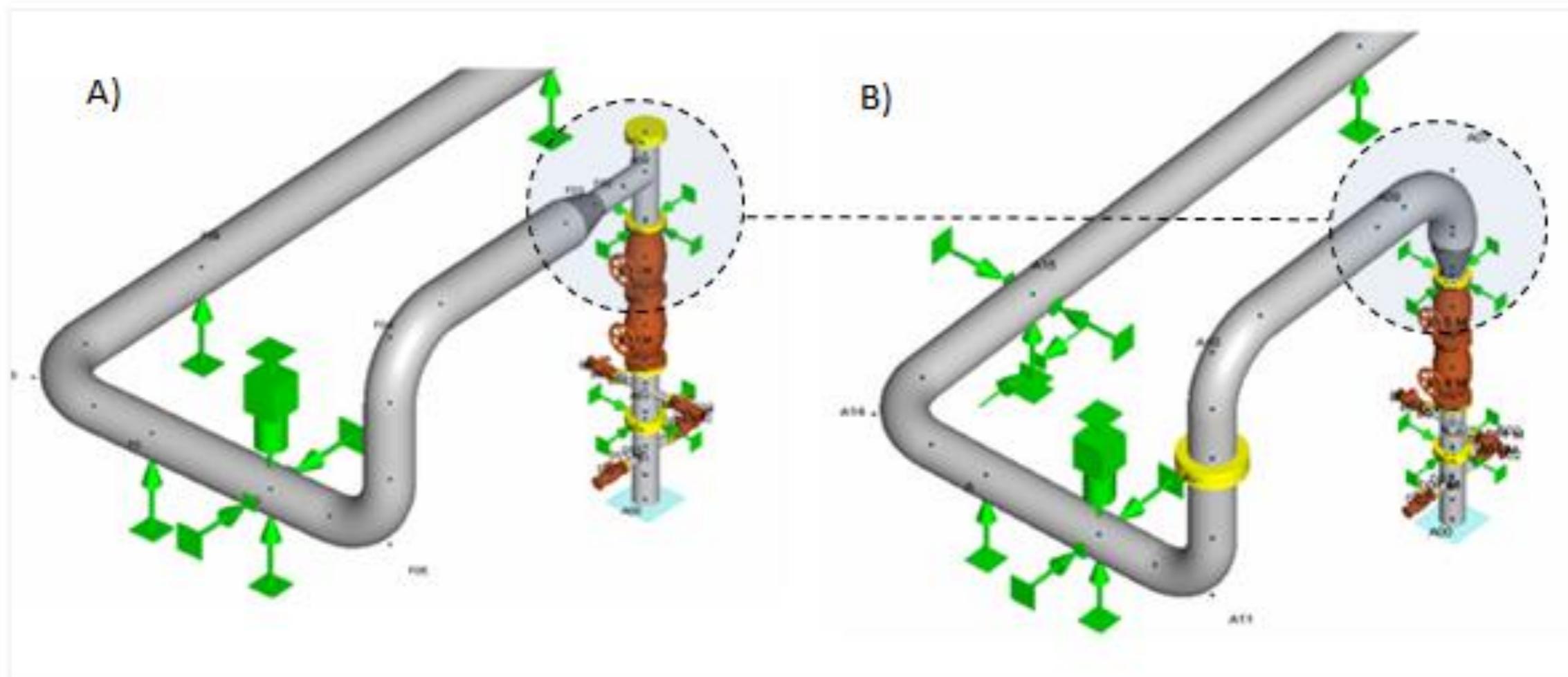


Propuesta

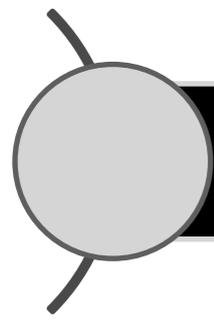


Flujo [kg/s]	Flujo [tph]	Calidad	Δp (bar)	Patrón de flujo	
				Horizontal	Verical
100	360	0.20	0.28	Stratified Way	Anular
110	396	0.20	0.35	Stratified Way	Anular
150	540	0.21	0.53	Anular	Anular

Modificación en contrapozo



A) Configuración árbol de contrapozo existente; B) Configuración de árbol de contrapozo propuesto.



Variación de la entalpía contra el flujo

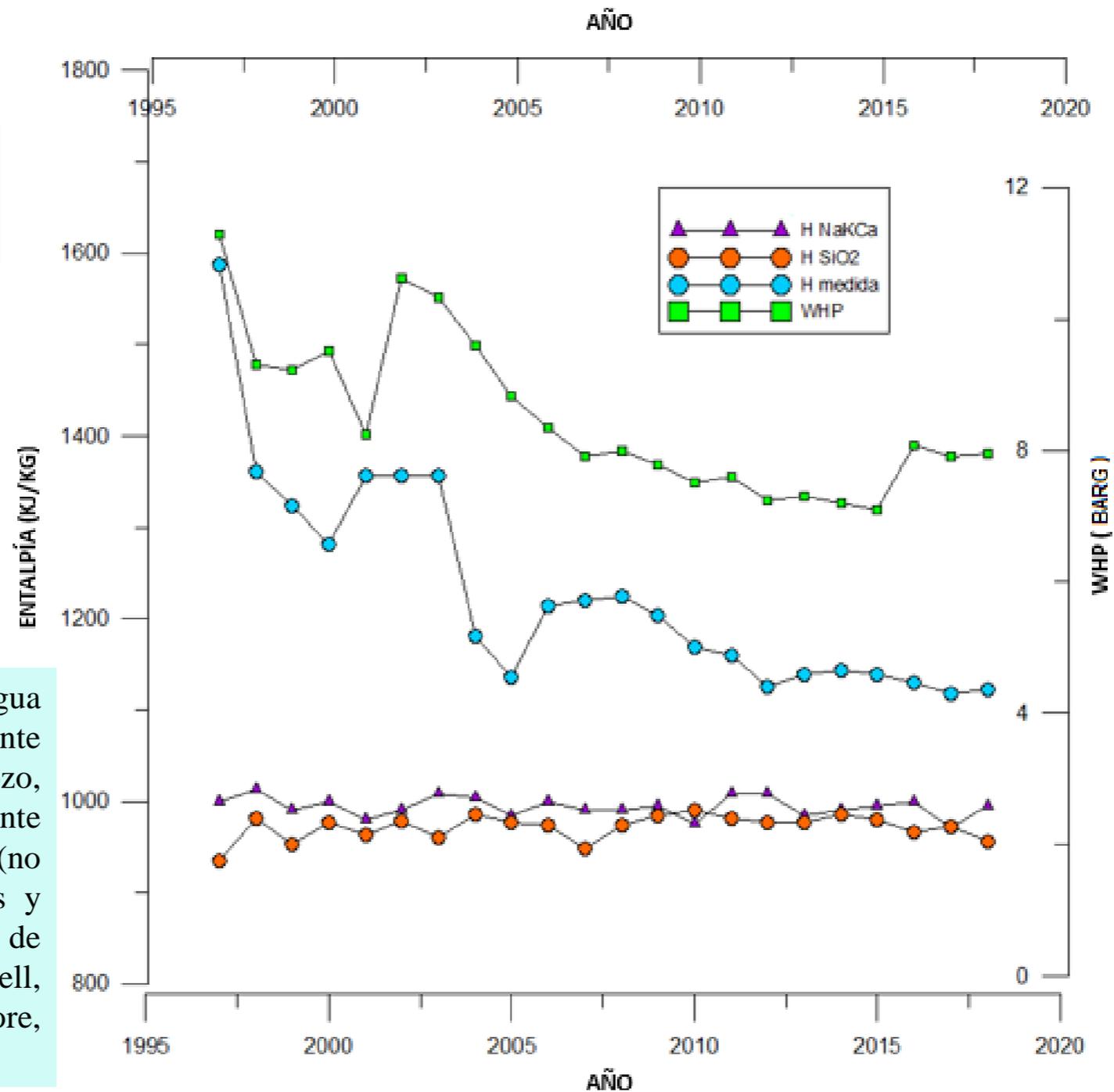
INDICADORES QUÍMICOS DE PROCESOS DENTRO DEL RESERVORIO Y EL POZO EN ESTUDIO.

- Se realizó un análisis de la variación de la entalpía con respecto al tiempo con el objeto de obtener indicadores claros de procesos en el reservorio y en la zona cercana al pozo (Truesdell, Lippmann, Quijano, & F.D'Amore, 1995).
- Las herramientas de análisis constan de geotermómetros de Na-K-Ca y Silice combinado con la medición de la entalpía insitu.

