

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE**  
**DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**



**TRABAJO DE GRADO**

ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y LA  
CONCENTRACIÓN DEL IÓN CLORURO DEL AGUA DE POZOS GEOTÉRMICOS DE  
LA CENTRAL GEOTÉRMICA DE AHUACHAPÁN Y DISEÑO DE HERRAMIENTA  
MATEMÁTICA PREDICTIVA DEL COMPORTAMIENTO CONDUCTIVIDAD-IÓN  
CLORURO

**PARA OPTAR AL GRADO DE**  
LICENCIADO EN CIENCIAS QUÍMICAS

**PRESENTADO POR**  
BRANDON ALEXANDER GONZÁLEZ LÓPEZ

**DOCENTE ASESOR**  
LICENCIADO JORGE ALBERTO GONZÁLEZ MARTÍNEZ

**SEPTIEMBRE, 2019**  
**SANTA ANA, EL SALVADOR, CENTROAMÉRICA**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**AUTORIDADES**



M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

**RECTOR**

DR. MANUEL DE JESÚS JOYA ÁBREGO

**VICERRECTOR ACADÉMICO**

ING. NELSON BERNABÉ GRANADOS ALVARADO

**VICERRECTOR ADMINISTRATIVO**

LICDO. CRISTOBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ

**SECRETARIO GENERAL**

M.Sc. CLAUDIA MARÍA MELGAR DE ZAMBRANA

**DEFENSORA DE LOS DERECHOS UNIVERSITARIOS**

LICDO. RAFAEL HUMBERTO PEÑA MARIN

**FISCAL GENERAL**

**FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE**

**AUTORIDADES**



DR. RAÚL ERNESTO AZCÚNAGA LÓPEZ

**DECANO**

M.Ed. ROBERTO CARLOS SIGÜENZA CAMPOS

**VICEDECANO**

M.Sc. DAVID ALFONSO MATA ALDANA

**SECRETARIO**

M.Ed. MIGUEL ÁNGEL CRUZ

**JEFE DEL DEPARTAMENTO**

## AGRADECIMIENTOS

**A Dios:** Agradezco eternamente y para siempre al Dios todopoderoso por estar siempre conmigo incluso en los momentos más difíciles, porque fue Dios quien me dijo si vas a poder cuando todos dudaron, fue Dios quien me dijo yo voy a levantar tu rostro cuando los demás me quisieron ver fracasar, fue Dios quien me dijo ¿No te he dicho que si crees verás la gloria de Dios? Agradezco por su respaldo, por su ayuda, por lo fiel que ha sido siempre. Como dijo Job Jehová dio Jehová quitó bendito sea su nombre.

**A mis padres, hermana y familia:** Agradezco a mi madre Yanira López por ser esa mujer guerrera que siempre confió en mí, que siempre estuvo conmigo, por llevarme siempre en sus oraciones y guiarme como lo ha hecho, porque lo que soy ahora se lo debo a ella.

Agradezco a mi hermana Elena González, a mi padre César González y familia por su confianza y apoyo en cada momento difícil de mi vida.

**A mis amigos:** Agradezco de una manera inmensa a cada uno de ellos por apoyarme y confiar en mí en los momentos más difíciles, por sus palabras de aliento y su respaldo, los quiero mucho y los llevo en mi corazón, son excelentes personas.

**A mi asesor interno:** Licdo. Jorge Alberto González Martínez por ser la persona que Dios puso en mi camino para guiarme durante mi proyecto. Agradezco por sus consejos, por su ayuda, su tiempo, por su excelente acción como docente asesor.

**A mi asesor externo:** Ing. Fidel Velásquez por su labor de orientador y facilitador en el desarrollo del proyecto. Agradezco por la confianza que depositó en mi persona, por motivarme a ser mejor cada día y hacer mejor las cosas.

**A LaGeo y personal:** Agradezco mucho a LaGeo por brindarme el apoyo, confianza, y un excelente ambiente laboral; por brindarme la oportunidad de no solo realizar mi tesis sino que también la oportunidad de desarrollar mi potencial como profesional. Agradezco a don Jorge Mario Echegoyén, Manuel Salinas por el apoyo que me brindaron durante el desarrollo del proyecto.

**BRANDON GONZÁLEZ.**

## ÍNDICE

|  |      |
|--|------|
| RESUMEN .....  | xii  |
| INTRODUCCIÓN .....   | xiii |
| DEFINICIÓN CONCEPTUAL .....  | xiv  |
| ANTECEDENTES .....   | 15   |
| JUSTIFICACIÓN .....  | 16   |
| I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....  | 16   |
| II. OBJETIVOS .....  | 18   |
| 2.1. OBJETIVO GENERAL .....  | 18   |
| 2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO .....   | 18   |
| III. MARCO TEORICO .....   | 18   |
| 3.1. Conductividad eléctrica .....   | 18   |
| 3.2. Importancia de la conductividad eléctrica .....                                   | 19   |
| 3.3. Factores que afectan la conductividad eléctrica.....                              | 19   |
| 3.3.1. Tipo de solvente .....  | 19   |
| 3.3.2. Concentración.....  | 19   |
| 3.3.3. Fuerza del electrolito .....  | 19   |
| 3.3.4. Influencia de la temperatura .....  | 19   |
| 3.4. Conductividad molar de iones .....  | 20   |
| 3.5. Variación de la conductividad molar con la concentración: Ley de Kohlrausch ..... | 20   |
| 3.6. Ley de la migración independiente de los iones .....                              | 22   |
| 3.7. Contribución de los iones individuales .....                                      | 22   |
| 3.8. Teoría de Arrhenius para la disociación iónica.....                               | 23   |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 3.9.    | Fluidos geotérmicos.....  | 24 |
| 3.9.1.  | Constituyentes mayoritarios de los fluidos geotérmicos.....           | 24 |
| 3.9.2.  | Constituyentes minoritarios de los fluidos geotérmicos.....           | 25 |
| 3.9.3.  | Clasificación de los fluidos geotérmicos.....                         | 25 |
| 3.9.4.  | Procesos que afectan el quimismo de los fluidos geotérmicos.....      | 27 |
| 3.9.5.  | Planta geotérmica.....  | 31 |
| 3.9.6.  | Boro en fluidos geotérmicos.....                                      | 32 |
| 3.9.7.  | Cloruros en fluidos geotérmicos.....                                  | 33 |
| 3.9.8.  | Sodio en fluidos geotérmicos.....                                     | 33 |
| 3.9.9.  | Potasio en fluidos geotérmicos.....                                   | 34 |
| 3.9.10. | Calcio en fluidos geotérmicos.....                                    | 35 |
| 3.9.11. | Carbonatos y bicarbonatos en fluidos geotérmicos.....                 | 35 |
| 3.9.12. | Sulfatos y Componentes Sulfurosos en fluidos geotérmicos.....         | 36 |
| 3.9.13. | Magnesio en fluidos geotérmicos.....                                  | 36 |
| 3.9.14. | Sílice en fluidos geotérmicos.....                                    | 37 |
| 3.9.15. | Flúor en fluidos geotérmicos.....                                     | 37 |
| 3.9.16. | Litio, Rubidio y Cesio en fluidos geotérmicos.....                    | 38 |
| 3.9.17. | Hierro en fluidos geotérmicos.....                                    | 38 |
| 3.9.18. | Importancia del control del ion cloruro en las aguas geotérmicas..... | 39 |
| IV.     | DISEÑO METODOLÓGICO.....  | 39 |
| 4.1.    | TIPO DE ESTUDIO.....  | 39 |
| 4.2.    | ÁREA DE ESTUDIO.....  | 39 |
| 4.3.    | DEFINICIÓN Y MEDICION DE VARIABLES DE ESTUDIO.....                    | 39 |
| 4.4.    | UNIVERSO Y MUESTRA.....   | 40 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 4.4.1. | Universo .....  | 40 |
| 4.4.2. | Muestra .....   | 40 |
| 4.5.   | METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....  | 41 |
| V.     | HIPÓTESIS .....   | 44 |
| VI.    | RESULTADOS .....  | 45 |
| 6.1.   | Pruebas para discriminar la influencia de iones.....  | 45 |
| 6.2.   | Cálculo del aporte de conductividad eléctrica de los iones que poseen baja<br>concentración ..... | 47 |
| 6.3.   | Prueba preliminar para observar la variación de la CE con la concentración .....                  | 51 |
| 6.4.   | Influencia de las variables intervinientes en la conductividad eléctrica .....                    | 54 |
| VII.   | DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....   | 55 |
| 7.1.   | Registro, procesamiento y tratamiento de resultados .....   | 55 |
| 7.2.   | Análisis estadístico pozo “X” .....   | 55 |
| 7.2.1. | Prueba de Normalidad de los residuos .....  | 58 |
| 7.2.2. | Prueba de significancia del modelo seleccionado .....   | 59 |
| 7.2.3. | Bondad de ajuste del modelo.....  | 61 |
| 7.2.4. | Supuestos para la correcta aplicación del modelo seleccionado .....                               | 62 |
| 7.2.5. | Correlaciones .....   | 65 |
| 7.2.6. | Diseño del modelo del pozo “X” .....  | 66 |
| 7.3.   | Análisis estadístico pozo “Y” .....   | 67 |
| 7.3.1. | Prueba de Normalidad de los residuos. ....  | 70 |
| 7.3.2. | Prueba de significancia del modelo seleccionado. ....   | 71 |
| 7.3.3. | Bondad de ajuste del modelo.....  | 73 |
| 7.3.4. | Supuestos para la correcta aplicación del modelo seleccionado .....                               | 74 |
| 7.3.5. | Diseño del modelo del pozo “Y” .....  | 76 |

|                       |   |    |
|-----------------------|---|----|
| 7.3.6.                | Condiciones .....   | 77 |
| 7.3.7.                | Correlaciones .....   | 77 |
| 7.4.                  | Análisis estadístico pozo “Z” .....                                 | 78 |
| 7.4.1.                | Prueba de Normalidad de los residuos. ....                          | 81 |
| 7.4.2.                | Prueba de significancia del modelo seleccionado. ....               | 82 |
| 7.4.3.                | Bondad de ajuste del modelo.....                                    | 84 |
| 7.4.4.                | Supuestos para la correcta aplicación del modelo seleccionado ..... | 85 |
| 7.4.5.                | Correlaciones .....   | 87 |
| 7.4.6.                | Diseño del modelo del pozo “Z” .....                                | 88 |
| CONCLUSIONES.....     |   | 89 |
| RECOMENDACIONES ..... |   | 91 |
| BIBLIOGRAFÍA .....    |   | 92 |
| ANEXOS .....          |   | 97 |



## INDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1:</b> Variación de la conductividad molar, $\Lambda_m$ ( $S\ cm^2\ mol^{-1}$ ), con la raíz de la concentración..... | 21 |
| <b>Figura 2:</b> Generación de la energía eléctrica.....  | 31 |
| <b>Figura 3:</b> Variación de la CE Vs Concentración de $Cl^-$ .....  | 52 |
| <b>Figura 4:</b> Variación de la conductividad molar con la raíz cuadrada de la concentración.....                              | 54 |
| <b>Figura 5:</b> Gráfico de dispersión simple pozo “X”.....   | 56 |
| <b>Figura 6:</b> Histograma de distribución normal pozo “X”.....  | 58 |
| <b>Figura 7:</b> Gráfico P-P normal de regresión Residuo estandarizado pozo “X”.....  | 58 |
| <b>Figura 8:</b> Diagrama de dispersión prueba de homocedasticidad pozo “X”.....  | 64 |
| <b>Figura 9:</b> Diagrama de dispersión pozo “Y”.....   | 68 |
| <b>Figura 10:</b> Histograma de distribución normal del pozo “Y”.....   | 70 |
| <b>Figura 11:</b> Gráfico P-P normal de regresión Residuo estandarizado pozo “Y”.....   | 70 |
| <b>Figura 12:</b> Diagrama de dispersión prueba de homocedasticidad pozo “Y”.....   | 75 |
| <b>Figura 13:</b> Diagrama de dispersión pozo “Z”.....  | 79 |
| <b>Figura 14:</b> Histograma de normalidad pozo “Z”.....  | 81 |
| <b>Figura 15:</b> Gráfico P-P normal de regresión Residuo estandarizado pozo “Z”.....   | 81 |
| <b>Figura 16:</b> Diagrama de dispersión prueba de homocedasticidad pozo “Z”.....   | 86 |

## INDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1:</b> Conductividades molares a dilución infinita ( $\lambda^{\circ}$ , S cm <sup>2</sup> mol <sup>-1</sup> ) para distintos iones a 25 °C) ..... | 23 |
| <b>Tabla 2:</b> Constituyentes mayoritarios de los fluidos geotérmicos.....   | 24 |
| <b>Tabla 3:</b> Constituyentes minoritarios y traza de los fluidos geotérmicos.....   | 25 |
| <b>Tabla 4:</b> Definición y medición de variables.....   | 40 |
| <b>Tabla 5:</b> Dilución de las muestras.....   | 43 |
| <b>Tabla 6:</b> Discriminación del boro en el agua geotérmica.....  | 45 |
| <b>Tabla 7:</b> Composición química del agua geotérmica.....  | 46 |
| <b>Tabla 8:</b> Aporte de los iones de baja concentración a la conductividad eléctrica del pozo “X”.....  | 48 |
| <b>Tabla 9:</b> Aporte de los iones de baja concentración a la conductividad eléctrica del pozo “Y”.....  | 49 |
| <b>Tabla 10:</b> Aporte de los iones de baja concentración a la conductividad eléctrica del pozo “Z”.....   | 50 |
| <b>Tabla 11:</b> Variación de la conductividad eléctrica teórica y experimental con la concentración.....   | 52 |
| <b>Tabla 12:</b> Variación de la conductividad molar con la raíz cuadrada de la concentración.....  | 53 |
| <b>Tabla 13:</b> Resultados químico-físico del pozo “X” .....   | 56 |
| <b>Tabla 14:</b> Resumen de modelo y estimaciones de parámetros pozo “X” .....  | 57 |
| <b>Tabla 15:</b> Prueba de normalidad pozo “X” .....  | 59 |
| <b>Tabla 16:</b> ANOVA pozo “X”.....  | 59 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 17:</b> Coeficientes del modelo pozo “X” .....                           | 60 |
| <b>Tabla 18:</b> Resumen del modelo, bondad de ajuste pozo “X” .....              | 61 |
| <b>Tabla 19:</b> Estadísticos descriptivos pozo “X” .....                         | 62 |
| <b>Tabla 20:</b> Prueba de Levene homocedasticidad pozo “X” .....                 | 65 |
| <b>Tabla 21:</b> Correlaciones bivariadas pozo “X” .....                          | 66 |
| <b>Tabla 22:</b> Resultados químico-físico del pozo “Y” .....                     | 68 |
| <b>Tabla 23:</b> Resumen del modelo y estimación de parámetros del pozo “Y” ..... | 69 |
| <b>Tabla 24:</b> Prueba de normalidad pozo “Y” .....                              | 71 |
| <b>Tabla 25:</b> ANOVA pozo “Y” .....   | 71 |
| <b>Tabla 26:</b> Coeficientes del pozo “Y” .....                                  | 72 |
| <b>Tabla 27:</b> Resumen del modelo y bondad de ajuste del pozo “Y” .....         | 73 |
| <b>Tabla 28:</b> Estadísticos descriptivos pozo “Y” .....                         | 73 |
| <b>Tabla 29:</b> Prueba de Levene homocedasticidad pozo “Y” .....                 | 76 |
| <b>Tabla 30:</b> Correlaciones bivariadas pozo “Y” .....                          | 77 |
| <b>Tabla 31:</b> Resultados químico-físico del pozo “Z” .....                     | 79 |
| <b>Tabla 32:</b> Resumen del modelo y estimación de parámetros del pozo “Z” ..... | 80 |
| <b>Tabla 33:</b> Prueba de normalidad pozo “Z” .....                              | 82 |
| <b>Tabla 34:</b> ANOVA pozo “Z” .....   | 82 |
| <b>Tabla 35:</b> Coeficientes pozo “Z” .....                                      | 83 |
| <b>Tabla 36:</b> Resumen del modelo y bondad de ajuste del pozo “Z” .....         | 84 |
| <b>Tabla 37:</b> Estadísticos descriptivos pozo “Z” .....                         | 84 |
| <b>Tabla 38:</b> Prueba de Levene homocedasticidad pozo “Z” .....                 | 87 |
| <b>Tabla 39:</b> Correlaciones bivariadas pozo “Z” .....                          | 87 |

## RESUMEN

La evaluación, monitoreo y determinación de la cantidad de sales disueltas que posee el agua geotérmica en torno a su CE, es un tema de mucha importancia en el campo geotérmico debido a su aplicación para el control del fenómeno de incrustación; por esta razón, se estudia el tipo de relación que existe entre la CE y la concentración del ion  $\text{Cl}^-$  en el agua de pozos geotérmicos, con el fin de evaluar si es posible diseñar una herramienta matemática predictiva.

La medición de la conductividad eléctrica es un parámetro físico mucho más fácil de medir en comparación al análisis del ion  $\text{Cl}^-$ , he aquí la necesidad de estudiar si es posible cuantificar la concentración del ion  $\text{Cl}^-$  a partir de la CE de una manera significativa estadísticamente. Se estudiaron los pozos “X”, “Y” y “Z” de la CGA debido a que a dichos pozos se les aplica un químico inhibidor para evitar el problema de incrustación. Se realizaron análisis del agua geotérmica durante un período de 4 meses y se utilizó la técnica de espectrofotometría UV-VIS para realizar el análisis del ion  $\text{Cl}^-$ .

El desarrollo de esta investigación permitió determinar qué tipo de relación existe entre la CE y la concentración del ion  $\text{Cl}^-$  en los pozos “X”, “Y”, y “Z”, obteniendo coeficientes de correlación de Pearson de 0.803, 0.891, y 0.857 respectivamente; lo cual indica de acuerdo al anexo 1 que estas variables están fuertemente relacionadas de una manera positiva, ya que al aumentar la concentración del ion  $\text{Cl}^-$  también aumenta la CE. En el pozo “Y” fue posible aplicar un modelo de regresión lineal simple, obteniendo un error máximo del 2.27 %, un error promedio del 0.7 %, y un CV de 2.02, utilizando la herramienta matemática predictiva  $\text{Cl}^- = (CE - 4031.725)/2.331$ , sin embargo, en los pozos “X” y “Z” no fue posible establecer dicha herramienta predictiva debido a que se violó el supuesto de independencia de los residuos. Esta investigación permitió conocer más sobre el tema de la CE, las leyes bajo las cuales se rige este comportamiento y a su vez las distintas aplicaciones como lo son calcular la concentración de una solución a partir de la CE, calcular el aporte que genera cada ion independiente etc.

## INTRODUCCIÓN

La precipitación de compuestos inorgánicos insolubles como consecuencia de la modificación de las condiciones de operación en el proceso de la extracción del fluido geotérmico, provocan la saturación de los iones presentes en el agua (fenómeno de incrustación).

La formación de depósitos minerales es uno de los problemas más preocupantes en la geotermia, ya que estos minerales pueden acumularse en válvulas, sistemas de bombeo y tuberías de acarreo del fluido; causando una estrangulación e impidiendo el flujo normal de dicho fluido.

La presente investigación hace referencia al estudio de la relación entre la concentración del ion  $\text{Cl}^-$  y la CE en el agua de pozos geotérmicos de la CGA. Las dos preguntas centrales de la investigación son, ¿es posible cuantificar la concentración del ion  $\text{Cl}^-$  en el agua geotérmica, a partir de la CE de una manera significativa estadísticamente? Y, ¿existe una relación entre la CE y la concentración del ion  $\text{Cl}^-$  en el fluido geotérmico?

El objetivo principal de este proyecto es generar una ecuación matemática mediante el empleo del método de mínimos cuadrados; que nos permita relacionar la concentración del ion cloruro y la conductividad eléctrica, para así, a partir de la medición de la CE se pueda conocer la concentración del ion  $\text{Cl}^-$  en el fluido geotérmico de una manera rápida, económica y efectiva.

La problemática que se pretende resolver surge de la necesidad de cuantificar la concentración de los iones cloruros en el agua geotérmica, ya que estos valores son de mucha importancia para la central debido a que permiten establecer la relación  $\text{Ca}^{+2}/\text{Cl}^-$  con el fin de observar el comportamiento del pozo, es decir, si es propenso a sufrir fenómenos de incrustaciones. Ante una emergencia, se deben tomar decisiones rápidas para evitar problemas mayores, pérdidas monetarias asociadas a bajas en la generación de la energía eléctrica, y daños en equipos o instalaciones superficiales.

## DEFINICIÓN CONCEPTUAL

**Normalidad:** Es una representación gráfica de la distribución normal de probabilidad de un grupo de datos.

**Prueba F:** Estadístico que refleja el grado de parecido existente entre las medias que se están comparando.

**Prueba t:** Es una prueba paramétrica de comparación de dos muestras independientes cuya función es comparar dos grupos de puntuaciones (medias aritméticas) y determinar que la diferencia no se deba al azar (que la diferencia sea estadísticamente significativa).

**Homocedasticidad:** Es una característica de un modelo de regresión lineal que implica que la varianza de los errores es constante a lo largo del tiempo.

**Autocorrelación:** Significa que los errores de las observaciones adyacentes están correlacionados es decir una depende de la otra.

**Durbin Watson:** Estadístico utilizado para evaluar la presencia de autocorrelación en una serie de datos.

**Independencia de los residuos:** Los errores son variables aleatorias independientes. Significa que los errores de las observaciones adyacentes no están correlacionados entre sí.

**Nivel de significancia:** El nivel de significación (o nivel de  $\alpha$ ) es un umbral que permite determinar si el resultado de un estudio se puede considerar estadísticamente significativo después de realizar las pruebas estadísticas planificadas.

**Significancia estadística:** Significa que hay suficiente información y pruebas que indican que un estudio, una investigación, un estadístico, un test, una hipótesis o una prueba son válidos estadísticamente de acuerdo con el nivel de significancia de trabajo

## ANTECEDENTES

En abril de 2012 fue publicada una nota de investigación donde se recolectaron y analizaron un total de 1358 muestras de agua subterránea en el período 1980-2008. Los valores de la CE del agua y la concentración del ion  $\text{Cl}^-$  se relacionaron mediante la ecuación lineal  $[\text{Cl}^-] = 4.928 \text{ EC}$  ( $R > 0.94$ ) para estimar la concentración del ion  $\text{Cl}^-$  en función de la CE del agua en el área de estudio. Se realizó un estudio geofísico a través de 34 sondeos eléctricos verticales (VES) para calcular la conductividad eléctrica del agua a partir de la interpretación de los datos de resistividad aparente (Peinado et al., 2012).

En el año de 2004 se presentó un proyecto aplicado a cultivo (agua de riego), donde se exponía que debido a que la medición de la CE es mucho más fácil que determinar la concentración del ion  $\text{Cl}^-$ , el objetivo de este estudio fue desarrollar una relación empírica entre la concentración del ion  $\text{Cl}^-$  y la CE de aguas subterráneas para el oeste de Irán. Un gran número de muestras de agua (1063 los datos del laboratorio y 2252 datos de campo) se recogieron en un área de 66000  $\text{Km}^2$  en el oeste de Irán. La CE se midió con una celda de conductividad y la concentración del ion  $\text{Cl}^-$  por titulación con solución de  $\text{AgNO}_3$ . Los datos fueron agrupados de acuerdo a la tolerancia de los cultivos a la salinidad del agua, y en consecuencia, a la CE. Modelos de regresión lineal y polinómicos fueron probados para visualizar el poder de explicación de dichos modelos. Usando datos para todas las 3315 muestras, los modelos fueron altamente significativos. También se desarrollaron otros modelos para diferentes grupos de datos y se concluyó que existe una correlación entre la CE y la concentración del ion  $\text{Cl}^-$  en muestras de agua, excepto para  $\text{CE} < 3000 \mu\text{S/cm}$ . (Abyaneh et al., 2004).

Los iones cloruro son los principales constituyentes en aguas y suelos salinos que afectan directamente los valores de CE; por lo tanto, es posible encontrar una fuerte correlación entre la CE y la concentración del ion  $\text{Cl}^-$ , como lo encuentran muchos autores (Oteri, 1988); (Hajrasuliha et al., 1991); (Xu y Eckstein., 1997); (McNeil y Cox, 2000); (Abyaneh et al., 2005); (Alhumoud et al., 2010). (Hajrasuliha et al., 1991) encontraron que la relación de la concentración del ion  $\text{Cl}^-$  en  $\text{meq/L}$  es aproximadamente 6.83 veces la CE para valores de 28000  $\mu\text{S/cm}$  y 5.22 para 16000  $\mu\text{S/cm}$ ; en otras palabras, el gradiente aumenta a medida que aumenta el valor de CE. Sin embargo, Abyaneh et al. (2005) encontraron que  $[\text{Cl}^-] = 9 \text{ CE}$  para un rango

de 150 y 39900  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Muchos estudios han utilizado la concentración de  $\text{Cl}^-$  en el agua subterránea para definir el grado de intrusión salina. Algunos autores afirman que un umbral de concentración del ion  $\text{Cl}^-$  oscila entre 40 y 300 mg/L y es un indicio de invasión de agua de mar (Edet y Okereke, 2001). (Abyaneh et al., 2004).

## **JUSTIFICACIÓN**

La Central Geotérmica de Ahuachapán es una central generadora de energía eléctrica, que utiliza la energía del vapor de agua para mover los álabes de la turbina y generar la energía eléctrica. Debido al quimismo y al alto contenido de sales que posee el agua geotérmica surgen los famosos fenómenos de incrustación. Las incrustaciones son fenómenos reales que se presentan comúnmente en la industria, por esta razón, la importancia de establecer medidas para monitorear la concentración de las sales inorgánicas que causan dichos fenómenos. En la CGA, el problema de las incrustaciones se da principalmente por la deposición de  $\text{CaCO}_3$  y sílice, siendo el  $\text{CaCO}_3$  el que genera mayores problemas.

La presente investigación surge de la necesidad de cuantificar la concentración del ion  $\text{Cl}^-$  de una manera rápida y económica, con el objetivo de establecer una relación entre la CE y la concentración del ion  $\text{Cl}^-$ , de tal forma que se pueda desarrollar una ecuación matemática que nos permita conocer la concentración de este ion en el agua geotérmica a partir de la medición de la CE; ya que dicha medición se puede realizar de una manera inmediata y fácil. El análisis químico para la determinación del ion  $\text{Cl}^-$  utilizando la técnica de espectrofotometría UV-VIS es caro y tardío; con esta investigación se busca ahorrar tiempo, reactivo y dinero.

### **I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La generación de energía eléctrica a través de la geotermia es un tema que tiene un gran impacto económico, social y ambiental ya que es un tipo de energía amigable con el medio ambiente (energía verde). La precipitación de compuestos inorgánicos insolubles como consecuencia de la modificación en las condiciones de operación de los distintos equipos, provocan la saturación de los iones presentes en el agua (fenómeno de incrustación). El fenómeno de las incrustaciones es un problema mundial que afecta a la industria química, industria de hidrocarburos y a la



industria en general pues provoca pérdidas de dinero debido al deterioro progresivo de equipos. Para tener una idea de la gravedad que presenta este problema basta con observar la industria de los hidrocarburos donde las incrustaciones que se observan con mayor frecuencia son las de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) y sulfatos de estroncio y bario ( $\text{SrSO}_4$  y  $\text{BaSO}_4$ ), siendo las del  $\text{CaCO}_3$ , las más observadas en los campos petroleros. En la geotermia, cuando este fenómeno de incrustación se presenta existen tratamientos destinados para eliminar este problema (tratamientos químicos o mecánicos) dependiendo de la gravedad de dicho fenómeno.

En el área de la geotermia este fenómeno es muy común debido al quimismo del fluido geotérmico ya que presenta alto contenido de sales. En los campos geotérmicos podemos encontrar incrustaciones formadas a altas temperaturas sobre las superficies de los equipos, combinadas con gruesas capas de productos de corrosión o depósitos minerales insolubles en agua. La incrustación es un problema común en aguas geotérmicas altamente concentradas (especialmente en salmueras calientes). A medida que la temperatura del fluido disminuye la incrustación se convierte en un problema más serio. Las incrustaciones dependen de las características fisicoquímicas de los fluidos geotérmicos y la composición del agua geotérmica (temperatura, salinidad, pH, densidad, gases disueltos, saturación, cinética y termodinámica del proceso de precipitación, y régimen de flujo).

En la CGA se utiliza el análisis del ion  $\text{Cl}^-$  para establecer la relación  $\text{Ca}^{+2}/\text{Cl}^-$  y así observar el comportamiento de los pozos para evitar posibles incrustaciones. Los pozos geotérmicos se encuentran relativamente lejos de la planta geotérmica (aproximadamente 5 km de dicha planta geotérmica), donde es necesario desplazarse con vehículo de piñón debido a las condiciones del terreno (cadena montañosa). Ante una situación de emergencia se tendría que llevar la muestra al laboratorio y esperar el análisis químico para poder conocer el resultado de la concentración del ion  $\text{Cl}^-$  (aproximadamente 2 horas después del muestreo). A nivel industrial, se trabaja con cantidades grandes de fluido y al presentarse una complicación se deben tomar decisiones rápidas, de lo contrario se generarían grandes pérdidas económicas.

Ante la necesidad del control de ciertas variables para evitar fenómenos que perjudiquen los equipos y que disminuyan la eficiencia de éstos, surge la problemática de resolver, establecer y

estudiar la relación entre la conductividad eléctrica y la concentración del ion cloruro en el agua geotérmica de la CGA.

## **II. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Determinar si existe una relación entre la conductividad eléctrica y la concentración del ion cloruro, en el agua geotérmica de los pozos “X”, “Y”, y “Z” de la Central Geotérmica de Ahuachapán a través de una prueba de hipótesis estadística.

### **2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO**

- Realizar análisis del ion cloruro utilizando la técnica de espectrofotometría UV-VIS, mediciones de conductividad eléctrica y pH del agua geotérmica de los pozos “X”, “Y”, y “Z”
- Determinar y establecer a través del método de mínimos cuadrados el mejor ajuste de curva que describa la tendencia y comportamiento de la serie de datos obtenidos.
- Establecer la ecuación matemática correspondiente de acuerdo al ajuste de curva seleccionado que permita predecir la concentración del ion cloruro en el agua geotérmica de los pozos “X”, “Y”, y “Z”.
- Establecer las condiciones de trabajo bajo las cuales será aplicable cada relación a dichos pozos.

## **III. MARCO TEORICO**

### **3.1. Conductividad eléctrica**

La conductividad se define como la capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica a través de los iones disueltos. Los iones más positivos son sodio ( $\text{Na}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ). Los iones más negativos son cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ), carbonato, bicarbonato etc.

## **3.2. Importancia de la conductividad eléctrica**

La estimación de la conductividad nos permite determinar los Sólidos Disueltos Totales (TDS) en una muestra. La determinación de los TDS es una medida primaria de la calidad del agua que permite evaluar y dictaminar riesgos para diferentes tipos y usos de agua. Una conductividad baja nos indica que el agua es pura o que posee bajo contenido de sales disueltas y que por lo tanto tiene alta resistencia al flujo eléctrico o que se trata de vapor de agua que tiene baja conductividad eléctrica.

## **3.3. Factores que afectan la conductividad eléctrica**

### **3.3.1. Tipo de solvente**

Cuando el solvente presenta polaridad parecida o igual a la del soluto, mayor será la disociación de este, al igual que su conductividad.

### **3.3.2. Concentración**

Para las soluciones diluidas, al aumentar la concentración de electrolito, aumenta la conductividad. En soluciones demasiado concentradas, las interacciones iónicas son altas y generan que se alcance un punto crítico o punto máximo en el cual la conductividad eléctrica en lugar de aumentar disminuye.

### **3.3.3. Fuerza del electrolito**

Los electrolitos fuertes conducen mejor la corriente eléctrica que los débiles, ya que estos se disocian totalmente.

### **3.3.4. Influencia de la temperatura**

La conductividad de una disolución de una concentración dada cambia con la temperatura. La relación entre el cambio en la conductividad en función de la temperatura se describe en término del coeficiente de temperatura. El coeficiente de temperatura varía con la naturaleza y concentración del electrolito. Usualmente, los conductímetros tienen la capacidad de compensar las medidas por los cambios de temperatura. Esta compensación puede realizarse manualmente o estar fija (p.ej. 2.0 %/°C), dependiendo del equipo. Por definición, un valor de conductividad compensado por cambio de temperatura es la conductividad que tendría la disolución a la

temperatura de referencia (que puede ser distinta de la temperatura de trabajo). Esta temperatura de referencia puede ser 20 °C ó 25 °C, y cuanto más cercana sea la temperatura de medida a la temperatura de referencia, menor será la corrección.

### 3.4. Conductividad molar de iones

La conductividad de una solución es una medida de la facilidad con la cual la corriente eléctrica fluye a través de la solución. Esta varía con la temperatura y con la naturaleza y concentración del soluto. El valor de  $\kappa$  no es una cantidad muy útil para comparar la conductividad de diferentes solutos en soluciones de diferente concentración, esto es debido a que si una solución de un electrolito tiene mayor concentración que otra, la más concentrada tendrá mayor conductividad por tener más iones. Para establecer una comparación más correcta se necesita una propiedad en la cual se compense la diferencia de concentración en las disoluciones. Kohlrausch introdujo el concepto de conductividad equivalente, que hoy conocemos como conductividad molar,  $\Lambda_m$ . Se define  $\Lambda_m$  como la razón entre la conductividad electrolítica  $\kappa$ , y la concentración molar,  $c$  ( $\text{mol L}^{-1}$ )

$$\Lambda_m = \frac{\kappa}{c}$$

Generalmente la conductividad molar se expresa en ( $\text{S cm}^2\text{mol}^{-1}$ ). Como la conductividad,  $\kappa$ , se expresa en ( $\text{S cm}^{-1}$ ) y la concentración en ( $\text{mol L}^{-1}$ ) se introduce un factor de corrección para hacer compatibles las unidades. La ecuación para  $\Lambda_m$  que se deberá usar es:

$$\Lambda_m = 1000 \frac{\kappa}{c} \quad (\text{S cm}^2\text{mol}^{-1})$$

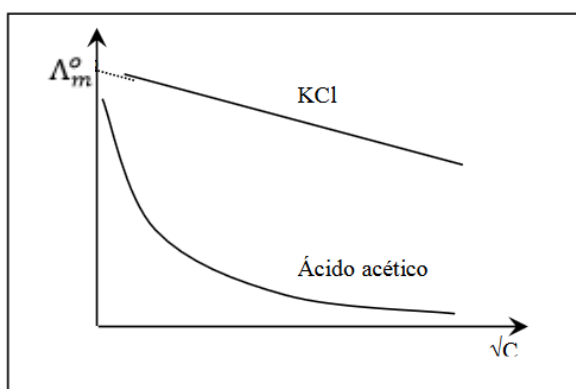
### 3.5. Variación de la conductividad molar con la concentración: Ley de Kohlrausch

La conductividad molar depende de la concentración del electrolito. Sería independiente de la misma si la conductividad fuese directamente proporcional a la concentración, pero esto no es así debido a que la interacción entre los iones es disociativa a concentraciones bajas y asociativas a concentraciones altas. Las medidas realizadas por Kohlrausch de conductividad molar para diferentes electrolitos mostraron la existencia de dos tipos de comportamientos tal como se muestra en la Figura 1 para el KCl y el ácido acético (HAc). Para los electrolitos fuertes como el KCl, el  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , etc., se observa una disminución lineal de la conductividad molar con la raíz

cuadrada de la concentración. Por otro lado, los electrolitos débiles, como el ácido acético, el agua, etc., muestran valores máximos de conductividad molar cuando  $c \rightarrow 0$  (dilución infinita), pero disminuyen rápidamente a valores bajos cuando aumenta la concentración. Hay que tener en cuenta que existe cierta relatividad en la denominación fuerte y débil ya que el grado de ionización depende fuertemente de la naturaleza del disolvente. Los electrolitos fuertes son sustancias que están completamente ionizadas en disolución, y la concentración de iones dispuestos para la conducción es proporcional a la concentración del electrolito. Para los electrolitos fuertes, Kohlrausch demostró que:

$$\Lambda_m = \Lambda_m^o - A\sqrt{c} \quad \text{Ley de Kohlrausch}$$

donde  $\Lambda_m^o$  es la conductividad molar límite (correspondiente a la ordenada en el origen de la recta de la Figura 1, dilución infinita) y A es un coeficiente (la pendiente de la gráfica de la Figura 1) que depende de la naturaleza del electrolito, del disolvente y de la temperatura. Martín, R. (2017).



**Figura 1:** Variación de la conductividad molar,  $\Lambda_m$  ( $S\text{ Cm}^2\text{ mol}^{-1}$ ), con la raíz de la concentración.

Fuente: (Martín, R., 2017).

La pronunciada dependencia entre la conductividad molar y la concentración para los electrolitos débiles se debe al desplazamiento del equilibrio hacia la derecha cuando  $c \rightarrow 0$ .



La conductividad depende del número de iones presentes en disolución y, por tanto, del grado de disociación  $\alpha$ , del electrolito.

### 3.6. Ley de la migración independiente de los iones

Kohlrausch también demostró que  $\Lambda_m^0$ , para cualquier electrolito, se puede expresar como la suma de las contribuciones de las conductancias iónicas de cada una de las especies constituyentes. Esta relación es conocida comúnmente como la Ley de las Migraciones Independientes de los Iones:

$$\Lambda_m^0 = v_+ \lambda_+^0 + v_- \lambda_-^0$$

donde  $\lambda_+^0$  y  $\lambda_-^0$  son las conductividades molares de los cationes y los aniones respectivamente y  $v_+$  y  $v_-$  son el número de cationes y aniones por fórmula unidad del electrolito, respectivamente. Martín, R. (2017).

### 3.7. Contribución de los iones individuales

$$k = \sum_i k_i \quad \text{contribución de cada ión } i \text{ a la conductividad}$$

$$\lambda_i = 1000 \frac{k_i}{C_i} \rightarrow k_i = \frac{\lambda_i C_i}{1000} = \text{cte} \quad k_i \equiv \lambda'_i C_i$$

$$\Lambda_m = \frac{k}{C} = \frac{\sum_i k_i}{C} = \frac{1}{C} \sum \lambda'_i C_i = \frac{1}{C} (C_+ \lambda'_+ + C_- \lambda'_-) = \frac{1}{C} (v_+ C \lambda'_+ + v_- C \lambda'_-) = (v_+ \lambda'_+ + v_- \lambda'_-)$$

$$k_i = \lambda'_i C_i \rightarrow \text{proporcionalidad directa entre } k_i \text{ y } C_i$$

$$\lambda'_i \rightarrow \text{cte característica de cada ión}$$

### Conductividad molar de distintos iones a dilución infinita

| Catión           | $\lambda^{\circ}_+$ | Anión                         | $\lambda^{\circ}_-$ |
|------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------|
| H <sup>+</sup>   | 349.6               | OH <sup>-</sup>               | 199.1               |
| Na <sup>+</sup>  | 50.1                | Cl <sup>-</sup>               | 76.4                |
| K <sup>+</sup>   | 73.5                | Br <sup>-</sup>               | 78.1                |
| Zn <sup>+2</sup> | 105.6               | SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | 160.0               |
| Mg <sup>+2</sup> | 106.1               | Ac <sup>-</sup>               | 40.9                |

**Tabla 1:** Conductividades molares a dilución infinita ( $\lambda^{\circ}$ ,  $S\ cm^2\ mol^{-1}$ ) para distintos iones a 25 °C)

Fuente: (Martín, R., 2017).

### **3.8. Teoría de Arrhenius para la disociación iónica.**

Fue Svante Augusto Arrhenius quien estableció el audaz postulado que admite que al disolverse un electrolito en una disolución acuosa se producía la disociación electrolítica, e incluso a la temperatura ordinaria la conversión de una apreciable cantidad de electrolito en iones. El aumento de la conductividad equivalente al disminuir la concentración, comprobada en las disoluciones diluidas de todos los electrolitos, fue atribuido por Arrhenius a la disociación parcial del electrolito. Al suponer que se establece un equilibrio entre las moléculas no disociadas del electrolito y los iones que se forman en la disociación, se explica por qué se incrementa el grado de la disociación a medida que las disoluciones son más diluidas. Y puesto que la conductividad depende de la presencia de especies con carga eléctrica se deduce, por lo tanto, una explicación cualitativa de porqué aumenta la conductividad equivalente al decrecer la concentración. Estas ideas de Arrhenius le permitieron proponer un método para calcular el grado de disociación de un electrolito a partir de los valores de su conductividad. La hipótesis de un equilibrio de disociación implica, que a dilución infinita, todos los electrolitos han de estar totalmente disociados. Este resultado general depende del hecho de que los productos contienen más partículas que los reactivos. Martín, R. (2017). La relación entre la conductividad

equivalente a una determinada concentración, con la conductividad a dilución infinita, representa una medida de la fracción de electrolito disociado a esa concentración más alta. Así se introdujo el llamado grado de disociación  $\alpha$ , que equivale a:

$$\alpha = \frac{\Lambda}{\Lambda_0}$$

### 3.9. Fluidos geotérmicos

#### 3.9.1. Constituyentes mayoritarios de los fluidos geotérmicos

Para un estudio geoquímico convencional dirigido a la exploración de áreas geotérmicas, se requiere la ejecución de análisis químicos de diferentes muestras de aguas subterráneas (manantiales, pozos, etc.), que incluyen la determinación de los "constituyentes inorgánicos", medidas del pH, conductividad eléctrica, gases disueltos e isótopos. Es imprescindible la determinación de una serie de componentes esenciales de las diferentes manifestaciones termales:

| Cationes | Aniones      |
|----------|--------------|
| Calcio   | Sulfatos     |
| Magnesio | Cloruros     |
| Sodio    | Fluoruros    |
| Potasio  | Carbonatos   |
| Sílice   | Bicarbonatos |
| Boro     |              |

**Tabla 2:** *Constituyentes mayoritarios de los fluidos geotérmicos*

*Fuente: Elaboración propia a partir de (Pacheco M. y Viera L., 2015) (Instituto Geológico y Minero de España 1985)*



### 3.9.2. Constituyentes minoritarios de los fluidos geotérmicos

| Minoritarios | Traza   |
|--------------|---------|
| Amoniaco     | Bario   |
| Litio        | Plomo   |
| Rubidio      | Vanadio |
| Cesio        |         |
| Hierro       |         |
| Aluminio     |         |
| Estroncio    |         |
| Flúor        |         |

**Tabla 3:** Constituyentes minoritarios y traza de los fluidos geotérmicos

*Fuente: Elaboración propia a partir de (Pacheco M. y Viera L., 2015) (Instituto Geológico y Minero de España 1985)*

### 3.9.3. Clasificación de los fluidos geotérmicos

#### 3.9.3.1. Aguas cloruro sódicas o cloruradas (pH neutro)

Aguas con contenido mayor de 1 g/L de sustancias mineralizantes, donde el ion cloruro, en una concentración superior a 20% meq/L suele estar acompañado de sodio en proporción semejante. La composición de este tipo de agua refleja un origen profundo. La ocurrencia de fallas y grietas facilita su ascenso hacia la superficie.

Aunque hay predominancia de cloro, sodio y potasio también existe calcio que usualmente es bajo pero variable, contiene apreciable sílice, una significativa pero variable cantidad de sulfatos, bicarbonatos y cantidades mínimas de flúor, amoníaco, arsénico, litio, rubidio y gases disueltos como dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno (Pacheco M. y Viera L., 2015).

### **3.9.3.2. Aguas ácidas sulfatadas**

Aguas ácidas, que poseen bajo contenido de cloruro, pueden ser formadas en áreas geotérmicas volcánicas donde el vapor por debajo de los 400 °C se condensa en las aguas superficiales. El sulfuro de hidrógeno del vapor es subsecuentemente oxidado a sulfato.

Las aguas ácido sulfatadas son encontradas en áreas donde el vapor sube desde el agua subterránea de alta temperatura y en áreas volcánicas donde en etapas de enfriamiento volcánico solo el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno permanecen en el vapor que sube a través de la roca.

Los constituyentes presentes en las aguas son principalmente lixiviados de las rocas, generalmente tienen pH de 0 a 3, y contienen vapor separado y gases no condensables como dióxido de carbono, metano, amoníaco, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, nitrógeno. Debido a su naturaleza generalmente superficial, su significado geoquímico usualmente indica origen superficial (Pacheco M. y Viera L., 2015).

### **3.9.3.3. Aguas sulfato ácidas cloruradas**

Aguas calientes en una gran variedad de ambientes pueden contener una gran cantidad de cloruros y sulfatos, pudiendo ser ácidas (pH 2-5). Estas aguas pueden formarse por muchos procesos, tales como:

- Mezcla de aguas cloruradas y sulfatadas a diferentes profundidades.
- Condensación cerca de la superficie de gases volcánicos en aguas meteóricas.
- Condensación de vapor magmático en las profundidades.
- Paso de fluidos clorurados a través de secuencias sulfato-soportes (ej. Evaporitas) o litologías que contengan sulfuro nativo. (Pacheco M. y Viera L., 2015).

### **3.9.3.4. Aguas bicarbonatadas sódicas**

Aguas ricas en bicarbonatos son originadas ya sea por la disolución del dióxido de carbono o por la condensación de vapor geotérmico en aguas subterráneas libres de oxígeno (relativamente profunda).

Debido a la ausencia de oxígeno se evita la oxidación del sulfuro de hidrógeno, la acidez de estas soluciones es debida a la disociación de  $H_2CO_3$ . A pesar de ser un ácido débil convierte los feldespatos y arcillas, generando soluciones acuosas neutrales, las cuales son ricas típicamente en sodio y bicarbonato, particularmente a temperatura media-alta. Se debe tener presente que:

- La baja solubilidad de la calcita previene que las soluciones acuosas aumenten su contenido en calcio.
- El Potasio y magnesio se fijan en arcillas y cloritas, respectivamente.
- La Concentración de sulfato está limitada por la baja solubilidad de la anhidrita.

Las aguas sodio bicarbonato se encuentran generalmente en la “zona de condensación” de sistemas vapor dominantes y en las partes marginales de sistemas líquido-dominantes. Sin embargo, están también presentes en yacimientos geotérmicos profundos en rocas metamórficas y/o sedimentarias. (Pacheco M. y Viera L., 2015).

### **3.9.4. Procesos que afectan el quimismo de los fluidos geotérmicos**

#### **3.9.4.1. Procesos de Mezclas**

Muchos de los procesos físicos pueden afectar a la composición de un fluido geotérmico durante su ascenso desde las profundidades del yacimiento hasta las fuentes termales de la superficie. Entre dichos procesos físicos hay que incluir la pérdida de calor por conducción, procesos de dilución con agua meteórica, y ebullición. El efecto químico derivado del enfriamiento conductivo es generalmente despreciable, sin embargo, es la base para la formación de muchos de los geotermómetros (cationes) corrientemente en uso. Sin embargo, si el proceso de enfriamiento es suficientemente largo, los porcentajes de sodio/potasio/calcio pueden ajustarse, y puede que se pierda la sílice. Estos cambios suceden en raras ocasiones a menos que los fluidos se enfríen más de 100 °C. Un indicador del proceso de enfriamiento conductivo es la presencia de fuentes termales con similar contenido en cloro y distintas temperaturas.

Las aguas calientes ascendentes pueden mezclarse con aguas frías, bien existentes en la parte superior o en las partes marginales de los sistemas geotérmicos. La temperatura de la mezcla resultante puede ser superior o inferior a la temperatura de ebullición a la presión atmosférica,

y puede que como resultado de la mezcla haya una reequilibración química, parcial o completa. Dicho reajuste químico existirá con mayor probabilidad si la temperatura del fluido después del proceso de mezcla es superior a los 100 °C. Algunas indicaciones de que indican que han sucedido procesos de mezcla son las siguientes:

- 1- Variaciones en el contenido en cloro de fuentes en ebullición, demasiado grandes para que puedan ser explicadas por pérdidas de vapor;
- 2- Variaciones en el porcentaje de elementos tales como B/C1.
- 3- Variaciones en el contenido de isótopos de oxígeno e hidrógeno (especialmente tritio).
- 4- Fuentes frías con gran cantidad de flujo y temperaturas muy superiores (mayores que 50 °C) indicadas por los geotermómetros químicos.
- 5- Variaciones sistemáticas de la composición de las fuentes y de las temperaturas.

Generalmente, el agua fría estará más diluida que el agua más caliente. Sin embargo, en algunas ocasiones los componentes del agua fría pueden estar más concentrados que los del agua caliente, donde el agua oceánica o el agua de un lago salino cerrado se mezcla con aguas calientes ascendentes. Las indicaciones arriba expuestas sobre la existencia de procesos de mezclas pueden demostrarse por diferentes composiciones en fuentes cercanas o por variaciones estacionales en una sola fuente.