Variación de la entalpia contra el flujo

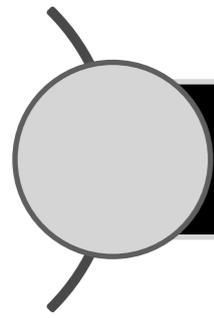
La WHP representa la restricción establecida en su manejo y operación

Mezclas en equilibrio de agua líquida y vapor previamente formado en zonas alejadas al pozo, dicho comportamiento usualmente indica una ebullición extendida (no localizada) con fases segregadas y separadas de entradas diferentes de vapor y agua. (Truesdell, Lippmann, Quijano, & F.D'Amore, 1995).



la H medida= al valor de energía reportado y extraído según las mismas condiciones que determina la WHP

Los geotermómetros de sílice y NaKCa simbolizan la energía disponible desde el reservorio



Variación de la entalpia contra el flujo

Según (Truesdell, Lippmann, Quijano, & F.D'Amore, 1995) el comportamiento esbozado con el patrón:

**H medida $H > H$ geotermómetro NaKCa = H
geotermómetro SiO₂**

se interpreta como la existencia de un proceso de mezclado de agua en equilibrio con vapor, formado por ebullición en una región ajena o externa al pozo.

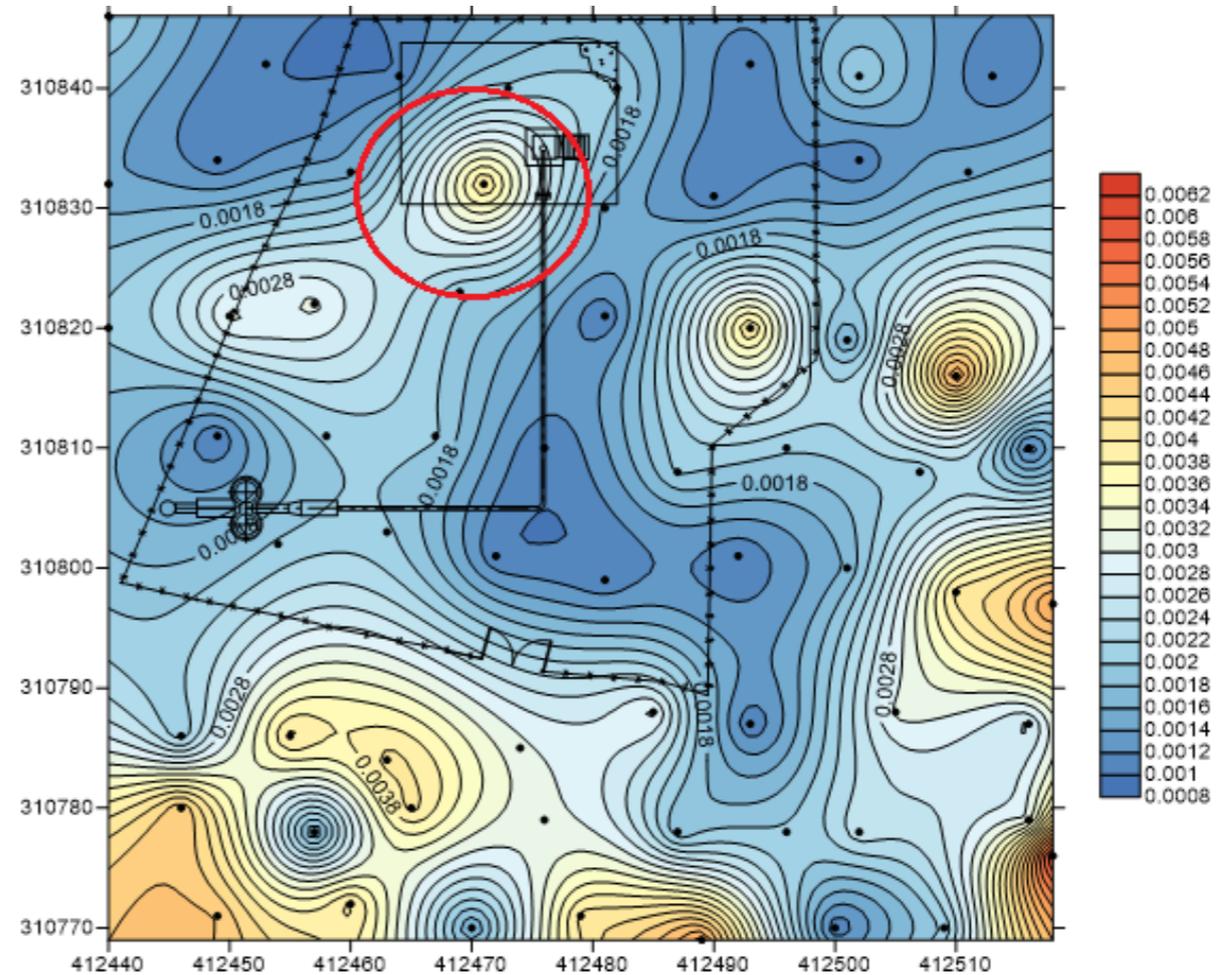
Análisis de gases difusos en la plataforma del pozo en estudio.

El análisis de gases difusos se lleva a cabo con la finalidad de mapear las zonas frágiles existente en la plataforma del pozo en análisis. Consecuentemente se evalúa si en la zona donde se ha emplazado el pozo, se encuentra en alteración.

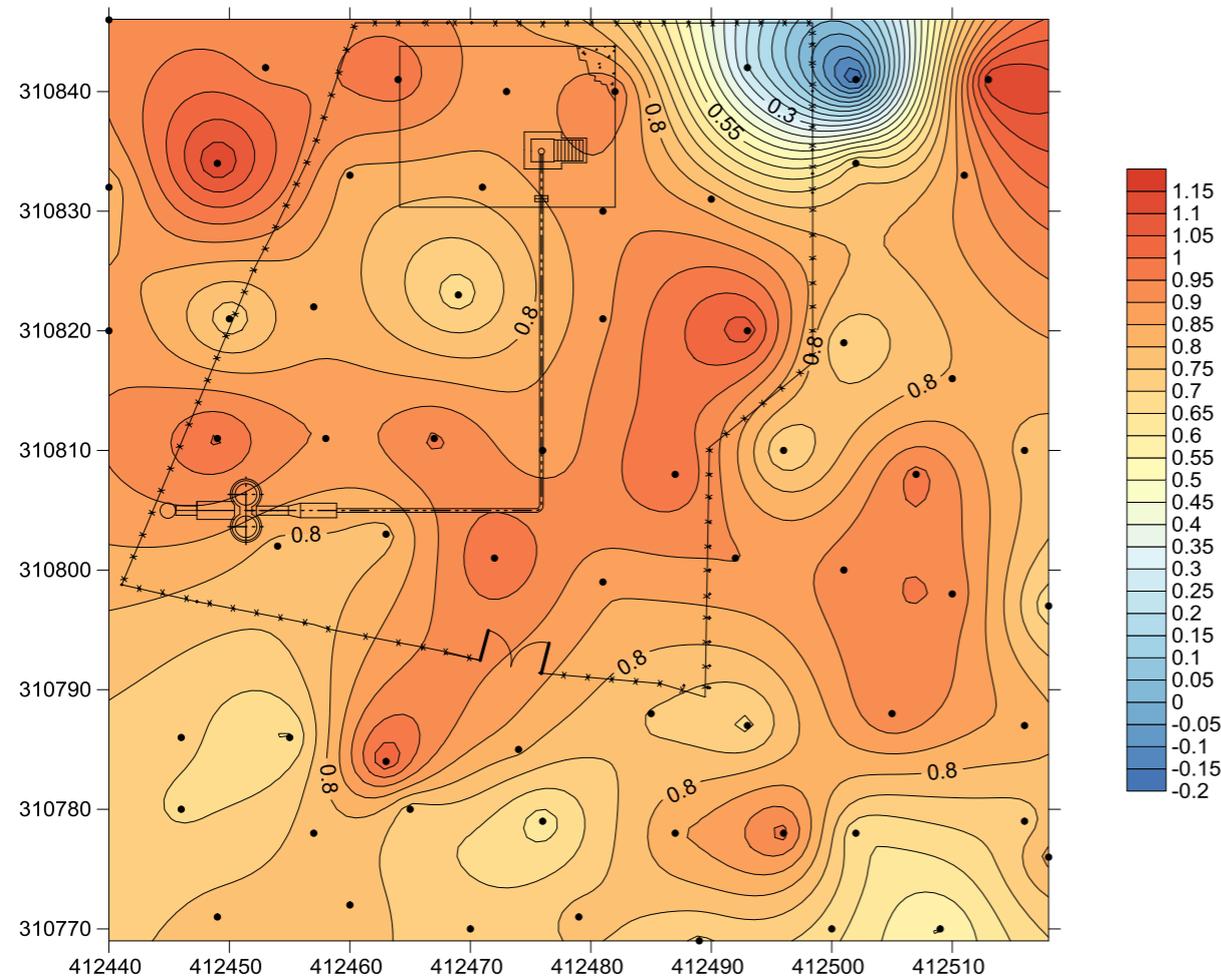
El análisis también establece el avance de las zonas de emanación de los gases y las zonas de gran alteración que requieren mitigación. (López, 2019)

Flujo de H₂S (g/m² día)

En la Figura se ilustra la aparición intermedia de H₂S en las zonas aledañas al contrapozo.