Aunque la existencia de mezclas de aguas hace que la interpretación geoquímica se complique, se han desarrollado varias técnicas para resolver esta situación (Fournier y Truesdell, 1974); (Truesdell y Fournier, 1977); (Fournier, 1977). (Instituto Geológico y Minero de España 1985).

#### **3.9.4.2. Procesos de Ebullición**

Los procesos de ebullición de los fluidos termales tanto en superficie como en profundidad dan también lugar a cambios físicos y químicos en dichos fluidos. El enfriamiento de un fluido en ebullición es el cambio más obvio. Además, se originará una concentración de los constituyentes químicos no volátiles. La pérdida del CO<sub>2</sub> de la fase vapor, dará lugar generalmente, a un aumento del pH de aproximadamente 7.5 a 8.5 y a una pérdida de calcio como resultado de la deposición de calcita. En los sistemas de temperatura media, estos efectos son principalmente fenómenos superficiales. En los sistemas de alta temperatura, el vapor puede provenir de los

procesos de ebullición del subsuelo. Este vapor puede también afectar la composición del agua meteórica. (Instituto Geológico y Minero de España 1985).

La ebullición de un fluido termal y la mezcla de fluidos termales y no termales, son procesos que modifican el carácter de alta temperatura de los fluidos geotérmicos. En consecuencia estos procesos deben ser analizados por especialistas. Los comentarios que a continuación se incluyen sobre los procesos de ebullición y mezclas, pretenden sintetizar dichos fenómenos:

- 1- En general, la ebullición incrementa el pH, la actividad del  $\text{Cl}^-$ , y posiblemente el estado de oxidación ( $^f\text{O}_2$ ), y hace decrecer las concentraciones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  en la solución, así como la temperatura de la solución.
- 2- El incremento del pH, se traduce en una reducción de la solubilidad de la mayoría de los minerales.
- 3- Con las excepciones de calcita y anhidrita, una reducción de la temperatura viene acompañada de una reducción de la solubilidad de la mayoría de los minerales.
- 4- En algunos casos, las rocas encajantes pueden proporcionar suficiente calor para equilibrar el calor de vaporización y mantener la isoterma de la ebullición.
- 5- La mayor parte de los episodios de ebullición son isoentálpicos más que isotérmicos. En otras palabras, se conserva el calor de forma que la entalpía del líquido y vapor después de la ebullición, sea igual que la entalpía del líquido antes de la ebullición. Por consiguiente, la solución normalmente cederá calor a la fase vapor y se enfriará.
- 6- En general, por debajo de los  $250\text{ }^\circ\text{C}$ , las soluciones se enfrían a una velocidad de aproximadamente  $5\text{ }^\circ\text{C}/\%$  del agua transferida a la fase vapor. Entre los  $250\text{ }^\circ\text{C}$  y los  $300\text{ }^\circ\text{C}$  la velocidad es de aproximadamente  $2\text{ }^\circ\text{C}$  por ciento.
- 7- La pérdida de gases en el paso de líquido a vapor tiene lugar más rápidamente en los sistemas abiertos que en los sistemas cerrados, particularmente cuando las temperaturas son bajas. (Instituto Geológico y Minero de España 1985).
- 8- Los sistemas en ebullición abiertos, tienden a oxidar las soluciones mediante la removilización de los componentes reductores ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ) de las soluciones más rápidamente que sus contrapartidas volátiles ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ). Este efecto es más pronunciado a baja temperatura y cuando el equilibrio  $\text{O}_2$  está controlado por un cambio rápido del porcentaje  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$ .

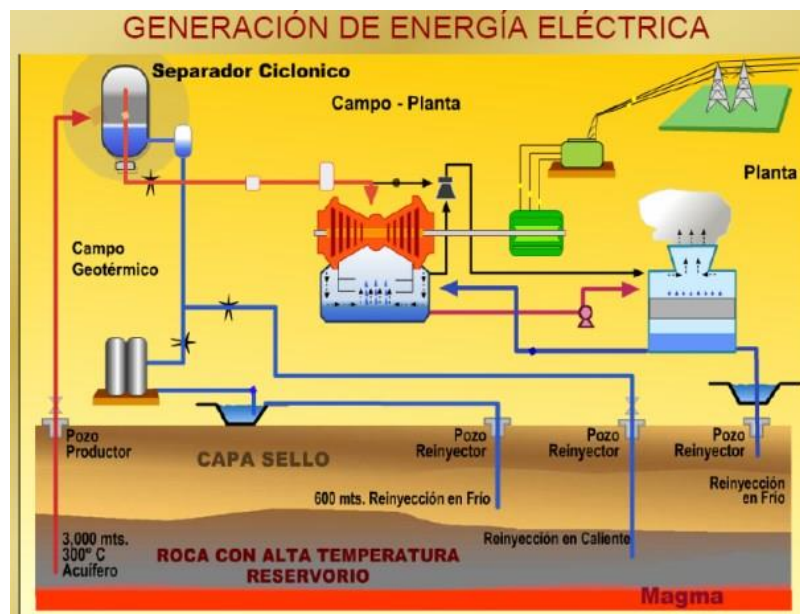
- 9- Los procesos de ebullición tienden a incrementar el pH mediante la removilización de la solución de las especies ácidas volátiles ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ). El proceso de incremento del pH es más efectivo para soluciones a bajas temperaturas ( $<300\text{ }^\circ\text{C}$ ) con un pH inicial mayor que 4 y un contenido elevado en ácidos volátiles.
- 10- A temperaturas superiores (por ejemplo,  $350\text{ }^\circ\text{C}$ ) los porcentajes de volátiles son bajos dando lugar a que los gases ácidos se disuelvan lentamente en la fase vapor.
- 11- El punto de ebullición del agua a una cierta temperatura, se presenta a profundidades mayores según incrementa la concentración de  $\text{CO}_2$  en el agua.
- 12- Los gradientes de temperatura en los sistemas que contienen  $\text{CO}_2$  son generalmente muy inferiores que los correspondientes a los sistemas con contenido bajo en gas o sin gas.
- 13- El punto de ebullición del agua a una determinada temperatura se encuentra a menos profundidad, cuando incrementa la salinidad del agua. (Instituto Geológico y Minero de España 1985).
- 14- La transferencia de calor puede tener lugar entre la fase vapor y el agua subterránea local, o entre la fase líquida y el agua subterránea produciendo una rápida interacción o quizás la ebullición del nivel freático.
- 15- Por encima de las zonas de ebullición, debe ser común la presencia de áreas que muestren lixiviación ácida, pero este fenómeno no ocurre en las zonas de mezcla.
- 16- Los procesos de ebullición son generalmente favorables a la deposición de óxidos, metales nativos, sulfuros, cuarzo y en menor extensión para la deposición de carbonatos y sulfatos.
- 17- Los cambios Redox y de pH durante los procesos de mezcla de soluciones calientes y frías están generalmente subordinados a los efectos de enfriamiento, los cuales, generalmente, dan lugar a deposiciones importantes de sulfuros, metales nativos y óxidos.
- 18- Las soluciones frías actúan principalmente como un refrigerante reduciendo la solubilidad de la mayoría de los minerales metálicos disueltos en las soluciones calientes.
- 19- La deposición de sulfatos es función del contenido en sulfato de la solución fría.
- 20- Los carbonatos tienden a ser disueltos a menos que los procesos de mezcla vengam acompañados por un incremento importante del pH.

21- Los procesos de mezcla tienden a suavizar los gradientes de salinidad y temperatura. Las representaciones gráficas temperatura-composición deben aproximarse a líneas rectas. (Instituto Geológico y Minero de España 1985).

### 3.9.5. Planta geotérmica

Es una instalación que genera energía eléctrica de fuentes renovables, utilizando el calor almacenado en el interior de la tierra que se transmite a través de los cuerpos de roca caliente o reservorios por conducción y convección, donde se suscitan procesos de interacción de fluidos y rocas, dando origen a los sistemas geotérmicos.

#### 3.9.5.1. Funcionamiento de la planta



*Figura 2: Generación de la energía eléctrica*

*Fuente: (López C. y Reyes. O, 2012)*

La Central geotérmica de Ahuachapán es una generadora de energía renovable que utiliza la energía del vapor de agua procedente de un yacimiento o reservorio geotérmico que se encuentra a varios metros de profundidad (entre 600-1500 m) para generar la energía eléctrica. El fluido es extraído del reservorio en forma de mezcla (mezcla bifásica) constituida por agua y vapor de agua. Esta mezcla es llevada al separador ciclónico, donde estos componentes son separados

por diferencia de densidades. El vapor separado es conducido por las líneas de acarreo y es llevada a los colectores donde se reúne el vapor y se le da un tratamiento para eliminar el agua que aún contiene.

El vapor de los colectores es desplazado a los separadores de humedad, y es aquí donde se les termina de eliminar el agua remanente para que a la turbina entre vapor “seco”. El vapor entra a la turbina y debido a las condiciones de presión y temperatura y a la energía cinética que posee el fluido, el vapor mueve los álabes de la turbina y convierte la energía cinética en energía mecánica. La turbina posee acoplado un generador eléctrico que tiene como función convertir la energía mecánica en energía eléctrica. La energía generada es transportada hacia las antenas de alta potencia y es distribuida a lo largo del país.

### **3.9.6. Boro en fluidos geotérmicos**

El boro es un elemento contenido en turmalinas asociadas a pegmatitas, granitos y en pequeñas cantidades en rocas sub-volcánicas como los gabros. Los gases volcánicos pueden producir emanaciones en forma de  $H_3BO_3$  y  $F_3B$ . Las aguas de fumarolas y áreas que recientemente han presentado actividad volcánica, suelen presentar altos contenidos en boro. Asimismo, el boro es indicativo de la existencia de fallas en profundidad. El comportamiento del boro en los sistemas geotérmicos, se analiza en detalle en las publicaciones de Tonani (1970, 1980). La concentración del boro (ácido bórico) en los sistemas agua-vapor de alta temperatura, tiende a aumentar en la fase vapor, cuando aumenta la temperatura de evaporación. La existencia de importantes procesos de vaporización, con escape de vapor de los yacimientos a altas temperaturas y procesos consecuentes de condensación, origina fuertes incrementos del contenido en ácido bórico en la fase líquida, lo cual invalida en parte la utilización del geotermómetro, aun cuando en todo caso la presencia de anomalías de boro constituyen un indicador óptimo para la exploración de campos geotérmicos de alta temperatura, aun cuando haya que estudiarse en detalle los modelos hidrotermales y los procesos de vaporización-condensación que puedan haber tenido lugar.

Respecto a la determinación del tipo de roca por donde ha circulado los fluidos hidrotermales, el porcentaje B/Cl ha sido utilizado en Nueva Zelanda (Mahon, 1970) para identificar las rocas encajantes de varios fluidos geotérmicos. Sin embargo, estas variaciones son pequeñas



comparadas a las variaciones existentes entre los porcentajes de B/Cl de aguas meteóricas y geotérmicas.

Los porcentajes B/Cl pueden ser utilizados como métodos de exploración sin tener en cuenta el tipo de roca en la mayoría de los terrenos. Experiencias realizadas por Mahon (1967) haciendo reaccionar agua con pizarras y grauwacas a temperaturas comprendidas entre 200 y 300 °C, han puesto de manifiesto valores de la relación B/Cl, similares a los encontrados en aguas termales existentes en el mismo tipo de roca. (Instituto Geológico y Minero de España 1985).

### **3.9.7. Cloruros en fluidos geotérmicos.**

El cloro es el anión más abundante en las aguas del mar y ocasionalmente puede superar cantidades que exceden los 20.000 ppm. En las aguas superficiales el cloro varía entre 1 y 10 ppm, y las aguas subterráneas, normalmente no presentan contenidos superiores a los 200 ppm. Las aguas asociadas a rocas sedimentarias, suelen presentar entre concentraciones de ión cloro comprendidas entre 10 y 40 ppm.

Los bajos valores de  $\text{Cl}^-$  asociado con bajas concentraciones de ión sulfato, son indicativos de un posible origen en relación con materiales ígneos. Los altos contenidos de cloro en aguas subterráneas pueden estar relacionados con masas de aguas salobres entrampadas en los sedimentos, soluciones de halita y minerales relacionados con depósitos evaporíticos, y/o aguas salobres procedentes de intrusiones.

De acuerdo con estimaciones globales, aproximadamente el 40% del cloro deriva del agua del mar por sucesivos ciclos atmosféricos, y se encuentra en equilibrio con el ión sodio; otro 40% derivaría del contenido en NaCl de las rocas. Recientemente (Fournier, 1979) ha descrito la utilización de diagramas, en relación con la entalpía del cloro, que permiten estimar la temperatura y condiciones de equilibrio de los acuíferos profundos, que alimentan los sistemas hidrotermales, conjuntamente con la aplicación de geotermómetros convencionales y de modelos de mezclas. (Instituto Geológico y Minero de España 1985).

### **3.9.8. Sodio en fluidos geotérmicos**

Es el más abundante de los iones metálicos, con concentraciones en las aguas oceánicas comprendidas entre los 8.000 y 14.000 ppm, con variaciones relacionadas con los cambios de salinidad. Sin embargo, en las aguas subterráneas no aparece en grandes cantidades, a excepción

de las aguas relacionadas con depósitos salinos, salmueras y/o aguas salobres procedentes de intrusiones marinas en acuíferos. Pero aunque en cantidades diversas, el  $\text{Na}^+$  está generalmente presente en las aguas subterráneas, relacionado con diferentes procesos:

- El origen primario del sodio en la mayor parte de las aguas subterráneas, está relacionado con productos solubles derivados de la alteración de feldespatos de tipo plagioclasas.
- En áreas con depósitos de evaporitas las soluciones de halita son muy importantes, lo mismo sucede en los relacionados con minerales arcillosos con marcados procesos de intercambio en sodio.
- Las concentraciones menos importantes, son las que se derivan de minerales como: nefelina, sodalita, estilbita, natrolita, jadeita, etc., constituyentes de las rocas ígneas y metamórficas, pero cuantitativamente menos importantes en relación con los feldespatos.

En relación con los procesos hidrotermales, el sodio es corrientemente el catión dominante en las aguas geotérmicas de alta temperatura. Una variación sistemática entre la proporción  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  con relación a la temperatura, sucede en todos los sistemas geotérmicos, excepto en los predominantemente ácidos, y en muchas áreas con una gran variedad de tipos rocosos, ha sido posible realizar una correlación precisa entre dicho porcentaje  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  y la temperatura del agua (White, 1965); (Ellis y Mahon, 1967); (Ellis, 1970); y (Fournier y Truesdell, 1973). (Instituto Geológico y Minero de España 1985).

### **3.9.9. Potasio en fluidos geotérmicos**

El potasio es otro de los componentes iónicos importantes en las aguas subterráneas. Las aguas asociadas a rocas ígneas silicatadas, contienen cantidades equivalentes de sodio y potasio, estas aguas, por lo general, tienen contenidos bajos en el total de sólidos. En las aguas superficiales o subsuperficiales, la concentración de potasio es baja, mientras que las aguas termales, normalmente presentan altos contenidos en potasio. El origen común del potasio está relacionado con procesos de alteración de los feldespatos tipo ortosa, microclina, biotita, leucita y nefelina en rocas ígneas y metamórficas. La circulación de las aguas a través de depósitos evaporíticos, pueden reportar grandes contenidos de potasio en relación con procesos de disolución de la silvina (KCl). (Instituto Geológico y Minero de España 1985).

### **3.9.10. Calcio en fluidos geotérmicos**

El calcio es un constituyente mayoritario de las aguas subterráneas. Su origen está relacionado con la disolución de rocas sedimentarias bien de origen marino, tipo calizas, y otros minerales como calcita, aragonito, anortita, fluorita, wollastonita y otros diferentes minerales de la serie de los feldespatos, anfíboles y piroxenos en los que el calcio supone un constituyente importante.

En su circulación el agua disuelve el calcio en forma  $\text{Ca}^{++}$ , lo que condiciona la presencia de grandes cantidades de calcio con la existencia de proporciones elevadas de  $\text{CO}_2$  disuelto. Las aguas geotérmicas contienen los iones de varias sales de calcio solubles, por ejemplo  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{CaF}_2$ . La mayoría de las aguas geotérmicas existentes en niveles profundos, están próximas al nivel de saturación de calcita (Ellis, 1970) y este mineral precipita frecuentemente cuando las aguas ebulen y pierden el dióxido de carbono. La tendencia hacia la precipitación de la calcita en canales naturales y en las tuberías de perforación, es más frecuente en las aguas que contienen altas concentraciones de dióxido de carbono. (Instituto Geológico y Minero de España 1985).

### **3.9.11. Carbonatos y bicarbonatos en fluidos geotérmicos**

Los carbonatos y bicarbonatos están presentes en las aguas, en cantidades diversas y generalmente acompañados por el calcio y el magnesio. La solubilidad de los minerales carbonatados está altamente influenciada por el pH y la fugacidad del  $\text{CO}_2$  disuelto en los fluidos hidrotermales. Las relaciones entre la química de las soluciones hidrotermales y la solubilidad de los minerales carbonatados están estrechamente relacionada con los sistemas P- $\text{CO}_2$  y efectos de la salinidad para el caso de la calcita.

Las reacciones de equilibrio que condicionan las relaciones de concentración del  $\text{Ca}^{+2}$  y del  $\text{HCO}_3^-$ , en las aguas termales, no son tan simples como para permitir una evaluación directa de la temperatura de base. Sin embargo, se ha observado que en la zona de los Geysers, donde existen aguas termales con temperaturas de base superiores a los 170 °C, las cuales han sufrido procesos de enfriamiento, los contenidos de  $\text{CO}_2$  total en relación al  $\text{Ca}^{+2}$ , son más bajos que en las aguas termales de salinidad análoga. Por el contrario, en las aguas de las manifestaciones termales con depósitos de travertinos, las concentraciones son más altas en relación con las

temperaturas sub-superficiales y con las concentraciones de sílice donde están los depósitos hidrotermales. (Instituto Geológico y Minero de España 1985).

### **3.9.12. Sulfatos y Componentes Sulfurosos en fluidos geotérmicos**

El ión sulfito en las aguas subterráneas deriva del contacto con yesos y anhidritas y su concentración depende de la temperatura. La solubilidad de los minerales sulfatados alcalinos (calcio, estroncio, bario, etc.) en las soluciones hidrotermales, depende de la temperatura, presión y salinidad y está en relación con la actividad entre las tierras alcalinas y la de los sulfatos en solución, y del estado de oxidación de las soluciones hidrotermales. La precipitación de los minerales sulfatados depende de varios factores, pero en parte se debe a los cambios de fugacidad del oxígeno durante la evolución del sistema hidrotermal.

Con respecto al sulfato cálcico, la mayor parte de las aguas geotérmicas con temperaturas comprendidas entre los 200 y los 300 °C, un pH próximo a la neutralidad, y una salinidad moderada, poseen concentraciones de sulfatos del orden de los 10 a los 100 ppm. Dado que la solubilidad del sulfato cálcico (anhidrita) en aguas de alta temperatura es muy baja, es de esperar una correlación inversa entre el calcio y las concentraciones de sulfato, excepto cuando el pH es bajo en cuyo caso hay una apreciable proporción de sulfatos presentes, tales como  $\text{HSO}_4^-$ . Los sistemas con temperaturas muy elevadas o salinidades muy altas, pueden tener concentraciones extremadamente bajas de sulfatos (por ejemplo, Mexicali y Salton Sea). (Instituto Geológico y Minero de España 1985).

### **3.9.13. Magnesio en fluidos geotérmicos**

Normalmente, el origen del magnesio en las aguas subterráneas, está relacionado con dolomitas en formaciones sedimentarias, mientras que en rocas ígneas, se relaciona con la presencia de olivino, biotita, hornblendas, piroxenos augíticos; y en las rocas metamórficas en relación con serpentinas, talco, piroxenos diopsídicos y tremolita. En general, el magnesio es un elemento importante en aguas relacionadas con acuíferos dolomíticos y al igual que el calcio, se presenta en forma fónica, aun cuando presenta una mayor tendencia a permanecer en solución. En las aguas geotérmicas de alta temperatura y baja salinidad, las concentraciones del magnesio son extremadamente bajas, frecuentemente del orden de 0,01 a 0,1 ppm.

Numerosos estudios efectuados en Nueva Zelanda y Japón sobre las concentraciones de Mg y relaciones de  $Mg^{+2}/Ca^{+2}$ , indican que contenidos bajos de  $Mg^{+2}$  y las relaciones bajas de  $Mg^{+2}/Ca^{+2}$ , son características de los sistemas geotérmicos de alta temperatura. Esto está relacionado con el hecho de que el magnesio a elevadas temperaturas, permanece retenido en la fase sólida (cloritas, micas, ilitas, montmorillonitas, etc), mientras que a bajas temperaturas, los procesos de hidrólisis disminuyen la reactividad del magnesio, con lo que aumenta el contenido de magnesio disuelto en el agua. (Instituto Geológico y Minero de España 1985).

#### **3.9.14. Sílice en fluidos geotérmicos**

La sílice contenida en las aguas subterráneas, está comúnmente asociada a procesos de disolución de silicatos, controlada por el pH del agua, su temperatura y la velocidad del flujo. En conjunto éstos son los factores que condicionan la solubilidad de la sílice; el sistema  $SiO_2 - H_2O$ , es el más estudiado, incluyendo los minerales de cuarzo y otros polimorfos de la sílice. Los diferentes estudios de solubilidad del cuarzo, fueron evolucionando rápidamente, planteándose los primeros diagramas de interés hidrotermal en diferentes rangos de presión y temperatura. A varias presiones, la solubilidad del cuarzo aumenta con la temperatura, excepto en la región próxima al punto crítico del agua, donde la densidad de la solución es pequeña. Fournier y Rowe (1966) y Mahon (1966) han demostrado de forma concluyente que las aguas geotérmicas de alta temperatura (por encima de los 180 °C), están saturadas en sílice en equilibrio con el cuarzo. La concentración de sílice en una muestra de agua de un pozo geotérmico se puede utilizar para proporcionar una estimación precisa de la temperatura subterránea (Fournier, 1970); (Mahon y Finlayson, 1972). Las soluciones de equilibrio de alta temperatura, contienen solamente especies de sílice con estructura molecular simple. (Instituto Geológico y Minero de España 1985).

#### **3.9.15. Flúor en fluidos geotérmicos**

Se presenta en muy bajos contenidos en las aguas subterráneas, y generalmente deriva de fluoritas y de otros minerales que contienen flúor. La solubilidad del flúor es similar a la del cuarzo, pero ésta varía en presencia de otras sales. Su solubilidad es fuertemente afectada por la presencia de electrolitos y la cantidad de fluorita disuelta o precipitada, es función no solamente de la temperatura, presión y de la fuerza iónica de la solución hidrotermal, sino de la relación

de la concentración del calcio y del ión flúor en solución. En las aguas geotérmicas, las concentraciones altas en flúor y bajas en calcio vienen favorecidas por la baja salinidad, alta concentración de dióxido de carbono y temperaturas elevadas. (Instituto Geológico y Minero de España 1985).

### **3.9.16. Litio, Rubidio y Cesio en fluidos geotérmicos**

Las concentraciones de tierras raras en aguas termales refleja su abundancia en las rocas encajantes, con aguas conteniendo bajas concentraciones en zonas basálticas con respecto a las que se presentan en las áreas riolíticas y andesíticas. La concentración de litio y rubidio tiende a disminuir en las aguas migrantes hacia la superficie, debido a la incorporación de iones en los productos hidrotermales de alteración de bajo grado, tales como arcillas y zeolitas. (Instituto Geológico y Minero de España 1985).

### **3.9.17. Hierro en fluidos geotérmicos**

El hierro está relacionado con la lixiviación de gran cantidad de minerales de los que el hierro es un constituyente importante, como piroxenos, anfíboles, magnetita, hematites y piritas. Se presenta en concentraciones a niveles de trazas en las aguas geotérmicas, pero sin embargo es un constituyente mayoritario asociado a rocas, en particular a las ígneas. Las bajas concentraciones en que se presenta y los procesos de contaminación, han supuesto un fuerte obstáculo para su aplicación como indicador de la temperatura del agua.

Recientemente, gracias al desarrollo de técnicas analíticas de alta precisión, se han podido utilizar las relaciones de  $\text{Fe}^{2+}/\text{H}^+$  y las concentraciones de  $\text{SH}_2$ . El hierro presente en las aguas termales, se presenta en cuatro especies composicionales :  $\text{Fe}(\text{OH})^{-4}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{FeOH}^+$  y  $\text{Fe}(\text{OH})^{+2}$ , cuya distribución está de acuerdo con los siguientes rangos de temperatura: el  $\text{Fe}(\text{OH})^{-4}$  es la especie dominante a alta temperatura; mientras que en temperaturas intermedias (100 a 150 °C) la especie dominante es el  $\text{FeOH}^+$  y el  $\text{Fe}(\text{OH})^{-4}$ , aun cuando el  $\text{Fe}^{2+}$  está también presente, a bajas temperaturas dominan el  $\text{Fe}^{2+}$  y el  $\text{Fe}(\text{OH})^+$  está evaluación debe efectuarse sobre los contenidos en la relación al equilibrio mineral/soluto. (Instituto Geológico y Minero de España 1985).