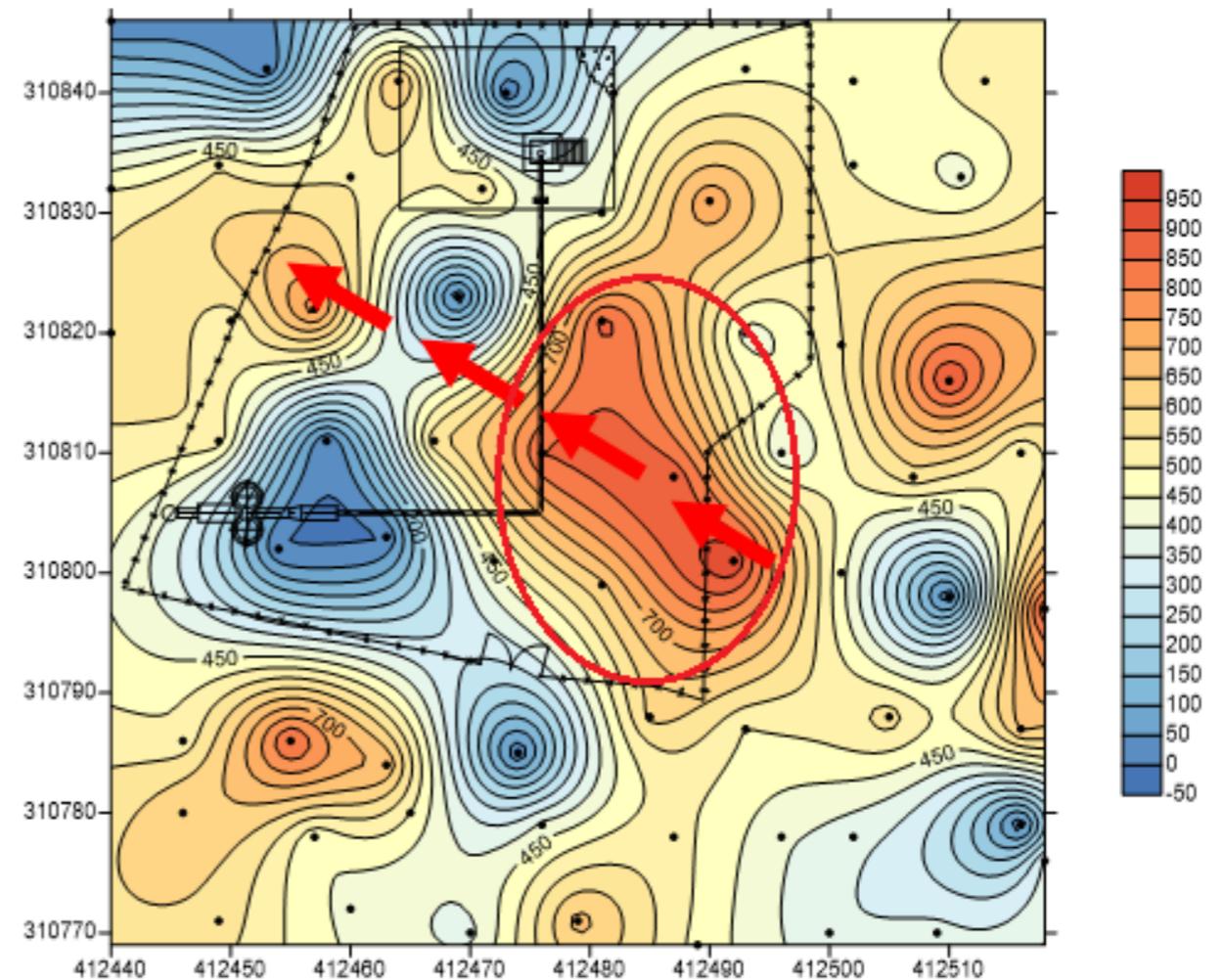
Diferencial de concentración de He (ppm)



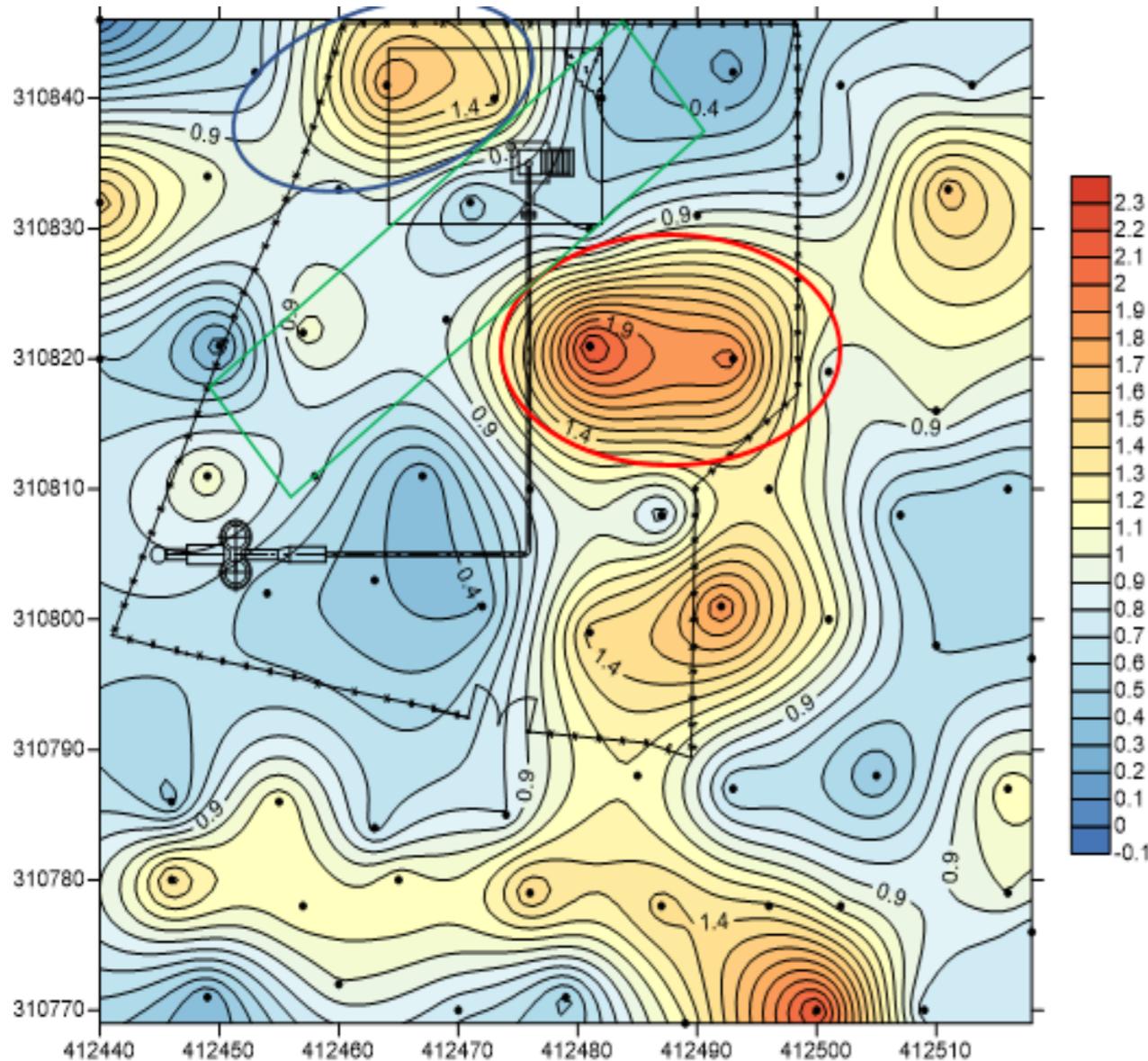
Se muestra una desgasificación media de He en las cercanías de la plataforma lo que indica permeabilidad vertical pues el comportamiento de la especie es directamente vertical. Si se llevara a cabo un mapeo de Radón, se observaría el mismo comportamiento. (López, 2019)

Concentración de CO₂ (ppm)

Como el CO₂ es mayoritario en el vapor geotérmico, este inhibe la aparición de H₂S si se comparan las figuras, observando dicha moción claramente; solo si existe una permeabilidad del suelo muy considerable se manifiestan los dos gases. Por lo tanto, la presencia de Dióxido de Carbono establece la presencia de vapor geotérmico. Las zonas mas criticas de desgasificación han sido remarcadas en la Figura y se ha establecido el patrón de la dirección de migración de la alteración, del SE al NO.