### 3.9.18. Importancia del control del ion cloruro en las aguas geotérmicas

El área de tratamiento de aguas de la Central geotérmica de Ahuachapán es la encargada de monitorear a través de análisis químicos las concentraciones de ciertas especies para observar su comportamiento. Una especie de mucho interés para la CGA son los iones cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) ya que además de ser una especie altamente corrosiva, son elementos conservativos, es decir, su concentración se mantiene relativamente constante y sólo se ve afectada por procesos físicos. La importancia del análisis del ion cloruro en los pozos geotérmicos es para establecer la relación  $\text{Ca}^{+2}/\text{Cl}^-$  que sirve para observar y monitorear el comportamiento del pozo y ver si es propenso a sufrir fenómenos de incrustación.

## IV. DISEÑO METODOLÓGICO

### 4.1. TIPO DE ESTUDIO

Estudio exploratorio-correlacional.

### 4.2. ÁREA DE ESTUDIO

La Central Geotérmica se encuentra ubicada a 103 km al occidente de la ciudad capital, en el sector norte de la cordillera de Apaneca, en el lugar conocido como Cantón Santa Rosa Acacalco del Municipio y Departamento de Ahuachapán.

### 4.3. DEFINICIÓN Y MEDICION DE VARIABLES DE ESTUDIO

| Tipo de variable | Variable                | Definición   | Medición                                  |
|------------------|-------------------------|--|---|
| Dependiente      | Conductividad eléctrica | Capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica a través de los iones disueltos. | Conductímetro ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) |

| <b>Tipo de variable</b> | <b>Variable</b>                  | <b>Definición</b>   | <b>Medición</b> |
|-------------------------|----------------------------------|---|-----------------|
| Independiente           | Concentración de Cl <sup>-</sup> | Anión mayoritario que posee alta concentración en el agua geotérmica.   | -               |
| Interviniente           | Temperatura                      | Medida de la cantidad de calor que posee el agua, es decir su estado relativo de calentamiento o enfriamiento.            | -               |
| Interviniente           | Pureza                           | Muestra de agua geotérmica representativa libre de residuos, óxidos o sales inorgánicas provenientes de agentes externos. | -               |

**Tabla 4:** Definición y medición de variables

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

#### **4.4. UNIVERSO Y MUESTRA**

##### **4.4.1. Universo**

Pozos geotérmicos más propensos a sufrir fenómenos de incrustaciones y que se les aplica un tratamiento químico inhibitor en la Central Geotérmica de Ahuachapán.

##### **4.4.2. Muestra**

Muestra de agua geotérmica de los pozos “X”, “Y”, y “Z” de la Central Geotérmica de Ahuachapán que comparten ciertas características químicas.



## 4.5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

**El experimento se realizará en 4 etapas:**

### 1) Calibración del equipo.

- Para medir de la conductividad eléctrica se utilizará un equipo multiparámetros que cuenta con un electrodo para dicha medición. Este electrodo será calibrado en 3 puntos ( $100 \mu S/cm$ ,  $1413 \mu S/cm$  y  $12900 \mu S/cm$ ) utilizando soluciones de calibración. Esta calibración se realizará una vez por semana para obtener datos representativos.
- Para la medición del pH se utilizará el pH-metro Thermo Scientific Orion 4-Star, se calibrará el pH-metro en 3 puntos (pH 7, pH 4.01 y pH 10.01) utilizando soluciones buffer de calibración. Esta calibración se realizará una vez por semana para obtener datos representativos.

### 2) Etapa de muestreo

Se realizarán 2 muestreos semanales del agua geotérmica de los pozos “X”, “Y”, y “Z” de la Central Geotérmica de Ahuachapán.

#### **Procedimiento:**

- Se utilizará un recipiente de plástico HDPE (polietileno de alta densidad) para la toma de la muestra, se abrirá completamente la válvula de la obra de toma y se dejará que fluya el vapor condensado por unos minutos para tener una muestra representativa libre de impurezas. Posteriormente se reducirá el flujo de vapor para que exista un equilibrio entre el vapor que sale y el que se condensa. Se enjuagará 3 veces como mínimo el recipiente con el vapor condensado de la muestra problema. Se llenará completamente el recipiente sin dejar burbujas de aire en su interior.

**NOTA:** Es importante recalcar el peligro que existe a la hora del muestreo debido a la alta presión y temperatura con que sale el fluido geotérmico a la superficie (aproximadamente  $150-160 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $5-10 \text{ kg/cm}^2$ ); por esta razón es importante tomar las

medidas de precaución correspondientes que exige el área de seguridad industrial de la empresa. Para realizar dicho muestreo se deben utilizar los EPI's (equipo de protección individual o personal) siguientes: casco, protección auditiva, guantes de cuero, botas de cubo, y lentes protectores.

### **3) Medición de la conductividad eléctrica y pH de la muestra**

#### **Conductividad eléctrica:**

- Medir la conductividad eléctrica de la muestra lo más cercano a la temperatura de referencia del equipo (25°C) para evitar errores de medición.
- Enjuagar el electrodo con agua destilada y retirar el exceso de agua utilizando un paño seco evitando frotar el electrodo para no generar electricidad estática.
- Enjuagar el electrodo con el agua de la muestra para eliminar residuos de agua destilada.
- Introducir el electrodo y agitar el recipiente. Dejar estabilizar el valor de la lectura y registrar dicho valor.

#### **pH:**

- Medir el pH de la muestra lo más cercano a la temperatura de referencia del equipo (25°C) para evitar errores de medición.
- Enjuagar el electrodo con agua destilada y retirar el exceso de agua utilizando un paño seco evitando frotar el electrodo para no generar electricidad estática.
- Enjuagar el electrodo con el agua de la muestra para eliminar residuos de agua destilada.
- Introducir el electrodo y agitar el recipiente. Dejar estabilizar el valor de la lectura y registrar dicho valor.

### **4) Etapa de análisis químico**

- El análisis de iones cloruros se realizará por espectrofotometría UV-VIS, utilizando el espectrofotómetro Genesys 20.


- Se realizarán diluciones a las distintas muestras debido a que el límite máximo de detección del método es de 250 ppm de Cl<sup>-</sup>.

| Pozo | Dilución    | Factor de dilución |
|------|-------------|--------------------|
| X    | 4 mL-100 mL | 25                 |
| Y    | 4 mL-100 mL | 25                 |
| Z    | 4 mL-100 mL | 25                 |

**Tabla 5:** Dilución de las muestras

Fuente: (Elaboración propia, 2019)

## PROCEDIMIENTO ANALÍTICO

| Alertas de seguridad   |   |   |
|--|---|---|
|   |   |   |
| Reactivos  | Materiales  | Equipo  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Muestra preparada</li> <li>✓ Reactivo Cl<sup>-</sup>-1, y Cl<sup>-</sup>-2</li> <li>✓ Agua desionizada</li> <li>✓ Estándares de Cl<sup>-</sup></li> <li>✓ Agua destilada</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Matraz aforado</li> <li>✓ Vasos de precipitado</li> <li>✓ Puntas para micropipetas</li> <li>✓ Micropipetas</li> <li>✓ Celda espectrofotométrica</li> <li>✓ Pipetas graduadas</li> <li>✓ Franela</li> <li>✓ Papel toalla</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Espectrofotómetro</li> <li>✓ Desionizador</li> <li>✓ pH-metro y conductímetro</li> </ul> |
| <i>Intervalo de medida 10-250 mg/L de Cl<sup>-</sup></i>   |   | $\lambda_{medición} = 580 \text{ nm}$   |

**Blanco:**

1. Pipetear en un tubo de ensayo o beaker 1.0 mL de agua desionizada (10 - 30 °C)
2. Añadir con pipeta 2.5 mL del reactivo Cl-1 y mezclar
3. Añadir con pipeta 0.5 mL del reactivo Cl-2 y mezclar.

**Dejar en reposo la muestra 1 minuto (tiempo de reacción)**, luego introducir la muestra de medición en la cubeta de 10 mm y medir en el fotómetro.

**Estándar**

1. Pipetear en un tubo de ensayo o beaker 1.0 mL de cada estándar (10 - 30 °C)
2. Añadir con pipeta 2.5 mL del reactivo Cl-1 y mezclar
3. Añadir con pipeta 0.5 mL del reactivo Cl-2 y mezclar.

**Dejar en reposo la muestra 1 minuto (tiempo de reacción)**, luego introducir la muestra de medición en la cubeta de 10 mm y medir en el fotómetro.

**Muestra problema:**

1. Pipetear en un tubo de ensayo o beaker 1.0 mL de la muestra problema (10 - 30 °C)
2. Añadir con pipeta 2.5 mL del reactivo Cl-1 y mezclar
3. Añadir con pipeta 0.5 mL del reactivo Cl-2 y mezclar.

**Dejar en reposo la muestra 1 minuto (tiempo de reacción)**, luego introducir la muestra de medición en la cubeta de 10 mm y medir en el fotómetro.

## V. HIPÓTESIS

- 1- Existe una relación entre la conductividad eléctrica y la concentración del ion cloruro en el agua de los pozos “X”, “Y”, “Z”.
- 2- Es posible cuantificar la concentración del ion cloruro a través de la medición de la conductividad eléctrica en los pozos “X”, “Y”, “Z” mediante el diseño de una herramienta matemática predictiva de una manera significativa estadísticamente.

## VI. RESULTADOS

### 6.1. Pruebas para discriminar la influencia de iones

El agua geotérmica es característica por poseer una gran cantidad de sales disueltas lo que conlleva a una alta conductividad eléctrica debido a los iones en solución. Los constituyentes mayoritarios y minoritarios que podemos encontrar en estas aguas son  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Li}^+$ , B y  $\text{SiO}_2$  en sus formas correspondientes.

Los elementos traza no se considerarán debido a que poseen concentraciones bajas. Se sabe que la sílice y el boro no se encuentran ionizados, por esta razón no se consideran en el balance iónico ya que su aporte de carga es pequeño. El ácido silícico  $\text{Si}(\text{OH})_4$  es un ácido débil que en pH neutro se encuentra no ionizado.

#### Prueba para discriminar la influencia del Boro.

| Muestra                | Temperatura de medición (°C) | CE(μS/cm) |
|------------------------|------------------------------|-----------|
| Estándar 1000 ppm Boro | 24                           | 4.15      |

**Tabla 6:** Discriminación del boro en el agua geotérmica

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

En la tabla 6 podemos ver y comprobar lo teórico con lo experimental ya que se observa que el boro posee una conductividad eléctrica baja a concentraciones altas, esto es bueno ya que significa que son malos conductores y su aporte a la CE es bajo.

## QUIMISMO DEL AGUA GEOTÉRMICA

| Pozo | Fecha    | Hora de Muestreo | Na <sup>+</sup><br>Ppm | K <sup>+</sup><br>Ppm | Ca <sup>+2</sup><br>Ppm | Mg <sup>+2</sup><br>ppm | Cl <sup>-</sup><br>Ppm | SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup><br>Ppm | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>ppm | SiO <sub>2</sub><br>Ppm | B<br>ppm | Li <sup>+</sup><br>Ppm | Fe <sup>+2</sup><br>ppm | F <sup>-</sup><br>ppm | CE<br>$\mu S/cm$ |
|------|----------|------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|----------|------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------|
| “X”  | 11-12-18 | 10:10            | 2772                   | 307.20                | 141.10                  | 0.1280                  | 5024                   | 49.30                                | 23.21                                | 515                     | 164.90   | 7.60                   | 0.224                   | 1.30                  | 14655            |
| “Y”  | 11-12-18 | 09:50            | 2999                   | 305.70                | 147.90                  | 0.0925                  | 5196                   | 34.08                                | 14.11                                | 647                     | 204.6    | 7.50                   | 0.229                   | 1.10                  | 15015            |
| “Z”  | 11-12-18 | 08:40            | 2964                   | 300.80                | 164.50                  | 0.1304                  | 5210                   | 31.47                                | 17.66                                | 462                     | 83.40    | 7.60                   | 2.195                   | 1.00                  | 14955            |

**Tabla 7:** Composición química del agua geotérmica

*Fuente: (Elaboración propia a partir de información de la empresa, 2018)*

A través de las leyes de Kohlrausch podemos calcular el aporte de cada ión a la conductividad eléctrica haciendo uso de la conductividad molar a dilución infinita (si la concentración del ion es baja) de cada ión. El aporte que genera un ión a la conductividad eléctrica puede explicarse haciendo uso del concepto de número de transporte de carga o transporte iónico, el cuál sirve para calcular la fracción o porcentaje de la carga total que conduce un ión. Este número de transporte depende del valor absoluto de la carga del ión, de la masa molar, del tamaño del ión, de la conductividad molar y de la concentración.

La discriminación de la influencia de los iones a la CE se hace mediante el uso de las leyes de Kohlrausch y el concepto del número de transporte iónico. Con la prueba de la tabla 6 se garantiza que la influencia del boro a la conductividad eléctrica total es muy pequeña en comparación a los demás iones, además como se observa en la tabla 7 la concentración de estas especies en las aguas geotérmicas es menor a la concentración del estándar al cual se le realizó la prueba; es decir, el aporte del boro será menor a  $4.15 \mu S/cm$ .

La influencia de la sílice se descarta debido a que no se encuentra ionizado y es por esta razón que no se considera en el balance iónico.

En la tabla 7 se muestra la composición química del agua geotérmica de los pozos. Como sabemos que  $k_i = \lambda_i C_i$  podemos utilizar esta fórmula para calcular la conductividad que aporta el ión cuando se encuentra a dilución infinita. Como se observa en la tabla 7, la concentración de  $Mg^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{-2}$ ,  $F^-$ , y  $Li^+$  es muy baja en comparación a los demás iones. El  $Ca^{+2}$  a pesar que posee una concentración mayor que los iones antes mencionados, su aporte es bajo ya que en comparación a la concentración del ión cloruro es pequeña. Además el ion  $Ca^{+2}$  es controlado mediante la aplicación de un químico inhibidor para evitar su precipitación y deposición, con el fin de que su concentración permanezca relativamente constante.

Para los iones  $Cl^-$  y  $Na^+$  no se puede utilizar la conductividad molar a dilución infinita para calcular el aporte a la conductividad eléctrica, ya que poseen concentraciones altas que superan la dilución infinita y sabemos que la conductividad molar es inversa a la concentración.

## 6.2. Cálculo del aporte de conductividad eléctrica de los iones que poseen baja concentración

Utilizamos los iones que poseen baja concentración de la tabla 7 para calcular el aporte que estos generan a la conductividad eléctrica ya que se asemejan a dilución infinita.

$$CE_{total} = CE_{iones\ de\ baja\ concentración} + CE_{Cl^-} + CE_{Na^+}$$

$$CE_{Cl^-} + CE_{Na^+} = CE_{total} - CE_{iones\ de\ baja\ concentración}$$

$$\%CE_{iones\ de\ baja\ concentración} = CE_{iones\ de\ baja\ concentración} \times \frac{100\ \%}{CE_{total}}$$

Si los iones de baja concentración generan un porcentaje bajo de aporte a la conductividad eléctrica, indica que su influencia a la variable dependiente es baja ya que se trata de varios iones que implican poco aporte de corriente.

**Cálculo del aporte de los iones de baja concentración a la conductividad eléctrica pozo  
“X”**

| Ión o especie                      | Concentración molar (mol/L) | Conductividad molar a dilución infinita a 25 °C ( $\mu S. L/cm. mol$ ) o cálculo del aporte de carga | Aporte a la conductividad eléctrica ( $\mu S/cm$ ) |
|------------------------------------|-----------------------------|--|--|
| Ca <sup>+2</sup>                   | 0.00352063                  | 119000   | 418.95   |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>      | 0.00038022                  | 44500  | 16.92  |
| Mg <sup>+2</sup>                   | 0.00000526                  | 106100   | 0.56   |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>      | 0.00051320                  | 160000   | 82.11  |
| Li <sup>+</sup>                    | 0.00109494                  | 38700  | 42.37  |
| Fe <sup>+2</sup>                   | 0.00000401                  | 138000   | 0.55   |
| K <sup>+</sup>                     | 0.00785711                  | 73500  | 577.50   |
| F <sup>-</sup>                     | 0.00006842                  | 55400  | 3.79   |
| Boro                               | -                           | $CE_{Boro} = 164.90 ppm \times \frac{4.15 \mu S/cm}{1000 ppm}$                                       | 0.68   |
| <b>Total</b>                       |                             |  | 1143.43  |
| <b>%CEiones baja concentración</b> |                             |  | 7.80   |

**Tabla 8:** Aporte de los iones de baja concentración a la conductividad eléctrica del pozo “X”

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

De la tabla 8 se deduce que los iones de baja concentración del pozo “X” generan el 7.80 % de la conductividad eléctrica total, el 92.20 % corresponde al aporte generado por el Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup>, siendo el Cl<sup>-</sup> el que mayor aporte genera debido a su mayor concentración. En conclusión pequeñas variaciones en la concentración de estas especies no generaran un impacto grande en la CE total.



**Cálculo del aporte de los iones de baja concentración a la conductividad eléctrica pozo “Y”**

| Ión o especie                      | Concentración molar (mol/L) | Conductividad molar a dilución infinita a 25 °C ( $\mu S. L/cm. mol$ ) o cálculo del aporte a la CE | Aporte a la conductividad eléctrica ( $\mu S/cm$ ) |
|------------------------------------|-----------------------------|---|--|
| Ca <sup>+2</sup>                   | 0.00369030                  | 119000  | 439.15   |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>      | 0.00023125                  | 44500   | 10.29  |
| Mg <sup>+2</sup>                   | 0.00000380                  | 106100  | 0.40   |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>      | 0.00035487                  | 160000  | 56.78  |
| Li <sup>+</sup>                    | 0.00108054                  | 38700   | 41.82  |
| Fe <sup>+2</sup>                   | 0.00000410                  | 138000  | 0.57   |
| K <sup>+</sup>                     | 0.00781875                  | 73500   | 574.68   |
| F <sup>-</sup>                     | 0.00005790                  | 55400   | 3.21   |
| Boro                               | -                           | $CE_{Boro} = 204.60 ppm \times \frac{4.15 \mu S/cm}{1000 ppm}$                                      | 0.85   |
| <b>Total</b>                       |                             |   | 1127.75  |
| <b>%CEiones baja concentración</b> |                             |   | 7.51   |

**Tabla 9:** Aporte de los iones de baja concentración a la conductividad eléctrica del pozo “Y”

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

De la tabla 9 se deduce que los iones de baja concentración del pozo “Y” generan el 7.51 % de la conductividad eléctrica total, el 92.49 % corresponde al aporte generado por el Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup>, siendo el Cl<sup>-</sup> el que mayor aporte genera debido a su mayor concentración. En conclusión pequeñas variaciones en la concentración de estas especies no generaran un impacto grande en la CE total.

**Cálculo del aporte de los iones de baja concentración a la conductividad eléctrica pozo  
“Z”**

| Ión o especie                      | Concentración molar (mol/L) | Conductividad molar a dilución infinita a 25 °C ( $\mu S. L/cm. mol$ ) o cálculo del aporte a la CE | Aporte a la conductividad eléctrica ( $\mu S/cm$ ) |
|------------------------------------|-----------------------------|---|--|
| Ca <sup>+2</sup>                   | 0.00410450                  | 119000  | 488.44   |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>      | 0.00028943                  | 44500   | 12.88  |
| Mg <sup>+2</sup>                   | 0.00000536                  | 106100  | 0.57   |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>      | 0.00032760                  | 160000  | 52.42  |
| Li <sup>+</sup>                    | 0.00109494                  | 38700   | 42.37  |
| Fe <sup>+2</sup>                   | 0.00003930                  | 138000  | 5.42   |
| K <sup>+</sup>                     | 0.00769343                  | 73500   | 565.47   |
| F <sup>-</sup>                     | 0.00005263                  | 55400   | 2.92   |
| Boro                               | -                           | $CE_{Boro} = 83.40 ppm \times \frac{4.15 \mu S/cm}{1000 ppm}$                                       | 0.35   |
| <b>Total</b>                       |                             |   | 1170.84  |
| <b>%CEiones baja concentración</b> |                             |   | 7.83   |

**Tabla 10:** Aporte de los iones de baja concentración a la conductividad eléctrica del pozo “Z”

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

De la tabla 10 se deduce que los iones de baja concentración del pozo “Z” generan el 7.83 % de la conductividad eléctrica total, el 92.17 % corresponde al aporte generado por el Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup>, siendo el Cl<sup>-</sup> el que mayor aporte genera debido a su mayor concentración. En conclusión pequeñas variaciones en la concentración de estas especies no generaran un impacto grande en la CE total.

### 6.3. Prueba preliminar para observar la variación de la CE con la concentración

Se preparó una solución estándar de aproximadamente 5500 ppm del ión Cl<sup>-</sup> simulando las concentraciones de cloruros en los pozos. Esta solución se preparó a partir de NaCl calidad reactivo, se colocó el NaCl durante 1 h a 110-115 °C para eliminar la humedad. Se prepararon distintas diluciones a partir de la solución madre (5500 ppm) para observar mejor la tendencia que tiene la CE al aumentar la concentración. Se midió la conductividad eléctrica del agua con la que se realizaron las diluciones para restarla a la conductividad de la disolución de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$CE_{disolución} = CE_{disolvente} + CE_{soluta}$$

#### Prueba preliminar: Variación de la conductividad eléctrica con la concentración

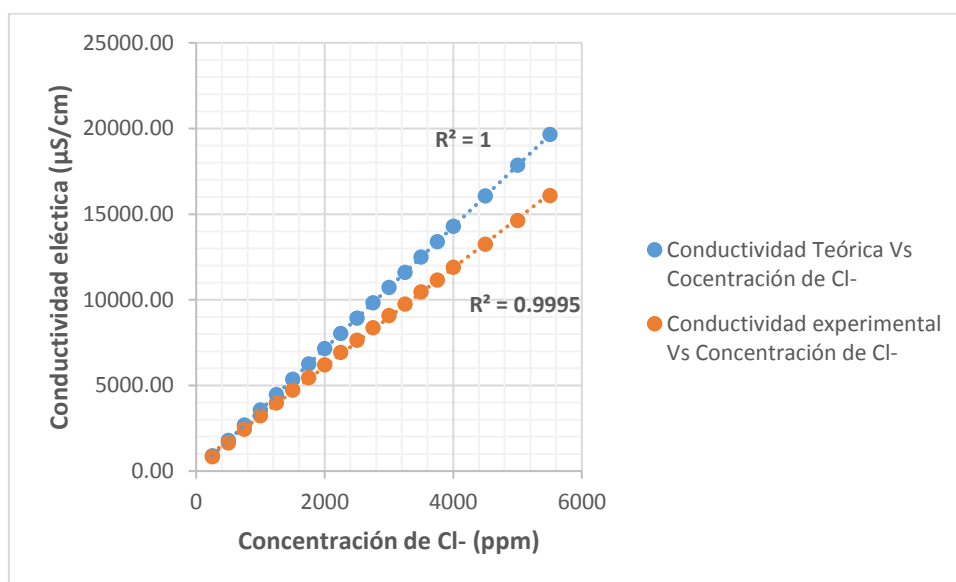
| CE(μS/cm)<br>Teórica | CE(μS/cm)<br>Experimental | Temperatura<br>°C | Cl <sup>-</sup><br>(ppm) | Na <sup>+</sup><br>(ppm) | NaCl<br>(ppm) |
|----------------------|---------------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|---------------|
| 892.03               | 835.38                    | 25                | 250.00                   | 162.11                   | 412.09        |
| 1784.05              | 1640.38                   | 25                | 500.00                   | 324.23                   | 824.19        |
| 2676.08              | 2434.38                   | 25                | 750.00                   | 486.34                   | 1236.28       |
| 3568.10              | 3219.38                   | 25                | 1000.00                  | 648.46                   | 1648.38       |
| 4460.74              | 3969.38                   | 25                | 1250.17                  | 810.68                   | 2060.75       |
| 5352.87              | 4709.38                   | 25                | 1500.20                  | 972.82                   | 2472.90       |
| 6245.00              | 5439.38                   | 25                | 1750.23                  | 1134.95                  | 2885.04       |
| 7137.17              | 6189.38                   | 25                | 2000.27                  | 1297.09                  | 3297.20       |
| 8029.30              | 6919.38                   | 25                | 2250.30                  | 1459.23                  | 3709.35       |
| 8921.47              | 7629.38                   | 25                | 2500.34                  | 1621.37                  | 4121.51       |
| 9813.61              | 8359.38                   | 25                | 2750.37                  | 1783.50                  | 4533.65       |
| 10705.74             | 9069.38                   | 25                | 3000.40                  | 1945.63                  | 4945.80       |
| 11597.91             | 9739.04                   | 25                | 3250.44                  | 2107.78                  | 5357.96       |
| 12490.04             | 10449.04                  | 25                | 3500.47                  | 2269.91                  | 5770.10       |
| 13382.17             | 11149.04                  | 25                | 3750.50                  | 2432.04                  | 6182.25       |
| 14274.34             | 11889.04                  | 25                | 4000.54                  | 2594.18                  | 6594.41       |

| CE( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )<br>Teórica | CE( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )<br>Experimental | Temperatura<br>$^{\circ}\text{C}$ | $\text{Cl}^-$<br>(ppm) | $\text{Na}^+$<br>(ppm) | $\text{NaCl}$<br>(ppm) |
|--|---|-----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 16058.61                                 | 13239.04                                      | 25                                | 4500.60                | 2918.45                | 7418.70                |
| 17842.91                                 | 14609.04                                      | 25                                | 5000.67                | 3242.73                | 8243.00                |
| 19646.02                                 | 16068.65                                      | 25                                | 5506.01                | 3570.42                | 9075.99                |

**Tabla II:** Variación de la conductividad eléctrica teórica y experimental con la concentración

Fuente: (Elaboración propia, 2019)

### Gráfico variación de la CE y la concentración de $\text{Cl}^-$



**Figura 3:** Variación de la CE Vs Concentración de  $\text{Cl}^-$

Fuente: (Elaboración propia, 2019)

Como se observa en el gráfico anterior la conductividad eléctrica aumenta al incrementar la concentración, además se observa una disminución en la CE experimental con respecto a la CE teórica y esto se debe a la mayor interacción entre los iones al aumentar la concentración ya que impiden que la corriente eléctrica circule con facilidad tal y como lo demuestra Kohlrausch. Con esta prueba descartamos la posibilidad de encontrar un punto máximo de concentración en el cual la conductividad decaiga.