Flujo de CO₂ (g/m² día)

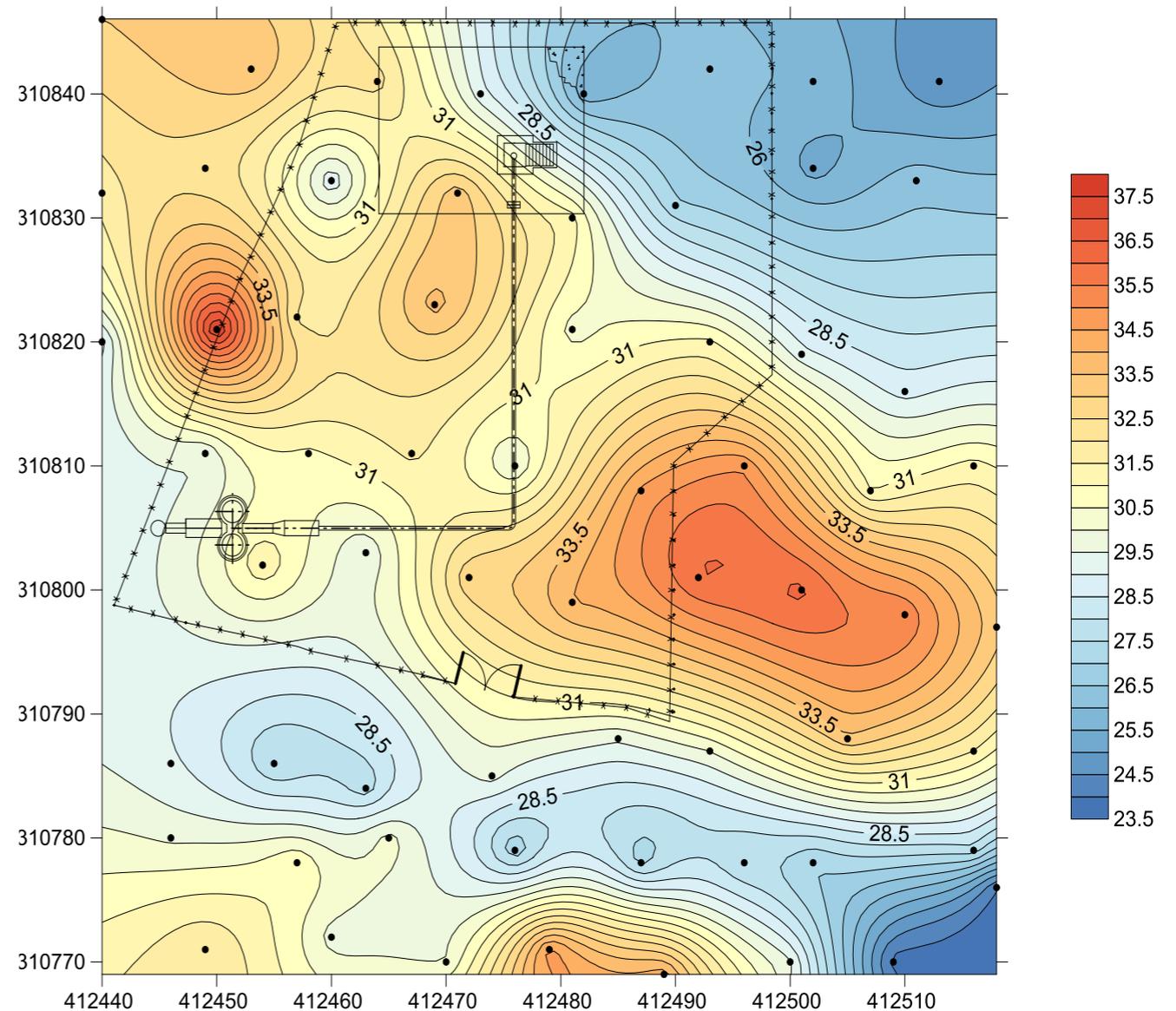


Donde hay flujo y concentración, es una zona con mucha alteración y permeabilidad, como es el caso de la zona remarcada.

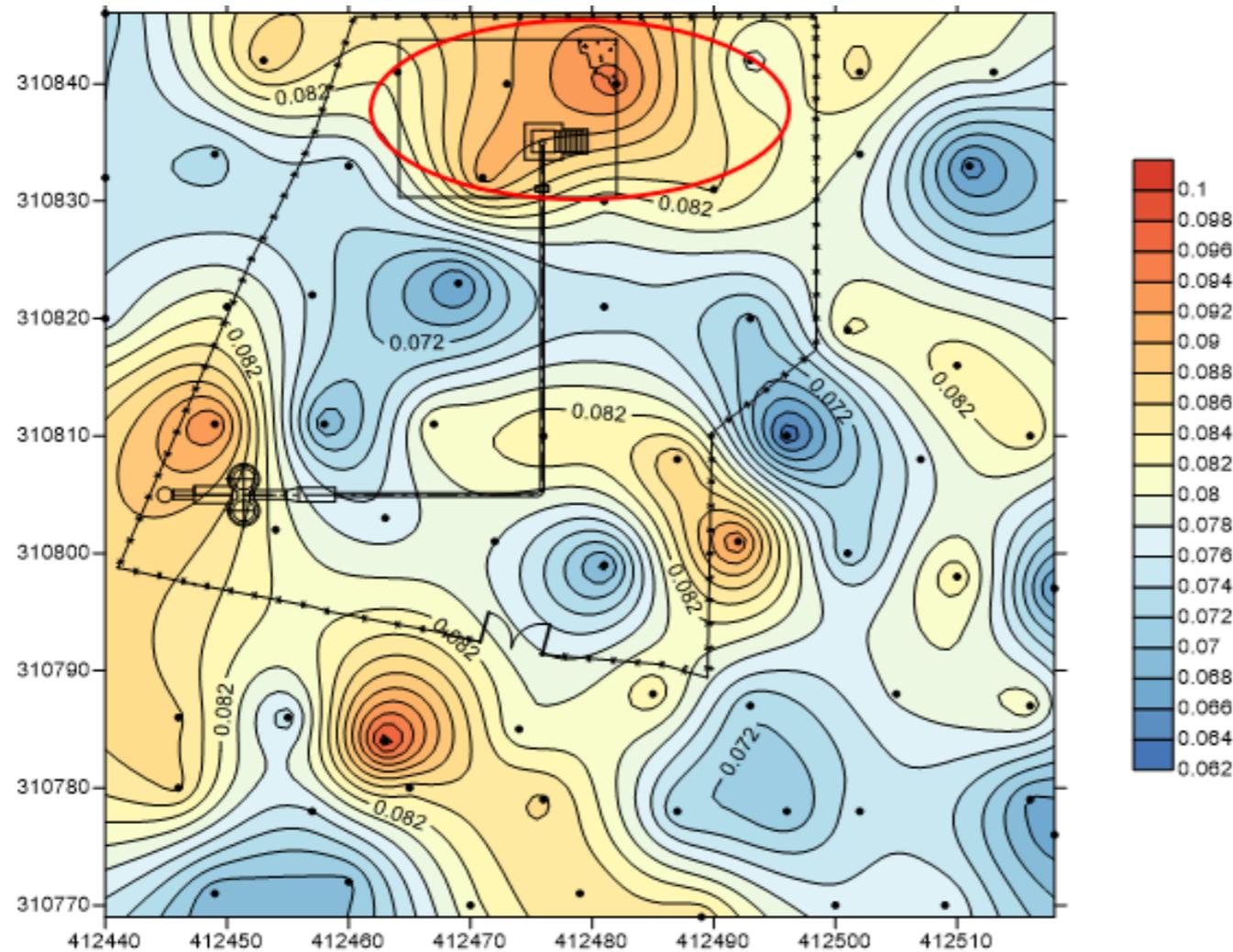
Existe una gran posibilidad que la presencia de CO₂ este generando un minado del suelo pues presenta una gran alteración según los mapas que estipulan el comportamiento de la especie. De no mitigarse dicho fenómeno (zona remarcada en el rectángulo verde), la alteración seguirá creciendo en la dirección SE-NO, ocasionando en el futuro problemas mayores de estabilidad en el suelo (López, 2019).

Temperatura del suelo (°C).

En conclusión, el mapeo ilustrado, indica una elevada presencia de gases y vapor geotérmico en las zonas aledañas al contrapozo suscitando la inestabilidad o cambio en la matriz del suelo (cambio de las propiedades físicas del suelo); consecuentemente, dichas alteraciones generan arcillas plásticas (caolinita y montmorillonita) que no atenúan el movimiento producido en el sistema, al contrario lo transmiten (López, 2019).