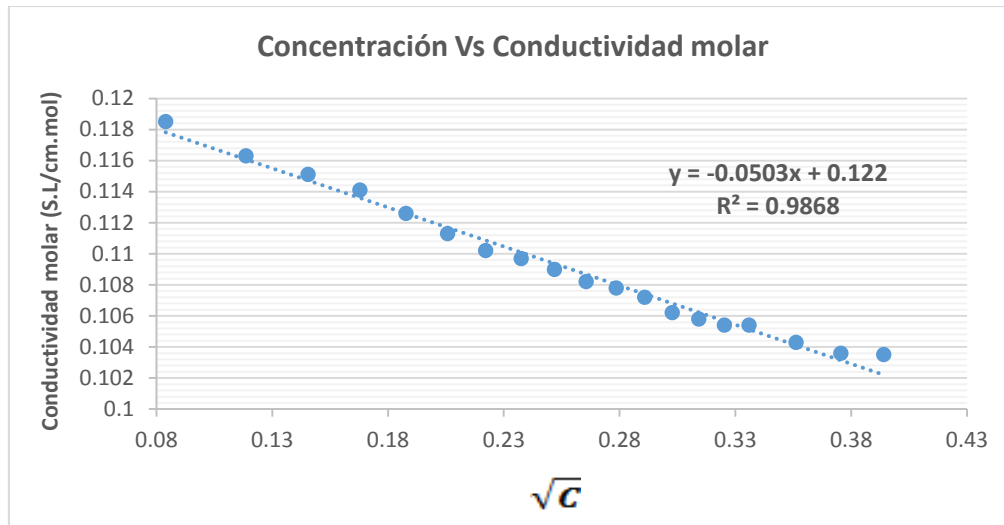
**Prueba preliminar: Variación de la conductividad molar con la concentración.**

| CE Experimental<br>( $\mu\text{S/cm}$ ) | Cl <sup>-</sup><br>(ppm) | Concentración<br>(M) | Conductividad<br>molar<br>(S.cm <sup>2</sup> /mol) | Conductividad<br>molar<br>(S.L/cm.mol) | $\sqrt{C}$ |
|---|--------------------------|----------------------|--|--|------------|
| 835.38                                  | 250.00                   | 0.007052             | 118.4669   | 0.1185                                 | 0.083974   |
| 1640.38                                 | 500.00                   | 0.014103             | 116.3128   | 0.1163                                 | 0.118757   |
| 2434.38                                 | 750.00                   | 0.021155             | 115.0748   | 0.1151                                 | 0.145447   |
| 3219.38                                 | 1000.00                  | 0.028206             | 114.1367   | 0.1141                                 | 0.167947   |
| 3969.38                                 | 1250.17                  | 0.035263             | 112.5658   | 0.1126                                 | 0.187784   |
| 4709.38                                 | 1500.20                  | 0.042315             | 111.2929   | 0.1113                                 | 0.205707   |
| 5439.38                                 | 1750.23                  | 0.049368             | 110.1811   | 0.1102                                 | 0.222188   |
| 6189.38                                 | 2000.27                  | 0.056420             | 109.7012   | 0.1097                                 | 0.237530   |
| 6919.38                                 | 2250.30                  | 0.063473             | 109.0134   | 0.1090                                 | 0.251938   |
| 7629.38                                 | 2500.34                  | 0.070525             | 108.1791   | 0.1082                                 | 0.265566   |
| 8359.38                                 | 2750.37                  | 0.077578             | 107.7546   | 0.1078                                 | 0.278528   |
| 9069.38                                 | 3000.40                  | 0.084630             | 107.1646   | 0.1072                                 | 0.290913   |
| 9739.04                                 | 3250.44                  | 0.091683             | 106.2251   | 0.1062                                 | 0.302792   |
| 10449.04                                | 3500.47                  | 0.098736             | 105.8286   | 0.1058                                 | 0.314222   |
| 11149.04                                | 3750.50                  | 0.105788             | 105.3905   | 0.1054                                 | 0.325251   |
| 11889.04                                | 4000.54                  | 0.112841             | 105.3613   | 0.1054                                 | 0.335918   |
| 13239.04                                | 4500.60                  | 0.126946             | 104.2891   | 0.1043                                 | 0.356294   |
| 14609.04                                | 5000.67                  | 0.141051             | 103.5730   | 0.1036                                 | 0.375567   |
| 16068.65                                | 5506.01                  | 0.155304             | 103.4655   | 0.1035                                 | 0.394087   |

**Tabla 12:** Variación de la conductividad molar con la raíz cuadrada de la concentración.

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

De la tabla 12 se obtiene el siguiente gráfico:



**Figura 4:** Variación de la conductividad molar con la raíz cuadrada de la concentración

Fuente: (Elaboración propia, 2019)

Con esta prueba se puede observar y explicar la variación que existe entre la conductividad experimental y la teórica (utilizando la conductividad molar a dilución infinita) y se puede observar que la conductividad molar disminuye con la raíz cuadrada de la concentración.

#### 6.4. Influencia de las variables intervinientes en la conductividad eléctrica

Existen variables que afectan directamente el resultado de la medición de la conductividad eléctrica, como la pureza de la muestra y la temperatura de medición. Se observó durante las pruebas preliminares que al no drenar adecuadamente los residuos o retenciones de las tuberías, la conductividad eléctrica variaba debido a las impurezas contenidas, óxidos o sales inorgánicas depositadas ya que ésta variable determina la cantidad de STD (sólidos totales disueltos). La temperatura afecta de igual manera a la conductividad eléctrica, ya que al incrementar la temperatura de una muestra aumenta la solubilidad del contenido de sales disueltas; por esta razón, la temperatura de la muestra problema debe ser lo más cercana a la temperatura de referencia del equipo (25 °C en nuestro caso) para evitar en lo posible errores en la medición.

## VII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 7.1. Registro, procesamiento y tratamiento de resultados

Para el tratamiento estadístico de los datos obtenidos se utilizó el software estadístico SPSS y Excel. La base de datos fue creada en SPSS a partir de la información obtenida con los instrumentos de recopilación de datos. Con este software se desarrollaron los cálculos y procedimientos de análisis requeridos, para luego ser exportados a Word.

### 7.2. Análisis estadístico pozo “X”

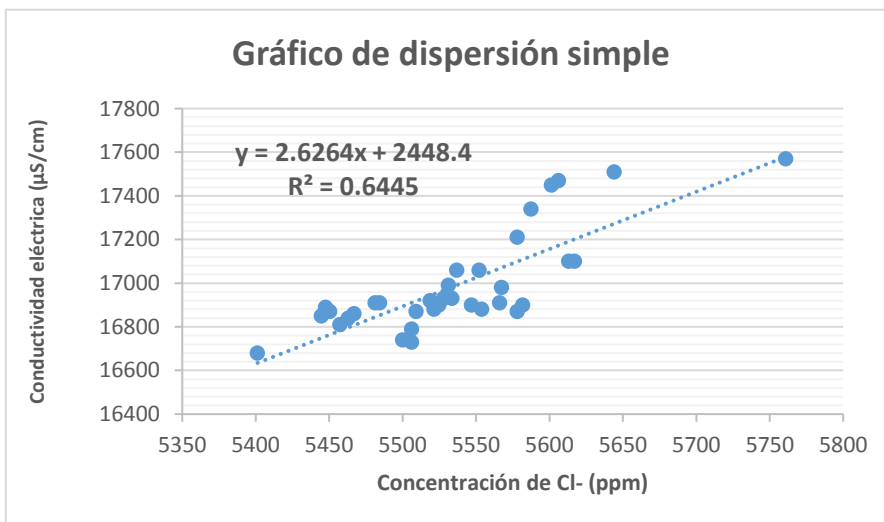
#### Reporte de resultados de análisis químico-físico 2018-2019 (pozo “X”)

| Punto    | Fecha      | Hora de Muestreo | Hora de análisis | Cl <sup>-</sup> (ppm) | pH   | CE $\mu$ S/cm | Temperatura °C |
|----------|------------|------------------|------------------|-----------------------|------|---------------|----------------|
| Pozo “X” | 04/11/2018 | 09:30            | 14:00            | 5578.13               | 7.73 | 17210         | 25             |
| Pozo “X” | 09/11/2018 | 10:20            | 14:00            | 5644.17               | 7.74 | 17510         | 25             |
| Pozo “X” | 12/11/2018 | 10:05            | 10:00            | 5587.35               | 7.72 | 17340         | 25             |
| Pozo “X” | 16/11/2018 | 09:45            | 14:00            | 5760.87               | 7.69 | 17570         | 25             |
| Pozo “X” | 19/11/2018 | 08:45            | 10:00            | 5606.06               | 7.73 | 17470         | 25             |
| Pozo “X” | 23/11/2018 | 09:15            | 14:00            | 5457.32               | 7.58 | 16810         | 25             |
| Pozo “X” | 03/12/2018 | 09:10            | 14:00            | 5484.38               | 7.69 | 16910         | 25             |
| Pozo “X” | 07/12/2018 | 11:30            | 14:00            | 5601.27               | 7.63 | 17450         | 25             |
| Pozo “X” | 10/12/2018 | 09:25            | 10:00            | 5466.87               | 7.67 | 16860         | 25             |
| Pozo “X” | 14/12/2018 | 11:00            | 14:00            | 5578.13               | 7.68 | 16870         | 25             |
| Pozo “X” | 17/12/2018 | 09:00            | 14:00            | 5566.04               | 7.76 | 16910         | 25             |
| Pozo “X” | 04/01/2019 | 10:10            | 14:00            | 5581.76               | 7.72 | 16900         | 25             |
| Pozo “X” | 07/01/2019 | 08:50            | 10:00            | 5524.69               | 7.68 | 16900         | 25             |
| Pozo “X” | 11/01/2019 | 11:05            | 14:00            | 5447.53               | 7.67 | 16890         | 25             |
| Pozo “X” | 14/01/2019 | 09:10            | 10:00            | 5444.79               | 7.71 | 16850         | 25             |
| Pozo “X” | 18/01/2019 | 09:45            | 14:00            | 5509.26               | 7.70 | 16870         | 25             |
| Pozo “X” | 21/01/2019 | 09:10            | 10:00            | 5521.47               | 7.74 | 16880         | 25             |
| Pozo “X” | 25/01/2019 | 08:55            | 10:00            | 5518.87               | 7.72 | 16920         | 25             |

| Punto    | Fecha      | Hora de Muestreo | Hora de análisis | Cl <sup>-</sup> (ppm) | pH   | CE $\mu\text{S/cm}$ | Temperatura $^{\circ}\text{C}$ |
|----------|------------|------------------|------------------|-----------------------|------|---------------------|--------------------------------|
| Pozo "X" | 28/01/2019 | 08:40            | 10:00            | 5450.31               | 7.77 | 16870               | 25                             |
| Pozo "X" | 01/02/2019 | 09:45            | 14:00            | 5481.37               | 7.68 | 16910               | 25                             |
| Pozo "X" | 04/02/2019 | 09:20            | 10:00            | 5527.95               | 7.68 | 16930               | 25                             |
| Pozo "X" | 08/02/2019 | 10:15            | 10:00            | 5536.81               | 7.61 | 17060               | 25                             |
| Pozo "X" | 11/02/2019 | 09:25            | 10:00            | 5567.48               | 7.71 | 16980               | 25                             |
| Pozo "X" | 14/02/2019 | 09:20            | 14:00            | 5553.80               | 7.72 | 16880               | 25                             |
| Pozo "X" | 18/02/2019 | 08:55            | 14:00            | 5617.09               | 7.73 | 17100               | 25                             |
| Pozo "X" | 25/02/2019 | 09:20            | 10:00            | 5500.00               | 7.70 | 16740               | 25                             |
| Pozo "X" | 01/03/2019 | 10:20            | 14:00            | 5462.96               | 7.67 | 16840               | 25                             |
| Pozo "X" | 05/03/2019 | 09:15            | 10:00            | 5533.54               | 7.79 | 16930               | 25                             |
| Pozo "X" | 08/03/2019 | 09:55            | 14:00            | 5546.88               | 7.66 | 16900               | 25                             |
| Pozo "X" | 11/03/2019 | 10:20            | 14:00            | 5613.21               | 7.82 | 17100               | 25                             |
| Pozo "X" | 15/03/2019 | 09:45            | 14:00            | 5552.15               | 7.74 | 17060               | 25                             |
| Pozo "X" | 18/03/2019 | 10:50            | 14:00            | 5531.25               | 7.75 | 16990               | 25                             |
| Pozo "X" | 22/03/2019 | 08:55            | 14:00            | 5506.13               | 7.68 | 16790               | 25                             |
| Pozo "X" | 29/03/2019 | 09:05            | 14:00            | 5506.13               | 7.66 | 16730               | 25                             |
| Pozo "X" | 01/04/2019 | 9:00             | 14:00            | 5401.23               | 7.75 | 16680               | 25                             |

**Tabla 13:** Resultados químico-físico del pozo "X"

Fuente: (Elaboración propia, 2019)



**Figura 5:** Gráfico de dispersión simple pozo "X"

Fuente: (Elaboración propia, 2019)



Se realizó un diagrama de dispersión para visualizar que tipo de relación existe entre la CE y la concentración del ion Cl<sup>-</sup> con el fin de seleccionar el mejor modelo que se adecue a los datos obtenidos y que mayor bondad de ajuste presente. Como se puede observar en el gráfico de dispersión de la figura 5, no es posible definir con certeza qué tipo de distribución siguen los datos.

### Resumen de modelo y estimaciones de parámetro

La variable independiente es Cl<sup>-</sup>.

Variable dependiente: CE

| Ecuación    | Resumen del modelo |        |     |     |      | Estimaciones de parámetro   |                |                |                |
|-------------|--------------------|--------|-----|-----|------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|
|             | R cuadrado         | F      | gl1 | gl2 | Sig. | Constante (B <sub>0</sub> ) | B <sub>1</sub> | B <sub>2</sub> | B <sub>3</sub> |
| Lineal      | .644               | 59.817 | 1   | 33  | .000 | 2448.449                    | 2.626          |                |                |
| Logarítmico | .642               | 59.271 | 1   | 33  | .000 | -108682.131                 | 14580.710      |                |                |
| Inverso     | .640               | 58.691 | 1   | 33  | .000 | 31605.743                   | -80909925.409  |                |                |
| Cuadrático  | .659               | 30.855 | 2   | 32  | .000 | 104422.698                  | -34.048        | .003           |                |
| Cúbico      | .658               | 30.819 | 2   | 32  | .000 | 69578.305                   | -15.480        | .000           | 1.951E-7       |
| Compuesto   | .645               | 59.965 | 1   | 33  | .000 | 7267.102                    | 1.000          |                |                |
| Exponencial | .645               | 59.965 | 1   | 33  | .000 | 7267.102                    | .000           |                |                |

**Tabla 14:** Resumen de modelo y estimaciones de parámetros pozo "X"

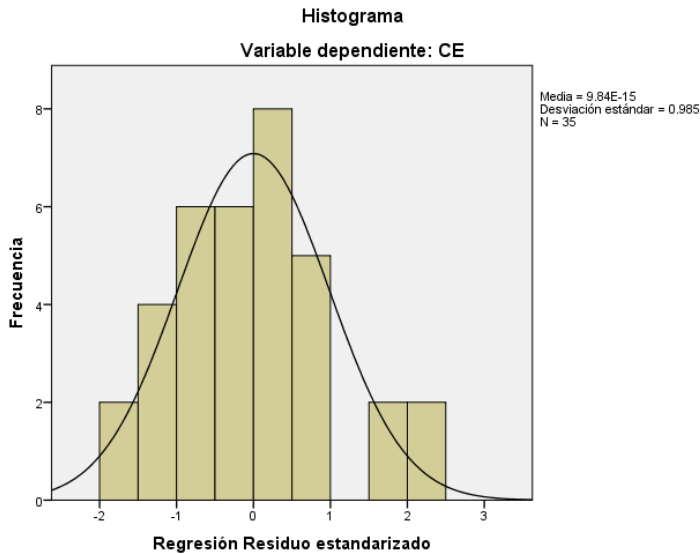
*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

Como se puede observar en la tabla 14, los valores del R cuadrado para cada uno de los modelos analizados son similares, por lo tanto no existe una diferencia significativa en cuanto a la eficacia de un modelo a otro.

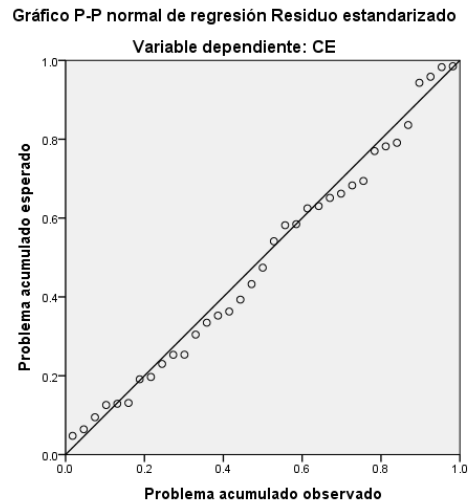
El modelo cúbico no se ha podido ajustar debido a una colinealidad próxima entre los términos del modelo; además los modelos cuadrático y cúbico no cumplen con el objetivo principal de dicha investigación. Los modelos que cumplen con los objetivos de la investigación son el modelo lineal, logarítmico, inverso, compuesto y exponencial.

Debido a que la variación del R cuadrado entre un modelo y otro es baja, seleccionaremos el modelo de regresión lineal simple para el diseño de nuestra herramienta matemática predictiva.

### 7.2.1. Prueba de Normalidad de los residuos



**Figura 6:** Histograma de distribución normal pozo “X”



**Figura 7:** Gráfico P-P normal regresión Residuo estandarizado pozo “X”

Como se puede observar en el histograma anterior, los residuos estandarizados se asemejan a la curva de distribución normal. En el gráfico P-P normal de regresión residuo estandarizado podemos observar que entre más se acerquen los puntos a la línea recta, más se asemejará a una distribución normal; sin embargo, hay ciertos puntos que se alejan un poco y no es posible gráficamente determinar con certeza la normalidad de los residuos, por esta razón hacemos uso de otras pruebas.

Para el supuesto de normalidad disponemos de dos pruebas, Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk. Se selecciona la prueba de Shapiro-Wilk ya que el tamaño de nuestra muestra es inferior a 50. Se procede entonces a realizar el análisis de prueba de normalidad planteándonos las siguientes hipótesis:

$$H_0: sig. > 0.05: \text{Los residuos siguen una distribución normal}$$

$$H_1: sig < 0.05: \text{Los residuos no siguen una distribución normal}$$

**Pruebas de normalidad**

|                       | Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup> |    |       | Shapiro-Wilk |    |      |
|-----------------------|---------------------------------|----|-------|--------------|----|------|
|                       | Estadístico                     | Gl | Sig.  | Estadístico  | Gl | Sig. |
| Standardized Residual | .075                            | 35 | .200* | .967         | 35 | .376 |

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

**Tabla 15: Prueba de normalidad pozo “X”**

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

Dado que el p-valor o sig. = 0.376 > 0.05, no podemos rechazar la hipótesis nula y podemos decir con un 95% de confianza que existe suficiente evidencia estadística para poder afirmar que los residuos siguen una distribución normal.

**7.2.2. Prueba de significancia del modelo seleccionado**

La tabla de ANOVA nos dirá si el modelo de regresión lineal simple es o no significativo.

$H_0: B_1 = 0$  (sig. > 0.05 El modelo seleccionado no es significativo)

$H_1: B_1 \neq 0$  (sig. < 0.05: El modelo seleccionado es significativo)

**ANOVA<sup>a</sup>**

| Modelo      | Suma de cuadrados | Gl | Media cuadrática | F      | Sig.              |
|-------------|-------------------|----|------------------|--------|-------------------|
| 1 Regresión | 1124172.269       | 1  | 1124172.269      | 59.817 | .000 <sup>b</sup> |
| Residuo     | 620182.017        | 33 | 18793.394        |        |                   |
| Total       | 1744354.286       | 34 |                  |        |                   |

a. Variable dependiente: CE

b. Predictores: (Constante), CI

**Tabla 16: ANOVA pozo “X”**

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

Se observa un valor de  $F=59.817$ , y dado que el p-valor o  $\text{sig.} = 0.000 < 0.05$ , existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, y afirmamos con un 95% de confianza que el modelo seleccionado es significativo.

La fórmula general del modelo de regresión lineal es:

$$Y = B_0 + B_1X$$

Dónde

Y= Variable dependiente

X= Variable independiente

$B_0$  y  $B_1$ = Parámetros. (No obstante se debe probar estadísticamente que los coeficientes  $B_0$  y  $B_1$  del modelo son significativos).

| Coeficientes <sup>a</sup> |                                |                |                             |       |      |                                     |                 |
|---------------------------|--------------------------------|----------------|-----------------------------|-------|------|-------------------------------------|-----------------|
| Modelo                    | Coeficientes no estandarizados |                | Coeficientes estandarizados | t     | Sig. | 95.0% intervalo de confianza para B |                 |
|                           | B                              | Error estándar | Beta                        |       |      | Límite inferior                     | Límite superior |
| 1 Constante ( $B_0$ )     | 2448.449                       | 1880.164       |                             | 1.302 | .202 | -1376.773                           | 6273.672        |
| CI ( $B_1$ )              | 2.626                          | .340           | .803                        | 7.734 | .000 | 1.936                               | 3.317           |

a. Variable dependiente: CE

**Tabla 17:** Coeficientes del modelo pozo "X"

Fuente: (Elaboración propia, 2019)

Realizamos el planteamiento de nuestras hipótesis para ambos coeficientes:

**Para  $B_0$**

$H_0: B_0 = 0$  (sig. > 0.05  $B_0$  no es significativo)

$H_1: B_0 \neq 0$  (sig. < 0.05  $B_0$  es significativo)

Dado que el p-valor o sig.=0.202 > 0.05, podemos afirmar con un 95% de confianza que existe suficiente evidencia estadística para aceptar la hipótesis nula, y afirmamos que  $B_0$  no es significativo.

**Para  $B_1$**

$$H_0: B_1 = 0 \text{ (sig.} > 0.05: B_1 \text{ no es significativo)}$$

$$H_1: B_1 \neq 0 \text{ (sig.} < 0.05: B_1 \text{ es significativo)}$$

Dado que el p-valor o sig.=0.000 < 0.05, entonces podemos afirmar con un 95% de confianza existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, y afirmamos que  $B_1$  es significativo.

**7.2.3. Bondad de ajuste del modelo**

**Resumen del modelo<sup>b</sup>**

| Modelo | R                 | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación | Durbin-Watson |
|--------|-------------------|------------|---------------------|---------------------------------|---------------|
| 1      | .803 <sup>a</sup> | .644       | .634                | 137.089                         | 1.184         |

- a. Predictores: (Constante), CI<sup>-</sup>
- b. Variable dependiente: CE

**Tabla 18:** Resumen del modelo, bondad de ajuste pozo “X”

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

El modelo de regresión lineal simple explica el 64.40% del cambio de la variable dependiente (conductividad eléctrica), mientras que el 35.60% es explicada por otros factores.

Se procede a realizar un análisis de estadísticos descriptivos para ambas variables para tener un panorama más amplio de ellas.

### Estadísticos descriptivos

|                            |          | Cl <sup>-</sup>      | CE                 |
|----------------------------|----------|----------------------|--------------------|
| N                          | Válido   | 35                   | 35                 |
|                            | Perdidos | 0                    | 0                  |
| Media                      |          | 5536.2071            | 16988.86           |
| Error estándar de la media |          | 11.70250             | 38.286             |
| Mediana                    |          | 5531.2500            | 16910.00           |
| Moda                       |          | 5506.13 <sup>a</sup> | 16870 <sup>a</sup> |
| Desviación estándar        |          | 69.23293             | 226.505            |
| Varianza                   |          | 4793.199             | 51304.538          |
| Rango                      |          | 359.64               | 890                |
| Mínimo                     |          | 5401.23              | 16680              |
| Máximo                     |          | 5760.87              | 17570              |
| Percentiles                | 50       | 5531.2500            | 16910.00           |
| CV                         |          | 1.25 %               | 1.33 %             |

a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.

**Tabla 19:** Estadísticos descriptivos pozo “X”

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

De la tabla 19 se deduce que la conductividad eléctrica promedio del pozo “X” fue de 16988.86  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con una desviación estándar de 226.505  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La conductividad eléctrica más frecuente fue 16870  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Entre la máxima y mínima conductividad eléctrica alcanzada hay una diferencia de 890  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El 50% de la CE tuvo un valor de 16910  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El valor del coeficiente de variación para la CE y la concentración del ion  $\text{Cl}^-$  es de 1.33 % y 1.25 % respectivamente, lo que indica que posee poca variabilidad y es altamente representativa (Anexo 6).

#### **7.2.4. Supuestos para la correcta aplicación del modelo seleccionado**

Para garantizar la correcta aplicación del modelo de regresión lineal simple los residuos deben cumplir los siguientes supuestos: linealidad, normalidad, independencia de errores y homocedasticidad.

##### **1- Prueba de normalidad**

Anteriormente se realizó esta prueba para visualizar si las variables y residuos siguen o no una distribución normal (tabla 15).

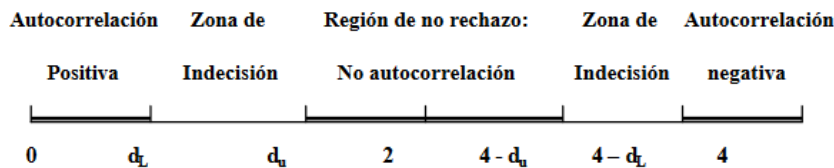
## 2- Prueba de linealidad

Como se observa en la tabla 18 el coeficiente de correlación de Pearson tiene un valor de 0.803, lo que nos indica que existe una correlación lineal muy alta en base al anexo 1.

## 3- Prueba de independencia de los residuos

Para el contraste de esta hipótesis se utiliza la prueba de Durbin-Watson para determinar la existencia de autocorrelación ya que estamos hablando del mismo punto, en nuestro caso del mismo pozo.

Gráficamente se pueden señalar las regiones del contraste en el siguiente segmento:



Esto es,

$0 < d < d_L$  se rechaza  $H_0$ , existe entonces autocorrelación positiva con un esquema AR(1)

$4 - d_L < d < 4$  se rechaza  $H_0$ , existe autocorrelación negativa con un esquema AR(1)

$d_u < d < 4 - d_u$  no se rechaza  $H_0$ , no existe autocorrelación

$d_L < d < d_u$  el contraste no es concluyente

$4 - d_u < d < 4 - d_L$  el contraste no es concluyente

Procedemos a plantear las hipótesis:

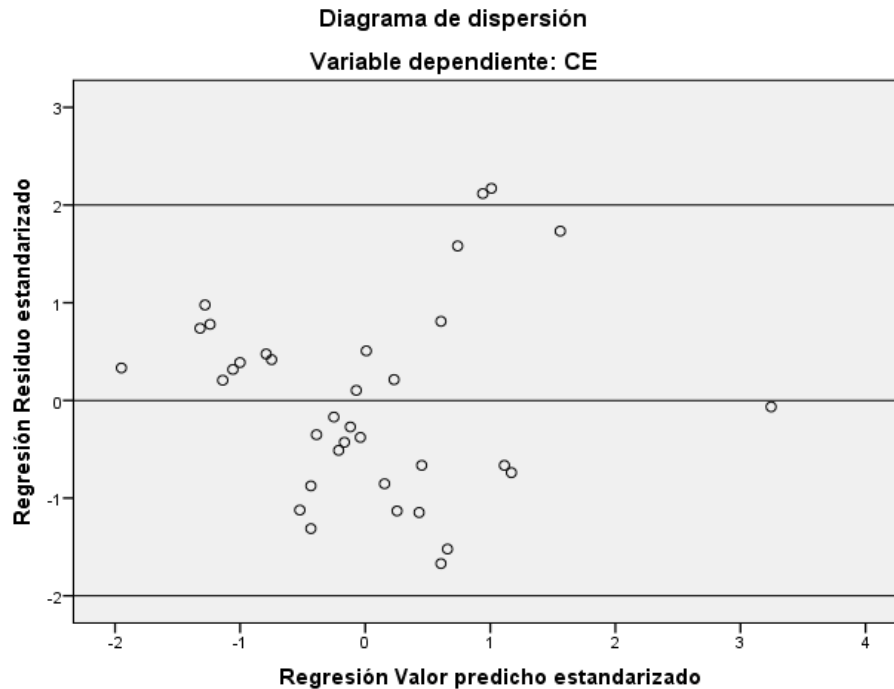
$H_0: d_u < d < (4 - d_u)$ : No existe autocorrelación entre los residuos

$H_1: 0 < d < d_L \text{ ó } (4 - d_L) < d < 4$ : Existe autocorrelación entre los residuos

Buscamos en la tabla del anexo 9 los valores de  $d_L$  y  $d_u$  y obtenemos que para un valor de  $N=35$  con una variable explicativa  $k=1$  (una variable independiente),  $d_L=1.402$  y  $d_u=1.519$ . En la tabla 18, podemos observar que el DW para el pozo "X" tiene un valor de 1.184; no se cumple la

hipótesis nula ( $1.519 < 1.184 < 2.481$ ). Aceptamos la hipótesis alternativa y decimos con un 95% de confianza que existe autocorrelación entre los residuos es decir no hay independencia.

#### 4- Prueba de Homocedasticidad



*Figura 8: Diagrama de dispersión prueba de homocedasticidad pozo “X”*

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

Se puede observar en la figura 8 que casi todos los puntos se distribuyen aproximadamente entre 2 y -2 de manera aleatoria sin seguir un patrón definido como lo es una línea recta, una parábola, una hipérbola o una función polinomial; por esta razón no se puede rechazar el supuesto de Homocedasticidad es decir igualdad de varianzas.

Se puede observar que existen 2 puntos muy cercanos que se salen ligeramente del rango (2 y -2) que se consideran puntos atípicos. Gráficamente no es posible completamente decidir si se cumple dicho supuesto, por esta razón acudiremos a pruebas numéricas.



|                                | Prueba de Levene de igualdad de varianzas |      |
|--------------------------------|---|------|
|                                | F   | Sig. |
| Standardized Residual          | 2.082                                     | .158 |
| Se asumen varianzas iguales    |   |      |
| No se asumen varianzas iguales |   |      |

**Tabla 20:** Prueba de Levene homocedasticidad pozo "X"

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

La prueba de Levene para la igualdad de varianzas nos indica si podemos o no suponer varianzas iguales. Procedemos a plantear las hipótesis:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 \text{ (sig.} > 0.05 \text{ Las varianzas en ambos grupos son iguales)}$$

$$H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \text{ (sig.} < 0.05: \text{ Las varianzas en ambos grupos son diferentes)}$$

Se observa un valor de  $F=2.082$ , y dado que el p-valor o sig.=  $0.158 > 0.05$ , existe suficiente evidencia estadística para aceptar la hipótesis nula, y afirmamos con un 95% de confianza que las varianzas en ambos grupos son iguales, es decir, existe homocedasticidad.

### 7.2.5. Correlaciones

$$H_0: R = 0 \text{ (sig.} > 0.05 \text{ No existe correlación significativa entre las variables)}$$

$$H_1: R \neq 0 \text{ (sig.} < 0.05 \text{ Existe correlación significativa entre las variables)}$$

### Correlaciones

|    |                        | CI     | CE     |
|----|------------------------|--------|--------|
| CI | Correlación de Pearson | 1      | .803** |
|    | Sig. (bilateral)       |        | .000   |
|    | N                      | 35     | 35     |
| CE | Correlación de Pearson | .803** | 1      |
|    | Sig. (bilateral)       | .000   |        |
|    | N                      | 35     | 35     |

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

**Tabla 21:** Correlaciones bivariadas del pozo “X”

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

Se realizó una correlación bivariada (ambas colas) utilizando como prueba de hipótesis el R de Pearson ya que se trata de variables que siguen una distribución normal y una tendencia lineal. Como se puede observar en la tabla 21 el nivel de significancia para ambas variables es significativo.

Dado que el p-valor o sig. =0.000<0.05, podemos afirmar con un 99% de confianza que existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, y afirmamos que existe una correlación entre las variables.

#### **7.2.6. Diseño del modelo del pozo “X”**

Debido a que se viola el supuesto de independencia de los residuos y el coeficiente  $B_0$  no es significativo, no es posible establecer y diseñar la herramienta matemática predictiva ya que se cometería un grave error y el modelo no sería eficiente, por esta razón no se desarrollan los cálculos correspondientes al % del error entre un modelo y otro.

### 7.3. Análisis estadístico pozo “Y”

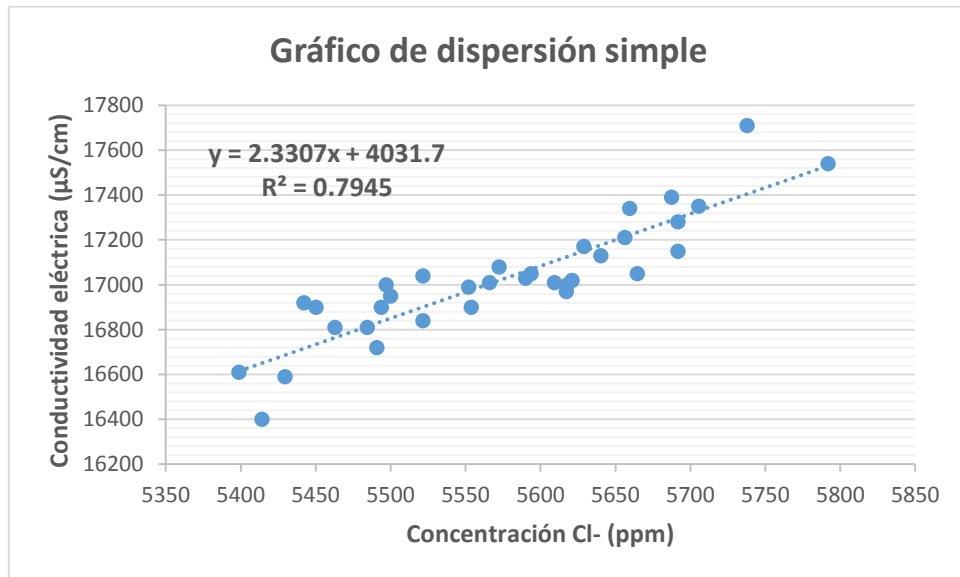
#### Reporte de resultados de análisis químico-físico 2018-20198 pozo “Y”)

| Punto    | Fecha      | Hora de muestreo | Hora de análisis | Cl <sup>-</sup> (ppm) | pH   | CE $\mu$ S/cm | Temperatura °C |
|----------|------------|------------------|------------------|-----------------------|------|---------------|----------------|
| Pozo “Y” | 04/11/2018 | 09:35            | 14:20            | 5687.50               | 7.56 | 17390         | 25             |
| Pozo “Y” | 09/11/2018 | 10:15            | 14:20            | 5659.51               | 7.58 | 17340         | 25             |
| Pozo “Y” | 12/11/2018 | 10:00            | 10:20            | 5737.95               | 7.64 | 17710         | 25             |
| Pozo “Y” | 16/11/2018 | 09:40            | 14:20            | 5791.93               | 7.58 | 17540         | 25             |
| Pozo “Y” | 26/11/2018 | 09:00            | 10:20            | 5496.99               | 7.53 | 17000         | 25             |
| Pozo “Y” | 03/12/2018 | 09:00            | 14:20            | 5656.25               | 7.54 | 17210         | 25             |
| Pozo “Y” | 10/12/2018 | 09:15            | 10:20            | 5572.29               | 7.55 | 17080         | 25             |
| Pozo “Y” | 14/12/2018 | 11:05            | 14:20            | 5484.38               | 7.51 | 16810         | 25             |
| Pozo “Y” | 17/12/2018 | 08:50            | 14:20            | 5628.93               | 7.51 | 17170         | 25             |
| Pozo “Y” | 04/01/2019 | 10:00            | 14:20            | 5691.82               | 7.57 | 17280         | 25             |
| Pozo “Y” | 07/01/2019 | 08:40            | 10:20            | 5617.28               | 7.59 | 16970         | 25             |
| Pozo “Y” | 11/01/2019 | 11:00            | 14:20            | 5462.96               | 7.49 | 16810         | 25             |
| Pozo “Y” | 14/01/2019 | 09:00            | 10:20            | 5398.77               | 7.45 | 16610         | 25             |
| Pozo “Y” | 18/01/2019 | 09:50            | 14:20            | 5493.83               | 7.50 | 16900         | 25             |
| Pozo “Y” | 21/01/2019 | 09:05            | 14:20            | 5521.47               | 7.59 | 17040         | 25             |
| Pozo “Y” | 25/01/2019 | 08:50            | 10:20            | 5566.04               | 7.55 | 17010         | 25             |
| Pozo “Y” | 28/01/2019 | 08:30            | 10:20            | 5590.06               | 7.61 | 17030         | 25             |
| Pozo “Y” | 01/02/2019 | 09:40            | 14:20            | 5450.31               | 7.53 | 16900         | 25             |
| Pozo “Y” | 04/02/2019 | 09:15            | 10:20            | 5621.12               | 7.57 | 17020         | 25             |
| Pozo “Y” | 08/02/2019 | 10:10            | 10:20            | 5521.47               | 7.50 | 16840         | 25             |
| Pozo “Y” | 11/02/2019 | 09:15            | 10:20            | 5552.15               | 7.54 | 16990         | 25             |
| Pozo “Y” | 14/02/2019 | 09:15            | 14:20            | 5553.8                | 7.33 | 16900         | 25             |
| Pozo “Y” | 18/02/2019 | 08:50            | 14:20            | 5664.56               | 7.35 | 17050         | 25             |
| Pozo “Y” | 21/02/2019 | 10:45            | 14:20            | 5442.07               | 7.57 | 16920         | 25             |
| Pozo “Y” | 25/02/2019 | 09:15            | 10:20            | 5500.00               | 7.58 | 16950         | 25             |
| Pozo “Y” | 01/03/2019 | 10:45            | 14:20            | 5617.96               | 7.57 | 17000         | 25             |
| Pozo “Y” | 05/03/2019 | 09:00            | 10:20            | 5640.24               | 7.66 | 17130         | 25             |
| Pozo “Y” | 07/03/2019 | 09:50            | 14:20            | 5593.75               | 7.59 | 17050         | 25             |

| Punto    | Fecha      | Hora de muestreo | Hora de análisis | Cl <sup>-</sup> (ppm) | pH   | CE μS/cm | Temperatura °C |
|----------|------------|------------------|------------------|-----------------------|------|----------|----------------|
| Pozo "Y" | 11/03/2019 | 10:30            | 14:20            | 5691.82               | 7.67 | 17150    | 25             |
| Pozo "Y" | 15/03/2019 | 09:40            | 14:20            | 5705.52               | 7.57 | 17350    | 25             |
| Pozo "Y" | 18/03/2019 | 10:45            | 14:20            | 5609.38               | 7.66 | 17010    | 25             |
| Pozo "Y" | 22/03/2019 | 08:50            | 14:20            | 5429.45               | 7.43 | 16590    | 25             |
| Pozo "Y" | 25/03/2019 | 09:15            | 14:20            | 5414.11               | 7.46 | 16400    | 25             |
| Pozo "Y" | 29/03/2019 | 09:00            | 14:20            | 5490.80               | 7.48 | 16720    | 25             |

**Tabla 22:** Resultados químico-físico del pozo "Y"

Fuente: (Elaboración propia, 2019)



**Figura 9:** Diagrama de dispersión pozo "Y"

Fuente: (Elaboración propia, 2019)

Se realizó un diagrama de dispersión para visualizar que tipo de relación existe entre la CE y la concentración del ion Cl<sup>-</sup> con el fin de seleccionar el mejor modelo que se adecue a los datos obtenidos y que mayor bondad de ajuste presente. Como se puede observar en el gráfico de dispersión de la figura 9, no es posible definir con certeza qué tipo de distribución siguen los datos.

### Resumen de modelo y estimaciones de parámetro

Variable dependiente: CE

La variable independiente es CI'

| Ecuación    | Resumen del modelo |         |     |     |      | Estimaciones de parámetro   |                |                |                |
|-------------|--------------------|---------|-----|-----|------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|
|             | R cuadrado         | F       | gl1 | gl2 | Sig. | Constante (B <sub>0</sub> ) | B <sub>1</sub> | B <sub>2</sub> | B <sub>3</sub> |
| Lineal      | .795               | 123.740 | 1   | 32  | .000 | 4031.725                    | 2.331          |                |                |
| Logarítmico | .793               | 122.918 | 1   | 32  | .000 | -95019.906                  | 12989.389      |                |                |
| Inverso     | .792               | 122.026 | 1   | 32  | .000 | 30009.631                   | -72365832.870  |                |                |
| Cuadrático  | .796               | 124.488 | 1   | 32  | .000 | 10526.876                   | .000           | .000           |                |
| Cúbico      | .798               | 61.423  | 2   | 31  | .000 | 36138.942                   | -6.306         | .000           | 9.248E-8       |
| Compuesto   | .795               | 123.966 | 1   | 32  | .000 | 7943.421                    | 1.000          |                |                |
| Exponencial | .795               | 123.966 | 1   | 32  | .000 | 7943.421                    | .000           |                |                |

**Tabla 23:** Resumen del modelo y estimación de parámetros del pozo “Y”

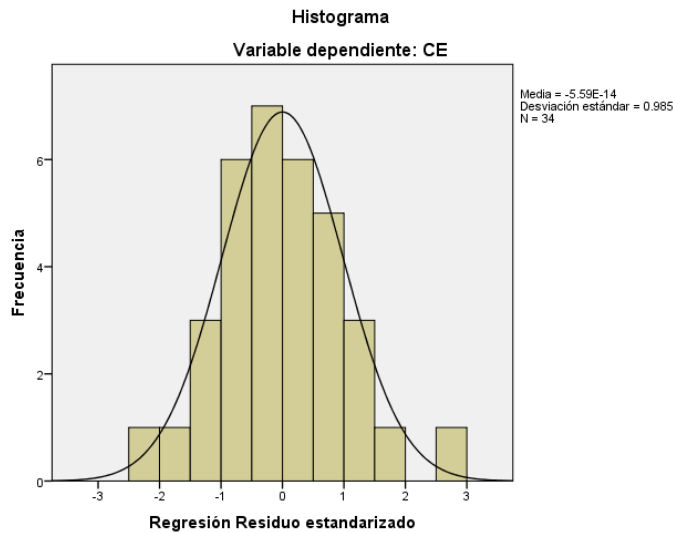
*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

Como se puede observar en la tabla 23, los valores del R cuadrado para cada uno de los modelos analizados son similares, por lo tanto no existe una diferencia significativa en cuanto a la eficacia de un modelo a otro.

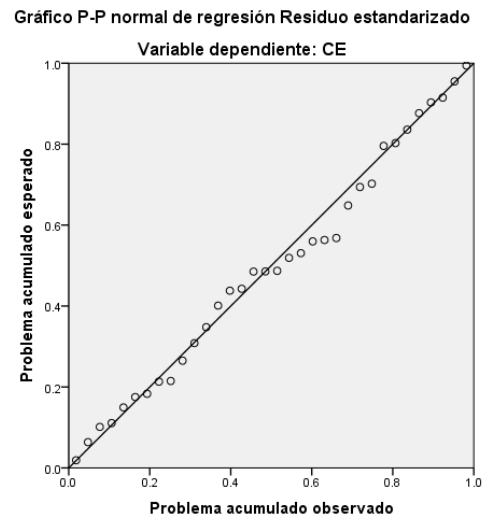
Los modelos cúbico y cuadrático no se han podido ajustar debido a una colinealidad próxima entre los términos del modelo. Los modelos cuadrático y cúbico no cumplen con el objetivo principal de dicha investigación; los modelos que cumplen con los objetivos de la investigación son el modelo lineal, logarítmico, inverso, compuesto y exponencial.

Debido a que la variación del R cuadrado entre un modelo y otro es baja, seleccionaremos el modelo de regresión lineal simple para el diseño de nuestra herramienta matemática predictiva.

### 7.3.1. Prueba de Normalidad de los residuos.



**Figura 10:** Histograma de distribución normal pozo “Y”



**Figura 11:** Gráfico P-P normal regresión Residuo estandarizado pozo “Y”

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

Como se puede observar en el histograma anterior, los residuos estandarizados se asemejan a la curva de distribución normal. En el gráfico P-P normal de regresión residuo estandarizado podemos observar que entre más se acerquen los puntos a la línea recta, más se asemejará a una distribución normal; sin embargo, hay ciertos puntos que se alejan un poco y no es posible gráficamente determinar con certeza la normalidad de los residuos, por esta razón hacemos uso de otras pruebas.

Para el supuesto de normalidad disponemos de dos pruebas, Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk. Se selecciona la prueba de Shapiro-Wilk ya que el tamaño de nuestra muestra es inferior a 50.

Se procede entonces a realizar el análisis de prueba de normalidad planteándonos las siguientes hipótesis:

$H_0$ : sig. > 0.05: Los residuos siguen una distribución normal

$H_1$ : sig < 0.05: Los residuos no siguen una distribución normal

### Pruebas de normalidad

|                       | Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup> |    |       | Shapiro-Wilk |    |      |
|-----------------------|---------------------------------|----|-------|--------------|----|------|
|                       | Estadístico                     | Gl | Sig.  | Estadístico  | Gl | Sig. |
| Standardized Residual | .107                            | 34 | .200* | .989         | 34 | .977 |

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

**Tabla 24:** Prueba de normalidad pozo “Y”

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

Dado que el p-valor o sig. = 0.977 > 0.05, no podemos rechazar la hipótesis nula y podemos decir con 95% de confianza que existe suficiente evidencia estadística para poder afirmar que los residuos siguen una distribución normal.

### 7.3.2. Prueba de significancia del modelo seleccionado.

La tabla de ANOVA nos dirá si el modelo de regresión lineal simple es o no significativo.