Concentración total de H_2S (ppm)

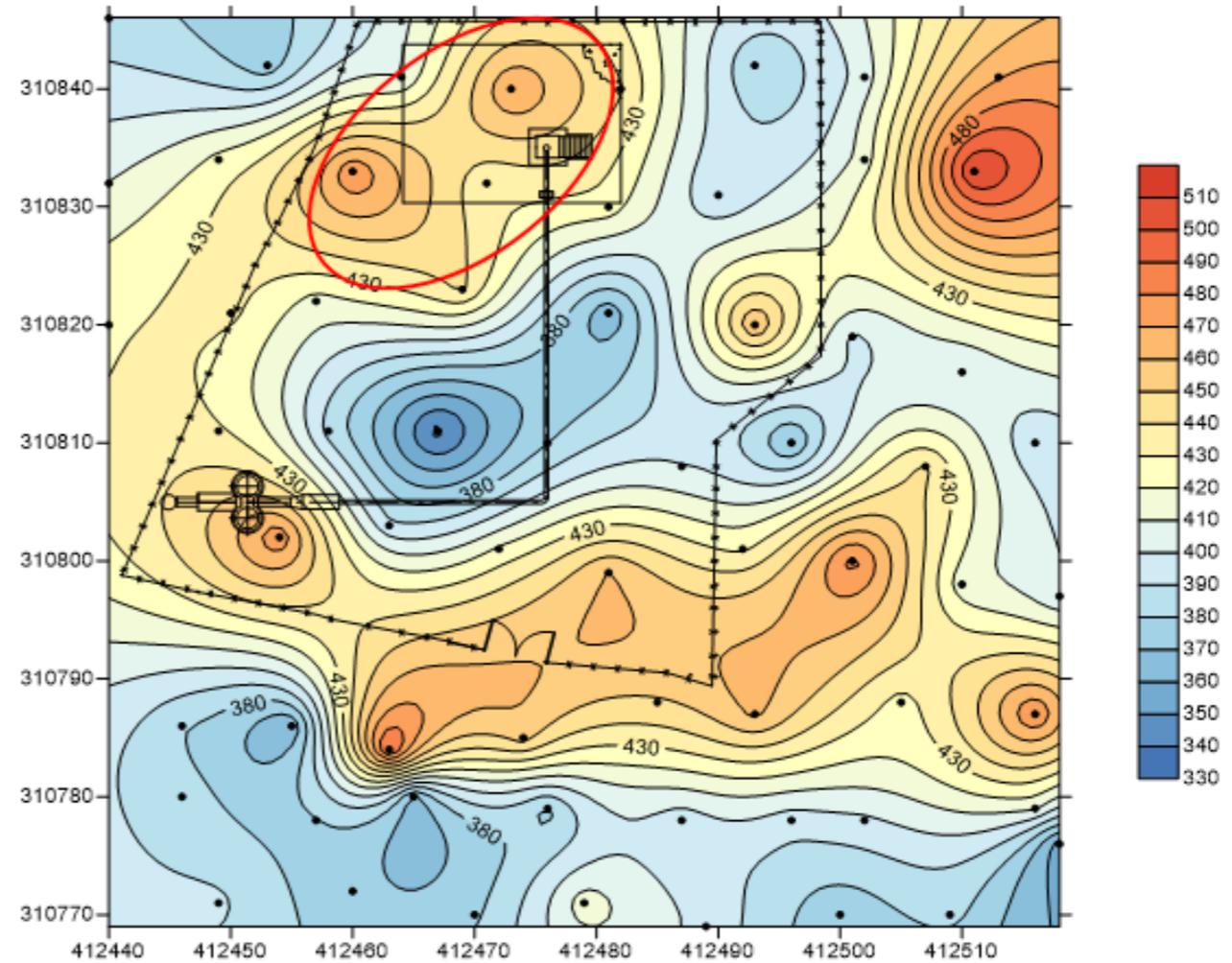


El análisis del comportamiento del H_2S establece las zonas con influencia de vapor geotérmico. En este caso, como se aprecia en la Figura, la alteración remarcada comienza a generarse, avalando el resultado obtenido en el análisis de dióxido de carbono.

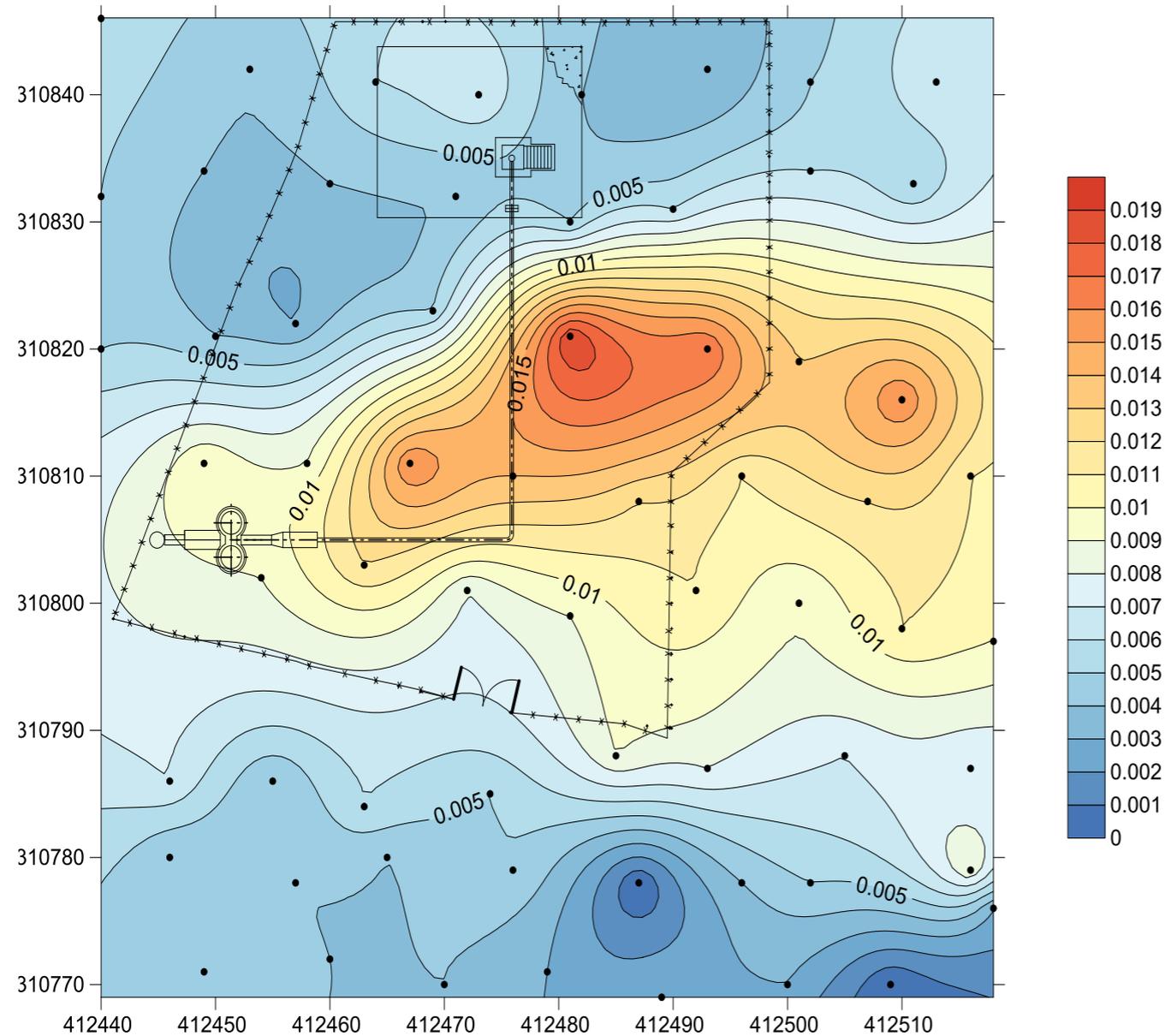
Por lo tanto, podría inferirse que la zona indicada corresponde a la zona de alteración secundaria o intermedia.

Diferencial de concentración de H₂ (ppm)

El análisis del comportamiento del H₂ valida la zona de alteración secundaria establecida en el estudio de sulfuro de hidrógeno.

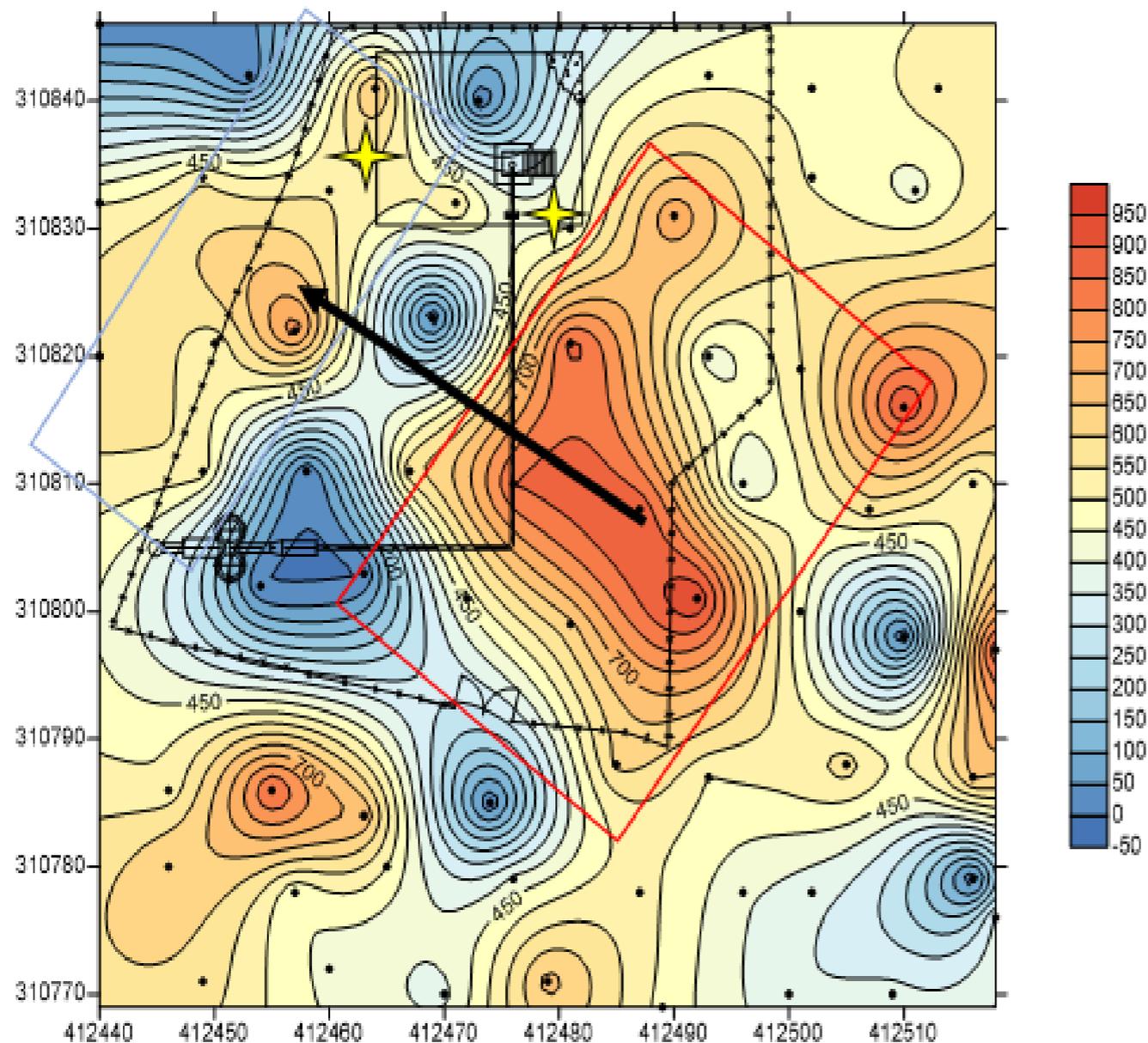


Concentración de Hg (ppm)



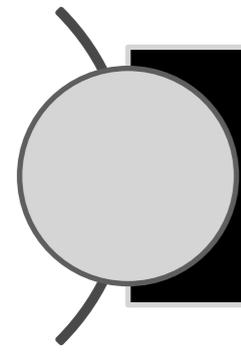
Generalmente, la presencia de Hg es acompañado de la existencia de CO₂. Por lo tanto en el análisis que concierne al pozo productor en estudio, **ratifica la existencia de vapor geotérmico en las zonas anteriormente indicadas y delimitadas como las alteraciones geotérmicas principales.**

Conclusión del análisis geoquímico del pozo.



- La región indicada en rojo, es el sector con mayor concentración de CO_2 y Hg, comportamiento característico de la presencia de vapor geotérmico. Por lo que es la zona de mayor alteración.
- La circunscripción en azul se define como la zona de alteración secundaria. Ya que gases como: H_2S , H_2 y He se manifiestan, dando la extrospección del afloramiento de una alteración primaria.
- La migración de la zona de alteración es indicada con una flecha y la locación de la propuesta de realización de obras de mitigación son indicadas con estrellas ya que se establecen como las áreas de mayor prioridad.

Las obras que se recomiendan llevar a cabo son respiraderos para de esa forma evitar el avance de la alteración del suelo y de esa forma preservar la integridad de la plataforma.



Saturación de agua en el suelo de la plataforma



Obstrucción de canaletas en plataforma

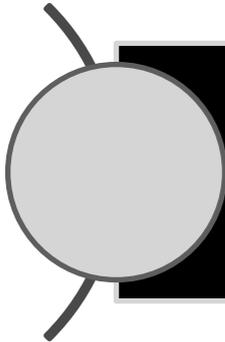


Obstrucción en desagües.