$H_0: B_1 = 0$  (sig. > 0.05 El modelo seleccionado no es significativo)

$H_1: B_1 \neq 0$  (sig. < 0.05: El modelo seleccionado es significativo)

### ANOVA<sup>a</sup>

| Modelo      | Suma de cuadrados | Gl | Media cuadrática | F       | Sig.              |
|-------------|-------------------|----|------------------|---------|-------------------|
| 1 Regresión | 1799798.921       | 1  | 1799798.921      | 123.740 | .000 <sup>b</sup> |
| Residuo     | 465439.315        | 32 | 14544.979        |         |                   |
| Total       | 2265238.235       | 33 |                  |         |                   |

a. Variable dependiente: CE

b. Predictores: (Constante), CI

**Tabla 25:** ANOVA pozo “Y”

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

Se observa un valor de  $F=123.740$ , y dado que el p-valor o sig.=  $0.000 < 0.05$ , existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, y afirmamos con un 95% de confianza que el modelo seleccionado es significativo.

| Coeficientes <sup>a</sup> |                                |                |                             |        |      |                                     |                 |
|---------------------------|--------------------------------|----------------|-----------------------------|--------|------|-------------------------------------|-----------------|
| Modelo                    | Coeficientes no estandarizados |                | Coeficientes estandarizados | t      | Sig. | 95.0% intervalo de confianza para B |                 |
|                           | B                              | Error estándar | Beta                        |        |      | Límite inferior                     | Límite superior |
| 1 Constante ( $B_0$ )     | 4031.725                       | 1168.291       |                             | 3.451  | .002 | 1651.995                            | 6411.455        |
| Cl ( $B_1$ )              | 2.331                          | .210           | .891                        | 11.124 | .000 | 1.904                               | 2.757           |

a. Variable dependiente: CE

**Tabla 26:** Coeficientes del pozo “Y”

Fuente: (Elaboración propia, 2019)

Realizamos el planteamiento de nuestras hipótesis para ambos coeficientes:

**Para  $B_0$**

$$H_0: B_0 = 0 \text{ (sig.} > 0.05 \text{ } B_0 \text{ no es significativo)}$$

$$H_1: B_0 \neq 0 \text{ (sig.} < 0.05 \text{ } B_0 \text{ es significativo)}$$

Dado que el p-valor o sig.= $0.002 < 0.05$ , podemos afirmar con un 95% de confianza que existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, y afirmamos que  $B_0$  es significativo.

**Para  $B_1$**

$$H_0: B_1 = 0 \text{ (sig.} > 0.05: B_1 \text{ no es significativo)}$$

$$H_1: B_1 \neq 0 \text{ (sig.} < 0.05: B_1 \text{ es significativo)}$$



Dado que el p-valor o sig.=0.000 < 0.05, podemos afirmar con un 95% de confianza que existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, y afirmamos que B<sub>1</sub> es significativo.

### 7.3.3. Bondad de ajuste del modelo

**Resumen del modelo<sup>b</sup>**

| Modelo | R                 | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación | Durbin-Watson |
|--------|-------------------|------------|---------------------|---------------------------------|---------------|
| 1      | .891 <sup>a</sup> | .795       | .788                | 120.603                         | 1.586         |

a. Predictores: (Constante), Cl<sup>-</sup>

b. Variable dependiente: CE

**Tabla 27: Resumen del modelo y bondad de ajuste del pozo “Y”**

*Fuente: (Elaboración personal, 2019)*

El modelo de regresión lineal simple explica el 79.50% del cambio de la variable dependiente (conductividad eléctrica), mientras que el 20.50% es explicada por otros factores.

**Estadísticos descriptivos**

|                            |          | Cl <sup>-</sup>      | CE        |
|----------------------------|----------|----------------------|-----------|
| N                          | Válido   | 34                   | 34        |
|                            | Perdidos | 0                    | 0         |
| Media                      |          | 5575.1903            | 17025.59  |
| Error estándar de la media |          | 17.18450             | 44.932    |
| Mediana                    |          | 5581.1750            | 17010.00  |
| Moda                       |          | 5521.47 <sup>a</sup> | 16900     |
| Desviación estándar        |          | 100.20201            | 261.999   |
| Varianza                   |          | 10040.443            | 68643.583 |
| Rango                      |          | 393.16               | 1310      |
| Mínimo                     |          | 5398.77              | 16400     |
| Máximo                     |          | 5791.93              | 17710     |
| Percentiles                | 50       | 5581.1750            | 17010.00  |
| CV                         |          | 1.80 %               | 1.54%     |

**Tabla 28: Estadísticos descriptivos pozo “Y”**

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

De la tabla 28 se deduce que la conductividad eléctrica promedio del pozo “Y” fue de 17025.59  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con una desviación estándar de 261.999  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La conductividad eléctrica más frecuente fue 16900  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Entre la máxima y mínima conductividad eléctrica alcanzada hay una diferencia de 1310  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El 50% de la CE tuvo un valor de 17010  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El valor del coeficiente de variación para la CE y la concentración del ion  $\text{Cl}^-$  es de 1.54 % y 1.80 % respectivamente, lo que indica que posee poca variabilidad y es altamente representativa (Anexo 6).

#### **7.3.4. Supuestos para la correcta aplicación del modelo seleccionado**

Para garantizar la correcta aplicación del modelo de regresión lineal simple los residuos deben cumplir los siguientes supuestos: linealidad, normalidad, independencia de errores y homocedasticidad.

##### **1- Prueba de normalidad**

Anteriormente se realizó esta prueba para visualizar si las variables siguen o no una distribución normal (tabla 24).

##### **2- Prueba de linealidad**

Como se observan en la tabla 27 el coeficiente de correlación de Pearson tiene un valor de 0.891, lo que nos indica que existe una correlación lineal muy alta en base al anexo 1.

##### **3- Prueba de independencia de los residuos**

Para el contraste de esta hipótesis se utiliza la prueba de Durbin-Watson ya que estamos hablando del mismo punto, en nuestro caso del mismo pozo.

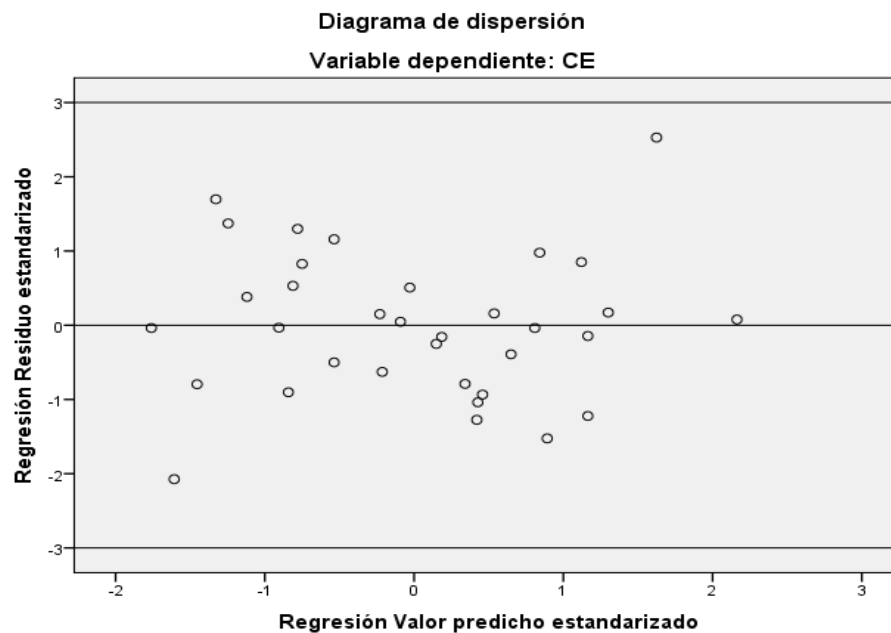
Procedemos a plantear las hipótesis:

$H_0: d_u < d < (4 - d_u)$ : No existe autocorrelación entre los residuos

$H_1: 0 < d < d_L \text{ ó } (4 - d_L) < d < 4$  : Existe autocorrelación entre los residuos

Buscamos en la tabla del anexo 9 los valores de  $d_L$  y  $d_u$  y obtenemos que para un valor de  $N=34$  con una variable explicativa ( $k=1$ )  $d_L=1.393$ , y  $d_u= 1.514$ . En la tabla 27, podemos observar que el DW para el pozo “Y” tiene un valor de 1.586, se cumple la hipótesis nula ( $1.514 < 1.586 < 2.486$ ). Aceptamos la hipótesis nula y decimos con un 95% de confianza que no existe autocorrelación entre los residuos es decir hay independencia.

#### 4- Prueba de Homocedasticidad



**Figura 12:** Diagrama de dispersión prueba de homocedasticidad pozo “Y”

*Fuente: (Elaboración personal, 2019)*

Se puede observar en la figura 12 que casi todos los puntos se distribuyen aproximadamente entre 2 y -2 de manera aleatoria sin seguir un patrón definido como lo es una línea recta, una parábola, una hipérbola o una función polinomial; por esta razón no se puede rechazar el supuesto de Homocedasticidad es decir igualdad de varianzas. Se puede observar que existen 2 puntos que se salen ligeramente del rango (2 y -2) que se consideran puntos atípicos. Gráficamente no es posible completamente decidir si se cumple dicho supuesto, por esta razón acudiremos a pruebas numéricas.

La prueba de Levene para la igualdad de varianzas nos indica si podemos o no suponer varianzas iguales. Procedemos a plantear las hipótesis:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 \text{ (sig. > 0.05 Las varianzas en ambos grupos son iguales)}$$

$$H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \text{ (sig < 0.05: Las varianzas en ambos grupos son diferentes)}$$

|                       |                                | Prueba de Levene de igualdad de varianzas |      |
|-----------------------|--------------------------------|---|------|
|                       |                                | F   | Sig. |
| Standardized Residual | Se asumen varianzas iguales    | .712                                      | .405 |
|                       | No se asumen varianzas iguales |   |      |

**Tabla 29:** Prueba de Levene homocedasticidad pozo “Y”

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

Se observa un valor de  $F=0.712$ , y dado que el p-valor o sig.=  $0.405 > 0.05$ , existe suficiente evidencia estadística para aceptar la hipótesis nula, y afirmamos con un 95% de confianza que las varianzas en ambos grupos son iguales, es decir, existe homocedasticidad

### 7.3.5. Diseño del modelo del pozo “Y”

$$Y = B_0 + B_1X$$

$$Y = 4031.725 + 2.331X$$

$$CE = 4031.725 + 2.331Cl^-$$

En nuestro caso debemos despejar  $Cl^-$  ya que nuestro objetivo es calcular la concentración del ion cloruro a partir de la CE.

$$Cl^- = \frac{CE - 4031.725}{2.331}$$

### 7.3.6. Condiciones

El modelo será aplicable bajo las siguientes condiciones:

- 1- Cuando la conductividad eléctrica se encuentre dentro del rango de 16400 – 17710  $\mu\text{S/cm}$ .
- 2- Cuando el pH de la muestra se encuentre entre 7.33 – 7.67.
- 3- La medición de la conductividad eléctrica se realice a 25 °C o lo más cercano a esta temperatura; de preferencia que el equipo cuente con ATC.
- 4- Que se drene la tubería por un tiempo mínimo de 1 minuto.

### 7.3.7. Correlaciones

$H_0: R = 0$  (sig. > 0.05 No existe correlación significativa entre las variables)

$H_1: R \neq 0$  (sig. < 0.05 Existe correlación significativa entre las variables)

|                 |                        | Cl <sup>-</sup> | CE     |
|-----------------|------------------------|-----------------|--------|
| Cl <sup>-</sup> | Correlación de Pearson | 1               | .891** |
|                 | Sig. (bilateral)       |                 | .000   |
|                 | N                      | 34              | 34     |
| CE              | Correlación de Pearson | .891**          | 1      |
|                 | Sig. (bilateral)       | .000            |        |
|                 | N                      | 34              | 34     |

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

**Tabla 30:** Correlaciones bivariadas pozo “Y”

Fuente: (Elaboración propia, 2019)

Se realizó una correlación bivariada (ambas colas) utilizando como prueba de hipótesis el R de Pearson ya que se trata de variables que siguen una distribución normal y una tendencia lineal.

Como se puede observar en la tabla 30 el nivel de significancia para ambas variables es significativo.

Dado que el p-valor o sig. =0.000<0.05, podemos afirmar con un 99% de confianza que existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, y afirmamos que existe una correlación entre las variables.

#### **7.4. Análisis estadístico pozo “Z”**

##### **Reporte de resultados de análisis químico-físico 2018-2019 (pozo “Z”)**

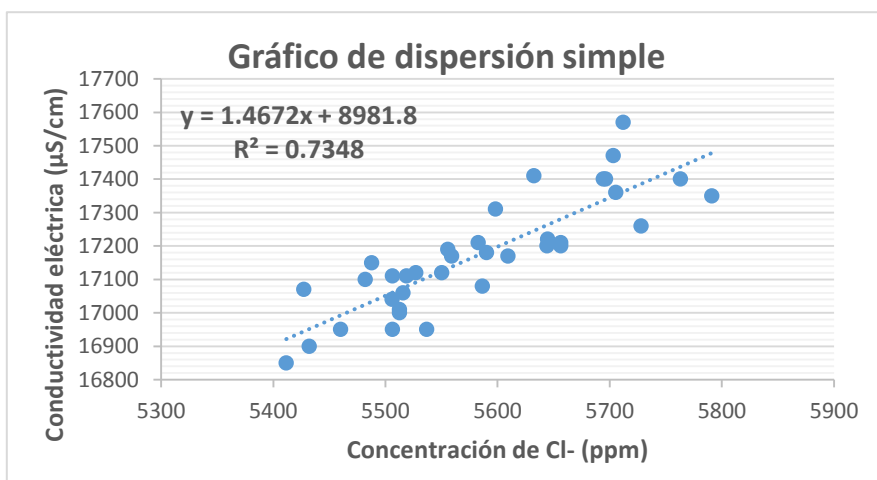
| <b>Punto</b> | <b>Fecha</b> | <b>Hora de Muestreo</b> | <b>Hora de Análisis</b> | <b>Cl<sup>-</sup> (ppm)</b> | <b>pH</b> | <b>CE μS/cm</b> | <b>Temperatura °C</b> |
|--------------|--------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------|-----------------|-----------------------|
| Pozo “Z”     | 04/11/2018   | 09:40                   | 14:40                   | 5703.13                     | 7.57      | 17470           | 25                    |
| Pozo “Z”     | 09/11/2018   | 10:25                   | 14:40                   | 5598.16                     | 7.56      | 17310           | 25                    |
| Pozo “Z”     | 12/11/2018   | 10:10                   | 10:40                   | 5632.53                     | 7.66      | 17410           | 25                    |
| Pozo “Z”     | 16/11/2018   | 09:50                   | 14:40                   | 5512.43                     | 7.37      | 17010           | 25                    |
| Pozo “Z”     | 19/11/2018   | 08:50                   | 10:20                   | 5712.12                     | 7.51      | 17570           | 25                    |
| Pozo “Z”     | 23/11/2018   | 09:20                   | 14:20                   | 5487.80                     | 7.47      | 17150           | 25                    |
| Pozo “Z”     | 26/11/2018   | 09:20                   | 10:40                   | 5481.93                     | 7.54      | 17100           | 25                    |
| Pozo “Z”     | 03/12/2018   | 09:20                   | 14:40                   | 5609.38                     | 7.59      | 17170           | 25                    |
| Pozo “Z”     | 07/12/2018   | 11:35                   | 14:40                   | 5427.22                     | 7.53      | 17070           | 25                    |
| Pozo “Z”     | 10/12/2018   | 09:30                   | 10:40                   | 5527.11                     | 7.60      | 17120           | 25                    |
| Pozo “Z”     | 14/12/2018   | 10:55                   | 14:40                   | 5515.63                     | 7.54      | 17060           | 25                    |
| Pozo “Z”     | 17/12/2018   | 09:10                   | 14:40                   | 5518.87                     | 7.61      | 17110           | 25                    |
| Pozo “Z”     | 04/01/2019   | 10:20                   | 14:40                   | 5644.65                     | 7.61      | 17220           | 25                    |
| Pozo “Z”     | 07/01/2019   | 09:00                   | 10:40                   | 5694.44                     | 7.63      | 17400           | 25                    |
| Pozo “Z”     | 11/01/2019   | 11:10                   | 14:40                   | 5432.10                     | 7.55      | 16900           | 25                    |
| Pozo “Z”     | 14/01/2019   | 09:20                   | 14:40                   | 5582.82                     | 7.58      | 17210           | 25                    |
| Pozo “Z”     | 18/01/2019   | 10:00                   | 14:40                   | 5555.55                     | 7.61      | 17190           | 25                    |
| Pozo “Z”     | 21/01/2019   | 09:15                   | 14:40                   | 5506.13                     | 7.61      | 17110           | 25                    |
| Pozo “Z”     | 25/01/2019   | 09:00                   | 10:40                   | 5550.31                     | 7.59      | 17120           | 25                    |
| Pozo “Z”     | 28/01/2019   | 08:45                   | 10:40                   | 5559.01                     | 7.65      | 17170           | 25                    |
| Pozo “Z”     | 01/02/2019   | 09:50                   | 14:40                   | 5512.42                     | 7.59      | 17000           | 25                    |

| Punto    | Fecha      | Hora de muestreo | Hora de Análisis | Cl <sup>-</sup> (ppm) | pH   | CE $\mu$ S/cm | Temperatura $^{\circ}$ C |
|----------|------------|------------------|------------------|-----------------------|------|---------------|--------------------------|
| Pozo "Z" | 04/02/2019 | 09:25            | 10:40            | 5590.06               | 7.59 | 17180         | 25                       |
| Pozo "Z" | 08/02/2019 | 10:20            | 10:40            | 5506.13               | 7.57 | 16950         | 25                       |
| Pozo "Z" | 11/02/2019 | 09:30            | 10:40            | 5644.17               | 7.63 | 17200         | 25                       |
| Pozo "Z" | 14/02/2019 | 09:25            | 14:40            | 5696.20               | 7.60 | 17400         | 25                       |
| Pozo "Z" | 18/02/2019 | 09:00            | 14:40            | 5727.85               | 7.63 | 17260         | 25                       |
| Pozo "Z" | 21/02/2019 | 10:50            | 14:40            | 5411.59               | 7.59 | 16850         | 25                       |
| Pozo "Z" | 25/02/2019 | 09:25            | 10:40            | 5506.06               | 7.60 | 17040         | 25                       |
| Pozo "Z" | 01/03/2019 | 10:25            | 14:40            | 5586.42               | 7.57 | 17080         | 25                       |
| Pozo "Z" | 05/03/2019 | 10:20            | 10:40            | 5763.20               | 7.64 | 17400         | 25                       |
| Pozo "Z" | 08/03/2019 | 10:00            | 14:40            | 5656.25               | 7.57 | 17210         | 25                       |
| Pozo "Z" | 11/03/2019 | 10:40            | 14:40            | 5791.14               | 7.60 | 17350         | 25                       |
| Pozo "Z" | 15/03/2019 | 09:50            | 14:40            | 5705.52               | 7.56 | 17360         | 25                       |
| Pozo "Z" | 18/03/2019 | 10:55            | 14:40            | 5656.25               | 7.68 | 17200         | 25                       |
| Pozo "Z" | 22/03/2019 | 09:00            | 14:40            | 5536.81               | 7.55 | 16950         | 25                       |
| Pozo "Z" | 25/03/2019 | 09:25            | 14:40            | 5460.12               | 7.60 | 16950         | 25                       |

**Tabla 31:** Resultados químico-físico del pozo "Z"

Fuente: (Elaboración propia, 2019)

Se realizó un diagrama de dispersión para visualizar que tipo de relación existe entre la CE y la concentración del ion Cl<sup>-</sup> con el fin de seleccionar el mejor modelo que se adecue a los datos obtenidos y que mayor bondad de ajuste presente.



**Figura 13:** Diagrama de dispersión pozo "Z"

Fuente: (Elaboración propia, 2019)

Como se puede observar en el gráfico de dispersión de la figura 13, no es posible definir con certeza qué tipo de distribución siguen los datos.

### Resumen de modelo y estimaciones de parámetro

Variable dependiente: CE

La variable independiente es CI

| Ecuación    | Resumen del modelo |        |     |     |      | Estimaciones de parámetro   |                |                |                |
|-------------|--------------------|--------|-----|-----|------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|
|             | R cuadrado         | F      | gl1 | gl2 | Sig. | Constante (B <sub>0</sub> ) | B <sub>1</sub> | B <sub>2</sub> | B <sub>3</sub> |
| Lineal      | .735               | 94.202 | 1   | 34  | .000 | 8981.782                    | 1.467          |                |                |
| Logarítmico | .736               | 94.621 | 1   | 34  | .000 | -53679.962                  | 8212.626       |                |                |
| Inverso     | .736               | 94.971 | 1   | 34  | .000 | 25406.349                   | -45952406.511  |                |                |
| Cuadrático  | .735               | 94.202 | 1   | 34  | .000 | 8981.782                    | 1.467          | .000           |                |
| Cúbico      | .739               | 46.618 | 2   | 33  | .000 | -12637.718                  | 7.265          | .000           | -6.170E-8      |
| Compuesto   | .735               | 94.515 | 1   | 34  | .000 | 10662.344                   | 1.000          |                |                |
| Exponencial | .735               | 94.515 | 1   | 34  | .000 | 10662.344                   | 8.536E-5       |                |                |

**Tabla 32:** Resumen del modelo y estimación de parámetros del pozo “Z”

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

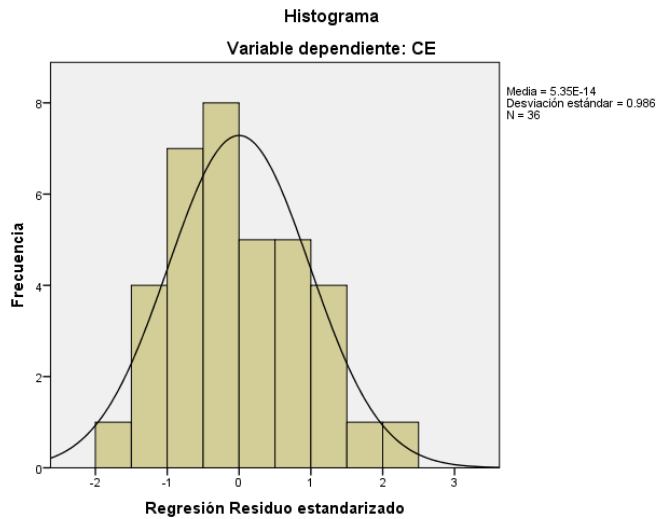
Como se puede observar en la tabla 32, los valores del R cuadrado para cada uno de los modelos analizados son similares, por lo tanto no existe una diferencia significativa en cuanto a la eficacia de un modelo a otro. Los modelos cúbico y cuadrático no se ha podido ajustar debido a una colinealidad próxima entre los términos del modelo; además los modelos cuadrático y cúbico no cumplen con el objetivo principal de dicha investigación. Los modelos que cumplen con los objetivos de la investigación son el modelo lineal, logarítmico, inverso, compuesto y exponencial.

Debido a que la variación del R cuadrado entre un modelo y otro es baja, seleccionaremos el modelo de regresión lineal simple para el diseño de nuestra herramienta matemática predictiva.

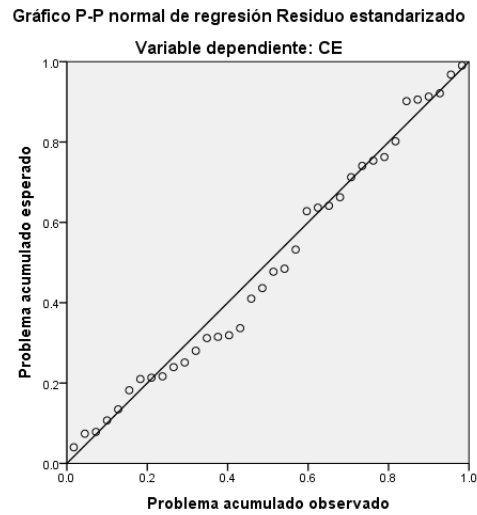


### 7.4.1. Prueba de Normalidad de los residuos.

Se procede a realizar dicha prueba para visualizar si los residuos se asemejan a una distribución normal.



**Figura 14:** Histograma de distribución normal pozo “Z”



**Figura 15:** Gráfico P-P normal regresión Residuo estandarizado pozo “Z”

Como se puede observar en el histograma anterior, los residuos estandarizados se asemejan a la curva de distribución normal. En el gráfico P-P normal de regresión residuo estandarizado podemos observar que entre más se acerquen los puntos a la línea recta, más se asemejará a una distribución normal. Sin embargo hay ciertos puntos que se alejan un poco y no es posible gráficamente determinar con certeza la normalidad de los residuos, por esta razón hacemos uso de otras pruebas.

Para el supuesto de normalidad disponemos de dos pruebas, Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk. Se selecciona la prueba de Shapiro-Wilk ya que el tamaño de nuestra muestra es inferior a 50. Se procede entonces a realizar el análisis de prueba de normalidad planteándonos las siguientes hipótesis:

$$H_0: sig. > 0.05: \text{Los residuos siguen una distribución normal}$$

$$H_1: sig < 0.05: \text{Los residuos no siguen una distribución normal}$$

**Pruebas de normalidad**

|                       | Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup> |    |       | Shapiro-Wilk |    |      |
|-----------------------|---------------------------------|----|-------|--------------|----|------|
|                       | Estadístico                     | Gl | Sig.  | Estadístico  | Gl | Sig. |
| Standardized Residual | .110                            | 36 | .200* | .976         | 36 | .603 |

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

**Tabla 33: Prueba de normalidad pozo “Z”**

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

Dado que el p-valor o sig. =0.603 > 0.05, no podemos rechazar la hipótesis nula y podemos decir con un 95% de confianza que existe suficiente evidencia estadística para poder afirmar que los residuos siguen una distribución normal.