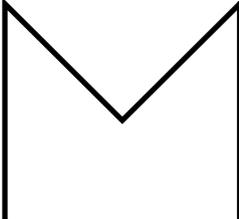


Obra de mitigación

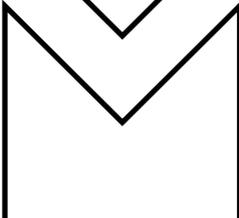




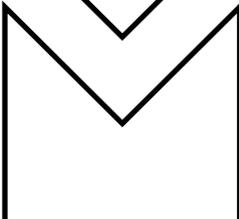
Obra de mitigación



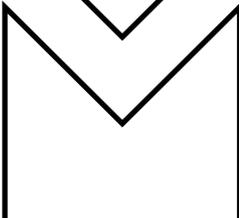
- Limpieza de la plataforma



- Restitución de áreas dañadas por las lluvias

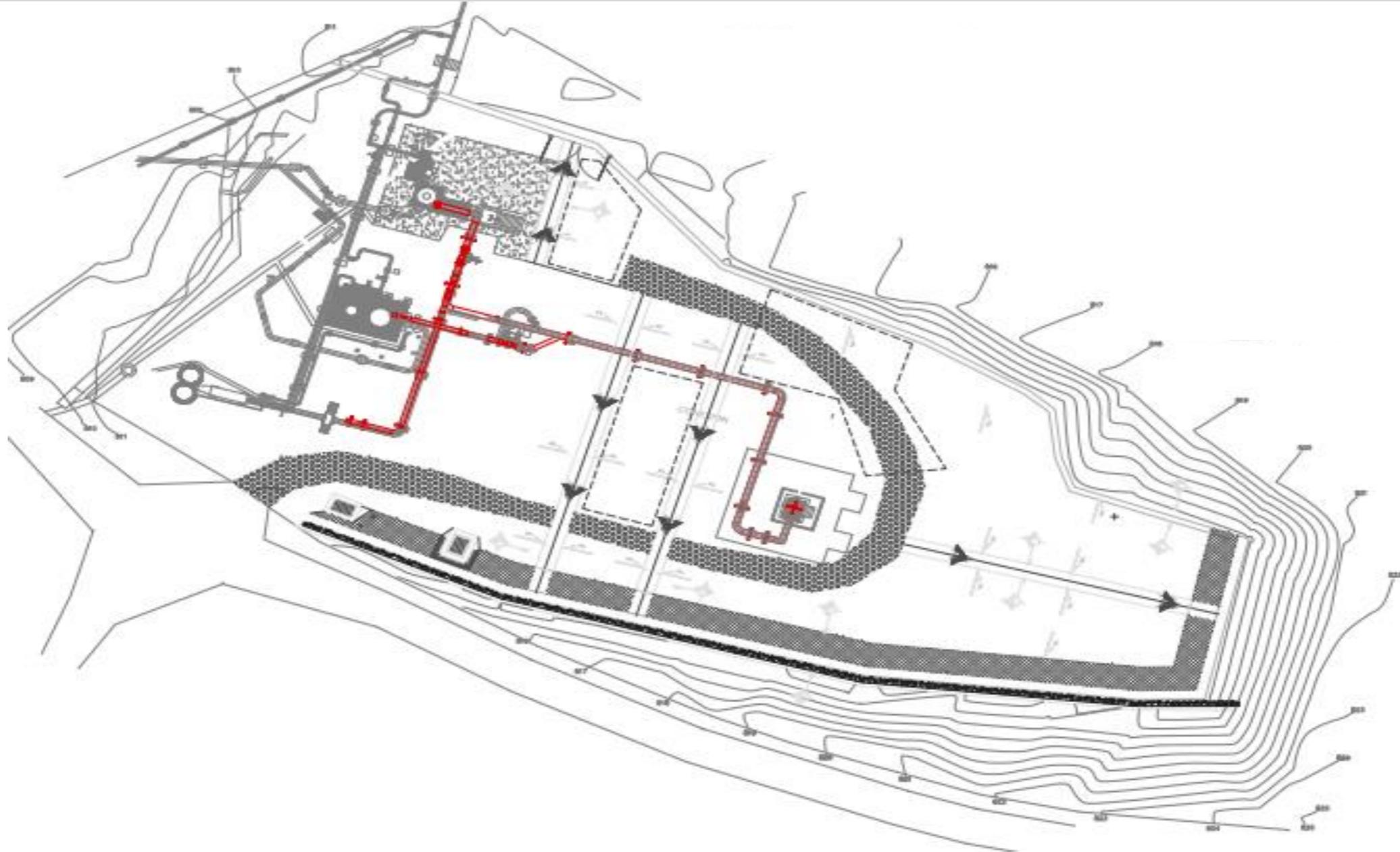


- Aplicación de grava en toda la plataforma

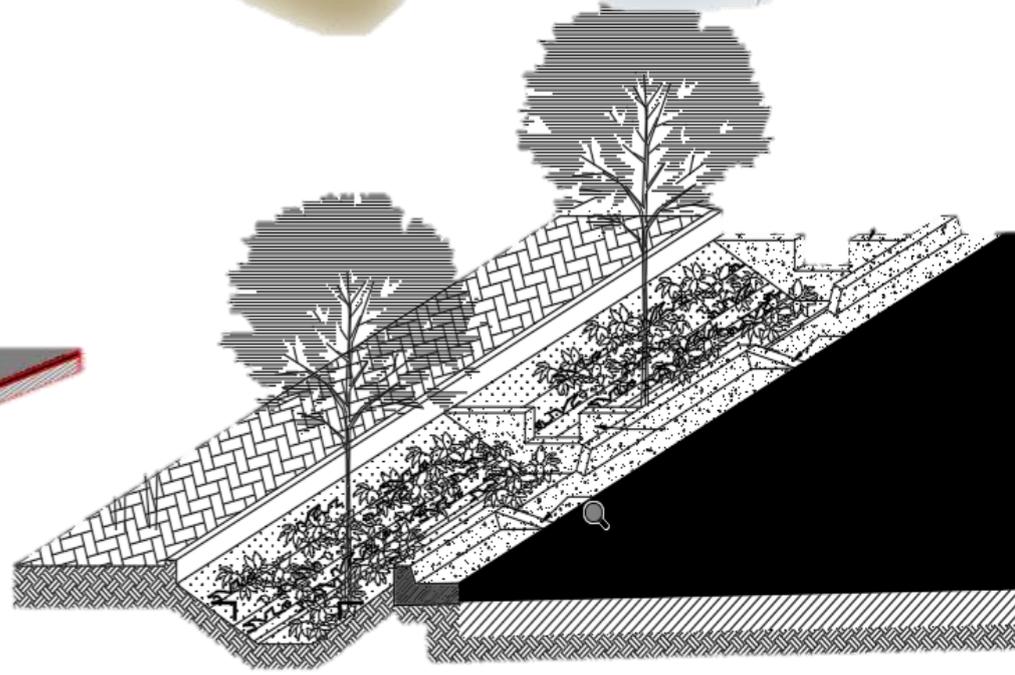
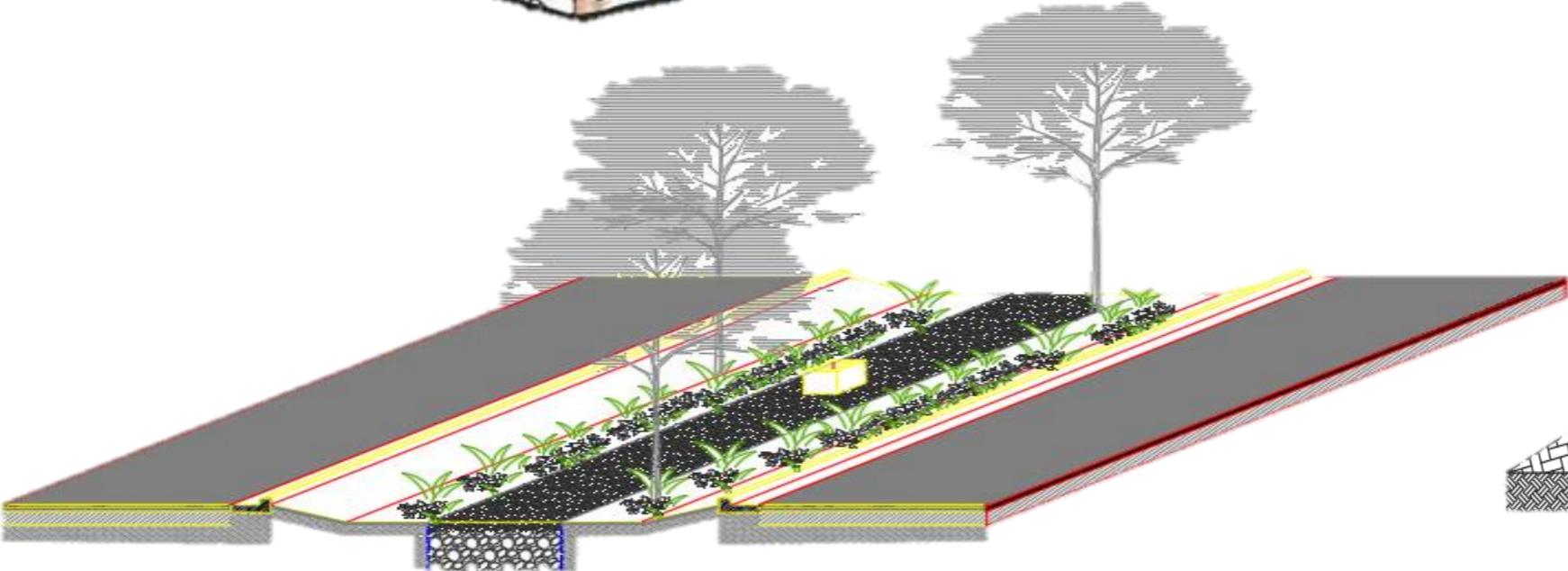
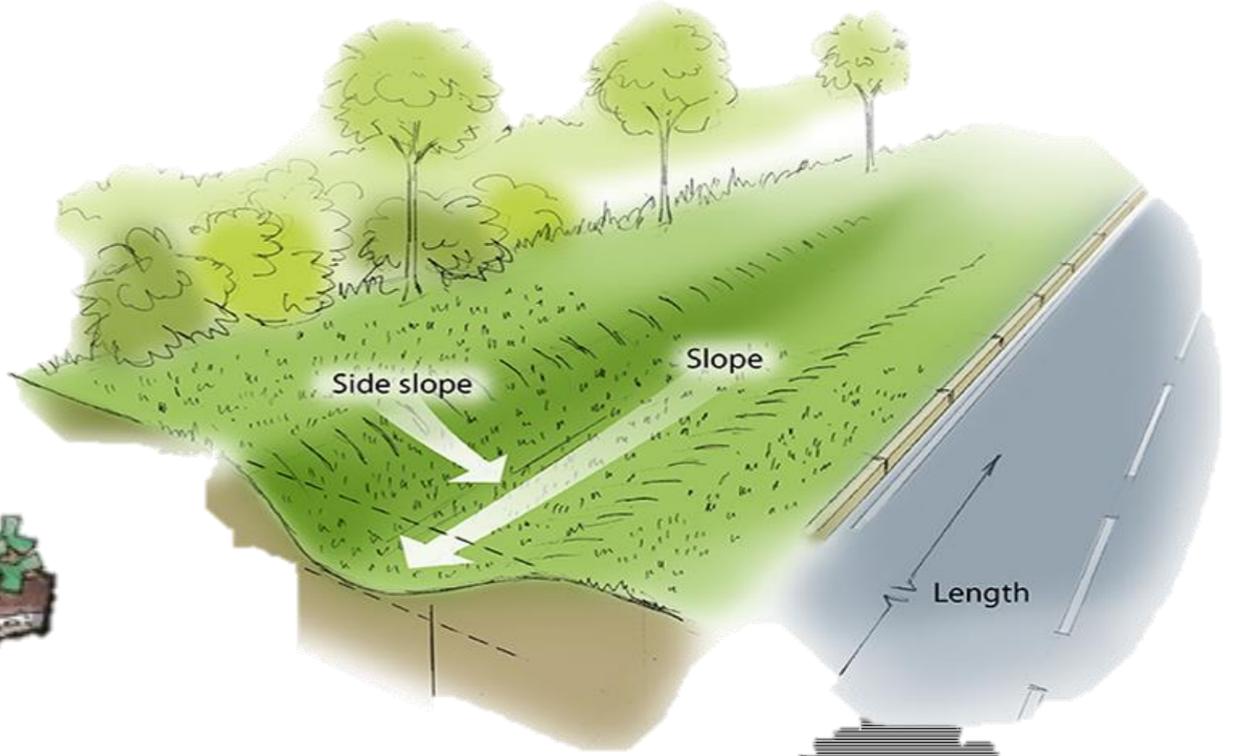
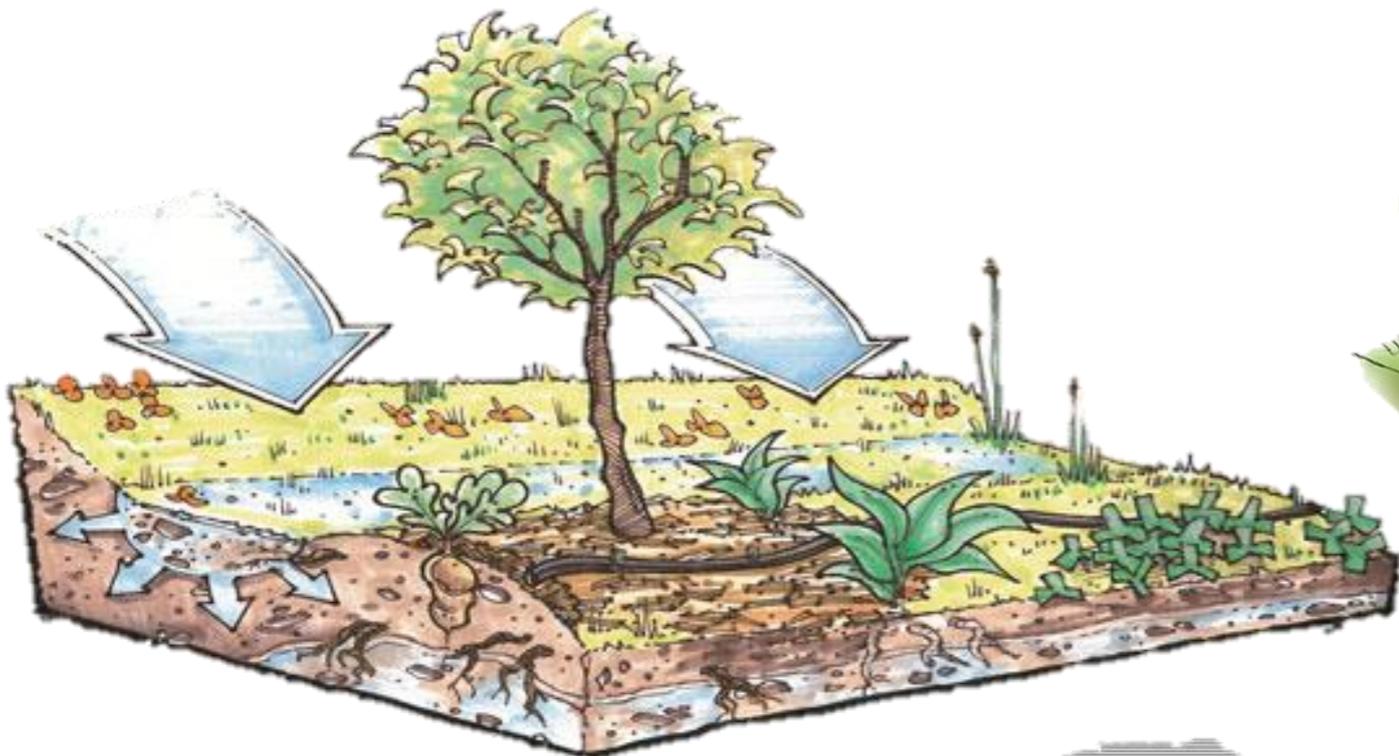


- Limpieza de Canaletas existentes

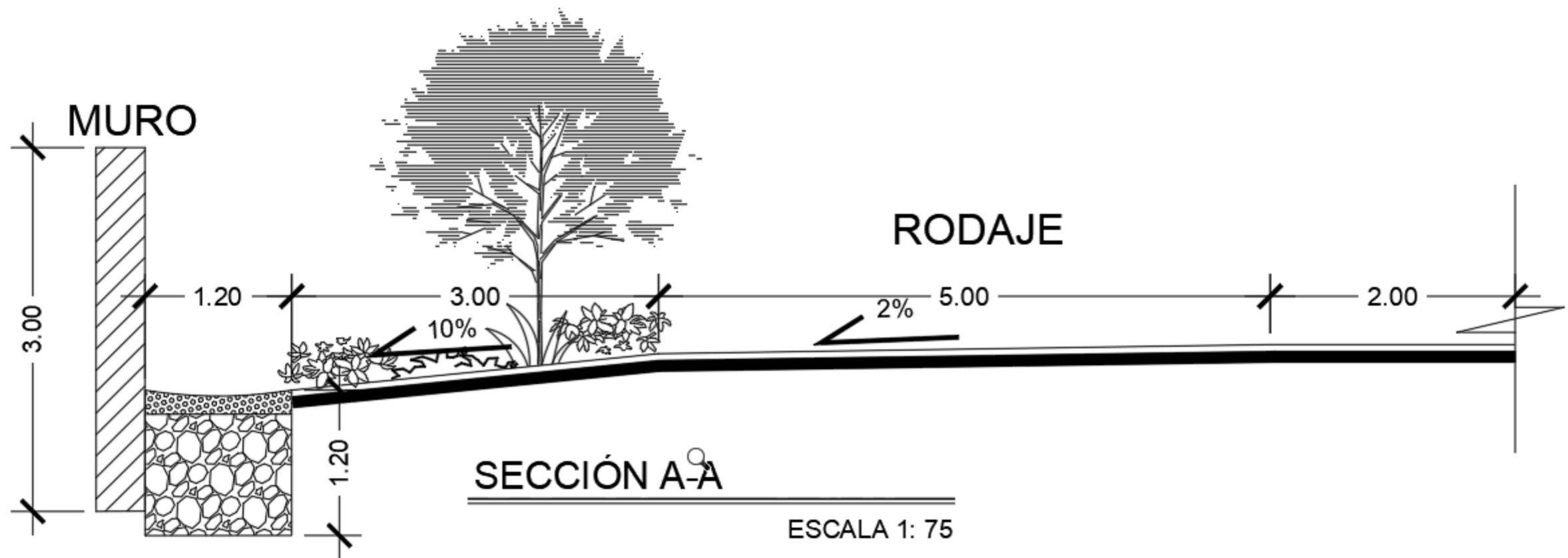
Propuesta de mejora para la plataforma



● Canaletta verde sostenibile “SUDS”



Propuesta de canaleta sostenible



Respuesta a preguntas de la investigación:

- 1) ¿Qué produce las vibraciones mecánicas?: *Las vibraciones son producto del patrón de flujo en la tubería y su relativa flexibilidad.*
- 2) ¿La velocidad de vibración medida es crítica?: *no, según cálculo de Vibrovelocidad admisible ésta es de 20.35 mm/s, y 19.98 la medida, sin embargo está en el limite y sobre pasa el valor admisible de 12.7 mm/s de asme.*
- 3) ¿La tubería fallará en el futuro? *Aún no se puede concluir al respecto, se requiere un estudio más detallado (FEA), la fatiga es un daño acumulativo (!).*
- 4) ¿Hay alguna forma económica de cómo reducir o mitigar las vibraciones en la tubería? *Si, Aumentando su rigidez.*
- 5) ¿Qué se puede hacer desde el diseño para evitar estos problemas? *Verificar distancia entre soportes (según ASME), minimizar el uso de resortes, aumentar rigidez, estudiar en detalle el tipo de fluido a transportar con especial atención si éste es de dos fases*

Respuesta a preguntas de la investigación:

- 6) ¿Cuál será el comportamiento esperado del pozo con la reducción de caída de presión? *Al quitar la restricción del flujo en la tubería, éste flujo aumentará según curva de producción y probablemente las vibraciones se verán disminuidas.*
- 7) ¿Hay relación entre las vibraciones y la saturación del suelo en la plataforma?. *No hay evidencia, mediciones más detalladas deberán ser realizadas, Ej. Medición de subsidencia.*
- 8) ¿Se está alterando el suelo de la plataforma (lixiviación)? *Si, se atisba una zona de alteración principal y la generación de una zona secundaria.*

Respuesta a preguntas de la investigación:

9) ¿Cuál ha sido el comportamiento de la química del fluido geotérmico a lo largo del tiempo? *Se presume la existencia de una entrada de flujo en equilibrio formado por ebullición en una región ajena o externa al pozo.*

10) ¿Qué se propone para mitigar la saturación del suelo en la plataforma?. *Obras superficiales que permitan evacuar las ecorrientias de agua lluvia más eficiente.*

Recomendaciones:

INMEDIATAS:

- *Aumento de rigidez de tubería haciendo un mejor contacto de ésta con sus bases y medición de vibraciones.*
- *Revisar si existe restricciones adicionales a la fricción del flujo en la tubería entre pozo y separadores y evaluar eliminarles.*

A MEDIANO PLAZO:

- *Cambio de sistema de tubería según propuesta en este documento.*
- *Contrucción de sistema de drenaje mejorado en la plataforma.*
- *Respiraderos para evitar el avance de la alteración del suelo y preservar la integridad de la plataforma.*

A LARGO PLAZO:

*Plan de monitoreo de gases en las cercanías a la plataforma;
Monitoreo de las vibraciones, subsidencia y p. termodinámicos.*



**Gracias por su atención,
¿Preguntas?**