**7.4.2. Prueba de significancia del modelo seleccionado.**

La tabla de ANOVA nos dirá si el modelo de regresión lineal simple es o no significativo.

$H_0: B_1 = 0$  (sig. > 0.05 El modelo seleccionado no es significativo)

$H_1: B_1 \neq 0$  (sig. < 0.05: El modelo seleccionado es significativo)

**ANOVA<sup>a</sup>**

| Modelo      | Suma de cuadrados | Gl | Media cuadrática | F      | Sig.              |
|-------------|-------------------|----|------------------|--------|-------------------|
| 1 Regresión | 741870.206        | 1  | 741870.206       | 94.202 | .000 <sup>b</sup> |
| Residuo     | 267760.350        | 34 | 7875.304         |        |                   |
| Total       | 1009630.556       | 35 |                  |        |                   |

a. Variable dependiente: CE

b. Predictores: (Constante), CI

**Tabla 34: ANOVA pozo “Z”**

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

Se observa un valor de  $F=94.202$ , y dado que el p-valor o  $\text{sig.} = 0.000 < 0.05$ , existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, y afirmamos con un 95% de confianza que el modelo seleccionado es significativo.

**Coefficientes<sup>a</sup>**

| Modelo                | Coeficientes no estandarizados |                | Coeficientes estandarizados | t      | Sig. | 95.0% intervalo de confianza para B |                 |
|-----------------------|--------------------------------|----------------|-----------------------------|--------|------|-------------------------------------|-----------------|
|                       | B                              | Error estándar | Beta                        |        |      | Límite inferior                     | Límite superior |
| 1 Constante ( $B_0$ ) | 8981.782                       | 844.145        |                             | 10.640 | .000 | 7266.272                            | 10697.292       |
| Cl ( $B_1$ )          | 1.467                          | .151           | .857                        | 9.706  | .000 | 1.160                               | 1.774           |

a. Variable dependiente: CE

**Tabla 35: Coeficientes pozo “Z”**

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

Realizamos el planteamiento de nuestras hipótesis para ambos coeficientes:

**Para  $B_0$**

$$H_0: B_0 = 0 \text{ (sig.} > 0.05 \text{ } B_0 \text{ no es significativo)}$$

$$H_1: B_0 \neq 0 \text{ (sig.} < 0.05 \text{ } B_0 \text{ es significativo)}$$

Dado que el p-valor o  $\text{sig.} = 0.000 < 0.05$ , podemos afirmar con un 95% de confianza que existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, y afirmamos que  $B_0$  es significativo.

**Para  $B_1$**

$$H_0: B_1 = 0 \text{ (sig.} > 0.05: B_1 \text{ no es significativo)}$$

$$H_1: B_1 \neq 0 \text{ (sig.} < 0.05: B_1 \text{ es significativo)}$$

Dado que el p-valor o sig.=0.000 < 0.05, podemos afirmar con un 95% de confianza existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, y afirmamos que  $B_1$  es significativo.

### 7.4.3. Bondad de ajuste del modelo

**Resumen del modelo<sup>b</sup>**

| Modelo | R                 | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación | Durbin-Watson |
|--------|-------------------|------------|---------------------|---------------------------------|---------------|
| 1      | .857 <sup>a</sup> | .735       | .727                | 88.743                          | 1.398         |

a. Predictores: (Constante), Cl<sup>-</sup>

b. Variable dependiente: CE

**Tabla 36:** Resumen del modelo y bondad de ajuste del pozo “Z”

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

El modelo de regresión lineal simple explica el 73.50% del cambio de la variable dependiente (conductividad eléctrica), mientras que el 26.50% es explicada por otros factores.

**Estadísticos descriptivos**

|                            |          | Cl <sup>-</sup> | CE        |
|----------------------------|----------|-----------------|-----------|
| N                          | Válido   | 36              | 36        |
|                            | Perdidos | 0               | 0         |
| Media                      |          | 5583.3753       | 17173.61  |
| Error estándar de la media |          | 16.53844        | 28.307    |
| Mediana                    |          | 5570.9150       | 17170.00  |
| Moda                       |          | 5506.13         | 16950     |
| Desviación estándar        |          | 99.23065        | 169.843   |
| Varianza                   |          | 9846.723        | 28846.587 |
| Rango                      |          | 379.55          | 720       |
| Mínimo                     |          | 5411.59         | 16850     |
| Máximo                     |          | 5791.14         | 17570     |
| Percentiles                | 50       | 5570.9150       | 17170.00  |
| CV                         |          | 1.78 %          | 0.99%     |

**Tabla 37:** Estadísticos descriptivos pozo “Z”.

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

De la tabla 37 se deduce que la conductividad eléctrica promedio del pozo “Z” fue de 17173.61  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con una variación de 169.843  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La conductividad eléctrica más frecuente fue 16950  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Entre la máxima y mínima conductividad eléctrica alcanzada hay una diferencia de 720  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El 50% de la CE tuvo un valor de 17170  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El valor del coeficiente de variación para la CE y la concentración de  $\text{Cl}^-$  es de 0.99 % y 1.78% respectivamente, lo que indica que posee poca variabilidad y es altamente representativa (Anexo 6).

#### **7.4.4. Supuestos para la correcta aplicación del modelo seleccionado**

Para garantizar la correcta aplicación del modelo de regresión lineal simple los residuos deben cumplir los siguientes supuestos: linealidad, normalidad, independencia de errores y homocedasticidad.

##### **1- Prueba de normalidad**

Anteriormente se realizó esta prueba para visualizar si las variables siguen o no una distribución normal (tabla 33).

##### **2- Prueba de linealidad**

Como se observa en la tabla 36 el coeficiente de correlación de Pearson tiene un valor de 0.857, lo que nos indica que existe una correlación lineal muy alta en base al anexo 1.

##### **3- Prueba de independencia de los residuos**

Para el contraste de esta hipótesis se utiliza la prueba de Durbin-Watson ya que estamos hablando del mismo punto, en nuestro caso del mismo pozo.

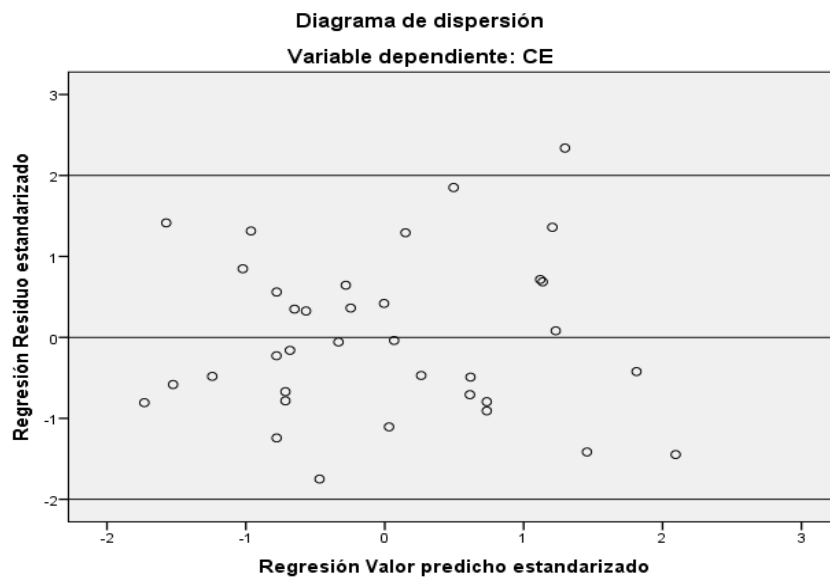
Procedemos a plantear las hipótesis:

$H_0: d_u < d < (4 - d_u)$ : No existe autocorrelación entre los residuos

$H_1: 0 < d < d_L \text{ ó } (4 - d_L) < d < 4$ : Existe autocorrelación entre los residuos

Buscamos en la tabla del anexo 9 los valores de  $d_L$  y  $d_u$  y obtenemos que para un valor de  $N=36$  con una variable explicativa ( $k=1$ )  $d_L=1.411$ , y  $d_u= 1.525$ . En la tabla 36, podemos observar que el DW para el pozo “Z” tiene un valor de 1.398, no se cumple la hipótesis nula  $1.525 < 1.398 < 2.475$ , aceptamos la hipótesis alternativa y decimos que existe autocorrelación entre los residuos es decir no hay independencia.

#### 4- Prueba de Homocedasticidad



**Figura 16:** Diagrama de dispersión prueba de homocedasticidad pozo “Z”

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

Se puede observar en la figura 16 que casi todos los puntos se distribuyen aproximadamente entre 2 y -2 de manera aleatoria sin seguir un patrón definido como lo es una línea recta, una parábola, una hipérbola o una función polinomial; por esta razón no se puede rechazar el supuesto de Homocedasticidad es decir igualdad de varianzas. Se puede observar que existe 1 punto que se salen ligeramente del rango (2 y -2) que se consideran punto atípico.

Gráficamente no es posible completamente decidir si se cumple dicho supuesto, por esta razón acudiremos a pruebas numéricas. La prueba de Levene para la igualdad de varianzas nos indica si podemos o no suponer varianzas iguales. Procedemos a plantear las hipótesis:

$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$  (sig. > 0.05 Las varianzas en ambos grupos son iguales)

$H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$  (sig. < 0.05: Las varianzas en ambos grupos son diferentes)

|                       |   | Prueba de Levene de igualdad de varianzas |      |
|-----------------------|---|---|------|
|                       |   | F   | Sig. |
| Standardized Residual | Se asumen varianzas iguales<br>No se asumen varianzas iguales | 3.206                                     | .082 |

**Tabla 38:** Correlaciones bivariadas del pozo “Z”

Fuente: (Elaboración propia, 2019)

Se observa un valor de F=3.206, y dado que el p-valor o sig.= 0.082>0.05, existe suficiente evidencia estadística para aceptar la hipótesis nula, y afirmamos con un 95% de confianza que las varianzas en ambos grupos son iguales, es decir, existe homocedasticidad.

#### 7.4.5. Correlaciones

$H_0: R = 0$  (sig. > 0.05 No existe correlación significativa entre las variables)

$H_1: R \neq 0$  (sig. < 0.05 Existe correlación significativa entre las variables)

|     |                        | CI-    | CE     |
|-----|------------------------|--------|--------|
| CI- | Correlación de Pearson | 1      | .857** |
|     | Sig. (bilateral)       |        | .000   |
|     | N                      | 36     | 36     |
| CE  | Correlación de Pearson | .857** | 1      |
|     | Sig. (bilateral)       | .000   |        |
|     | N                      | 36     | 36     |

**Tabla 39:** Correlaciones bivariadas del modelo pozo “Z”

Fuente: (Elaboración propia, 2019)

Se realizó una correlación bivariada (ambas colas) utilizando como prueba de hipótesis el R de Pearson ya que se trata de variables que siguen una distribución normal y una tendencia lineal. Como se puede observar en la tabla 39 el nivel de significancia para ambas variables es significativo.

Dado que el p-valor o sig. =0.000<0.05, podemos afirmar con un 99% de confianza que existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, y afirmamos que existe una correlación entre las variables.

#### **7.4.6. Diseño del modelo del pozo “Z”**

Debido a que se viola el supuesto de independencia de los residuos y el coeficiente  $B_0$  no es significativo, no es posible establecer y diseñar la herramienta matemática predictiva ya que se cometería un grave error y el modelo no sería eficiente, por esta razón no se desarrollan los cálculos correspondientes al % del error entre un modelo y otro.



## CONCLUSIONES

### Pozo “X”

En base a los resultados obtenidos mediante el uso del software estadístico SPSS, se puede concluir y observar que existe una correlación entre la CE y la concentración del ion  $\text{Cl}^-$  debido a que presenta un coeficiente de correlación de Pearson de 0.803 lo cual indica una correlación positiva muy alta (anexo 1). El R cuadrado tiene un valor de 0.644 debido a que en este pozo la concentración de  $\text{Cl}^-$  es más estable que en los pozos “Y” y “Z”; dicho valor tiene lógica ya que en una correlación (o relación) se busca variabilidad para observar una tendencia, además la conductividad eléctrica total será la suma del aporte de cada ion independiente ( $k = \sum_{i=1}^n k_i$ ).

Si bien es notorio el modelo aplicado (modelo de regresión lineal simple) es significativo al 95% de confianza, el coeficiente  $B_1$  es significativo pero  $B_0$  no lo es, por lo tanto, no se puede incluir en el modelo. A pesar de que existe evidencia estadística de la posible aplicación de un modelo de regresión lineal, evidencia con pruebas químicas y físicas de la influencia de otros posibles iones a la conductividad eléctrica; no es posible aplicar este tipo de modelo en el pozo “X” debido a que se viola el supuesto de independencia de los residuos y esto genera que las pruebas pierdan validez, que se amplíen los intervalos de confianza y que el modelo sea ineficiente.

### Pozo “Y”

En base a los resultados obtenidos mediante el uso del software estadístico SPSS, se puede concluir y observar que si existe una correlación entre la CE y la concentración del ion  $\text{Cl}^-$  debido a que presenta un coeficiente de correlación de Pearson de 0.891 lo cual indica una correlación positiva muy alta (anexo 1). Si bien es notorio el modelo aplicado y los coeficientes  $B_1$  y  $B_0$  son significativos al 95% de confianza. En dicho pozo si es posible aplicar el modelo de regresión lineal simple como herramienta predictiva, ya que estadísticamente es significativo y cumple todos los supuestos necesarios para la buena aplicación de dicho modelo.

En el anexo 3 podemos observar que al utilizar el modelo de regresión lineal simple, el error relativo máximo es del 2.27 % y se obtuvo un error promedio del 0.7 % lo cual indica que existe

poca variabilidad de un modelo a otro y en efecto es posible aplicar esta herramienta matemática predictiva teniendo un 95 % de confianza y una probabilidad del 5% de error de equivocarnos. En el anexo 4 se puede observar que los parámetros de dispersión (CV, error estándar de la media, y desviación estándar) del método de laboratorio y del método de la ecuación matemática son muy cercanos, lo que indica que se obtendrán muy buenos resultados. En el anexo 5 se incorpora la prueba t para muestras independientes para corroborar con un 95 % de confianza que los datos obtenidos utilizando el método de laboratorio y la herramienta matemática predictiva no difieren significativamente.

### **Pozo “Z”**

En base a los resultados obtenidos mediante el uso del software estadístico SPSS, se puede concluir y observar que existe una correlación entre la CE y la concentración del ion cloruro debido a que presenta un coeficiente de correlación de Pearson de 0.857 lo cual indica una correlación positiva alta. El R cuadrado tiene un valor de 0.735, dicho valor tiene lógica ya que no podíamos obtener un R cuadrado mayor ya que la conductividad eléctrica ( $k$ ),  $k = \sum_{i=1}^n k_i$  donde la CE total será la suma del aporte de cada ion.

Si bien es notorio el modelo aplicado y los coeficientes  $B_1$  y  $B_0$  son significativos al 95% de confianza. A pesar de que existe evidencia estadística de la posible aplicación de un modelo de regresión lineal, evidencia con pruebas químicas y físicas de la influencia de otros posibles iones a la conductividad eléctrica; no es posible aplicar este tipo de modelo en el pozo “Z” debido a que se viola el supuesto de independencia de los residuos y esto genera que las pruebas pierdan validez, que se amplíen los intervalos de confianza y que el modelo sea ineficiente.

## RECOMENDACIONES

- 1- Se recomienda realizar este tipo de correlaciones o relaciones en aguas donde exista un ion predominante que presente un aporte de carga alto, y sea el que genere el mayor porcentaje de carga.
- 2- Se recomienda realizar este tipo de correlaciones en aguas con un bajo contenido de sales debido a que el error es mayor cuando realizamos mediciones de magnitudes grandes. Se obtendrían mejores resultados en muestras que contengan un solo compuesto.
- 3- Se recomienda realizar una dilución de la muestra en la cual la concentración de los demás iones sea casi nula y la concentración del ion de interés sea aproximadamente el único que se encuentre presente para obtener mejores resultados.
- 4- Antes de realizar alguna investigación relacionada con lo hecho en esta tesis, se recomienda realizar un análisis completo de los iones mayoritarios y minoritarios más importantes para calcular la influencia y el aporte de ese ion a la conductividad eléctrica utilizando las leyes de Kohlrausch.
- 5- Se recomienda investigar los factores que afectan tanto a la CE como a la concentración del ion de interés para observar si su concentración varía en función del tiempo o época.
- 6- Se recomienda hacer énfasis en la técnica de aleatorización para así poder reducir al máximo la autocorrelación de los residuos y que el modelo de regresión cumpla con todas las condiciones necesarias para su adecuada aplicación. Reducir la autocorrelación conllevaría a la reducción del error cometido lo que evitaría que los intervalos de confianza se amplíen.
- 7- Se podría reducir el % de error relativo realizando un análisis con y sin los puntos atípicos que se presentan en las pruebas de homocedasticidad; con el fin de observar la diferencia existente entre ambos casos, y a su vez, visualizar si son influyentes en el modelo para descartar la posible heterocedasticidad que conllevaría al incumplimiento del modelo de regresión lineal.

## BIBLIOGRAFÍA

### Referencias bibliográficas

- [1] STRELBITSKAYA, S., KHOSRAWI, K., PORKHIAL, S., BEHRAD, Y., (2015). Fluid Chemistry of Geothermal Exploration Wells at NW-Sabalan Geothermal Field, Iran.
- [2] Instituto Tecnológico y minero de España (1985). Análisis metodológico de las técnicas geoquímicas empleadas en prospección geotérmica. Ministerio de industria y energía, Secretaria de la energía y recursos minerales España.
- [3] Herrera, L., (2017). Actualización cartográfica y geoquímica de aguas termales del sur del volcán Mombacho orientado a prospección de recurso geotérmico. Seminario de graduación para optar a título de Ingeniero Geólogo. UNAM Managua, Departamento de Tecnología Ingeniería Geológica.
- [4] Guerra, C., (2015). Caracterización geoquímica de sistemas geotermales en zonas de transición: volcanes nevados de Chillán y Copahue. Memoria para optar al título de geóloga. Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas; Departamento de Geología.
- [5] Acosta, M., y Viera, L., (2015). Metodología geoquímica aplicada a Fluidos Geotermales. Proyecto Final Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura Unidad de Postgrados.
- [6] Óskarsson, F., and Ármannsson, H. (2015). Geochemical methods in geothermal surface exploration.
- [7] García, Y., y Hernández, A. (2017). Análisis y contribuciones al modelo conceptual del campo geotérmico los azufres a partir de nuevas zonas perforadas. Diplomado en geotermia para América Latina, Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura, escuela de posgrado.
- [8] Ármannsson, H., and Fridriksson, T. (2009). Application of geochemical methods in geothermal exploration.
- [9] SÁNCHEZ, A. (2014). Modelación geoquímica de las interacciones fluido-roca en el volcán nevado del Ruizflanco noroccidental, Colombia. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias. Bogotá D.C, Colombia.

- [10] Martínez, G. (2017). Geoquímica Preliminar del Prospecto Geotérmico Volcán Mombacho, Nicaragua. Proyecto final, Diplomado de especialización en geotermia 2017. Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura Unidad de Postgrados.
- [11] Farfán, J., Poma, C., y López, N. (2015). Integración de datos geológicos y geoquímicos de un área geotermal, caso de estudio Colca-Perú. Diplomado de especialización en geotermia 2015. Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Unidad de Postgrados.
- [12] Urenda, F. (2016). Salinidad y aguas subterráneas. Barcelona.
- [13] Velázquez, M., Pimentel, J., y Ortega, M. (2011). Estudio de la distribución de boro en fuentes de agua de la cuenca del río Duero, México, utilizando análisis estadístico multivariado. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Michoacán. Justo Sierra No. 28 Col. Centro, Jiquilpan, Michoacán 59510.
- [14] Velázquez, M., & Ordorica, M. Soluciones Electrolíticas. S.f.
- [15] Portilla, M., Eraso, S, Galé, C., García, I., Moler, J. y Blanca, M. (2006). Manual práctico del paquete estadístico SPSS para Windows (3ª edición revisada). Universidad Pública de Navarra.
- [16] Lizasoain, L., Joaristi, L. (2003). Gestión y análisis de datos con SPSS. Versión 11. Thomson: Madrid.
- [17] López, C., y Reyes, O. (2012). Propuesta de elaboración de un filtro para el tratamiento de boro en aguas residuales provenientes de LaGeo Ahuachapán. Universidad de El Salvador Facultad de Química y Farmacia.
- [18] J. Durbin and G. S. Watson (1950). Testing for serial correlation in least squares regression I. *Biometrika*, Vol. 37, pp. 409–428.
- [19] J. Durbin and G. S. Watson (1951). Testing for serial correlation in least squares regression II. *Biometrika*, Vol. 38, pp. 159–178.

## **Referencias electrónicas**

[20]Folleto informativo 3.1.3.0. Conductividad salinidad. S.f. Recuperado de [https://www.waterboards.ca.gov/water\\_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3130sp.pdf](https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3130sp.pdf)

[21]Composición química de las aguas subterráneas. S.f. Recuperado de [http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/pdf/lib43/1\\_1.pdf](http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/pdf/lib43/1_1.pdf)

[22]MAQUIMSA. Fichas técnicas-conductividad. S.f. Recuperado de <http://maquimsa.com/fichastecnicas.html>

[23]Martín, R. (2017). Conductividad de soluciones electrolíticas. Recuperado de [https://www.uv.es/qflab/2017\\_18/descargas/cuadernillos/qf1/castellano/Teoria/Conductividad-F.pdf](https://www.uv.es/qflab/2017_18/descargas/cuadernillos/qf1/castellano/Teoria/Conductividad-F.pdf)

[24]Conductividad eléctrica, S.f. Recuperado de [http://docencia.udea.edu.co/cen/QuimicaAnaliticaII/pdf\\_files/conductividad.pdf](http://docencia.udea.edu.co/cen/QuimicaAnaliticaII/pdf_files/conductividad.pdf)

[25]Fundamentos teóricos de la conductividad de soluciones electrolíticas. S.f. Recuperado de [http://ocw.uv.es/ciencias/1-1/teo\\_conductividad\\_nuevo.pdf](http://ocw.uv.es/ciencias/1-1/teo_conductividad_nuevo.pdf)

[26]Unidad 2 Propiedades de conductividad de electrodos y electrolitos. S.f. Recuperado de [http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Apuntes.Unidad2\\_24465.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Apuntes.Unidad2_24465.pdf)

[27] García Bellido, R., González Such, J. y Jornet Meliá, J.M. (2010). SPSS prueba t para muestras independientes. InnovaMIDE. Recuperado de [https://www.uv.es/innomide/spss/SPSS/SPSS\\_0701b.pdf](https://www.uv.es/innomide/spss/SPSS/SPSS_0701b.pdf)

[28] Juárez, Villatoro & López, (2011). T Student en SPSS. Recuperado de [http://www.rincondepaco.com.mx/rincon/Inicio/Apuntes/Proyecto/archivos/Documentos/t\\_independientes.pdf](http://www.rincondepaco.com.mx/rincon/Inicio/Apuntes/Proyecto/archivos/Documentos/t_independientes.pdf).

[29] Jiménez Cornejo, D. Tesis e investigaciones Análisis-SPSS. Asesoría y corrección de tesis estadística. S.f. Recuperado de <https://www.tesiseinvestigaciones.com/estadiacutesticos-descriptivos/coeficiente-de-pearson>

**[30] Ministerio de Hacienda (2013). Conceptos y Métodos básicos de estadística. Recuperado de**

[http://www.transparenciafiscal.gob.sv/downloads/pdf/DC4597\\_4.\\_Curso\\_3\\_Conceptos\\_y\\_Metodos\\_Basicos\\_de\\_Estadistica.pdf](http://www.transparenciafiscal.gob.sv/downloads/pdf/DC4597_4._Curso_3_Conceptos_y_Metodos_Basicos_de_Estadistica.pdf)

**[31] Funes, N. Introducción a la Probabilidad y Estadística Inferencial. S.F. Recuperado de**

[http://www.transparenciafiscal.gob.sv/downloads/pdf/DC4597\\_4.\\_Curso\\_3\\_Conceptos\\_y\\_Metodos\\_Basicos\\_de\\_Estadistica.pdf](http://www.transparenciafiscal.gob.sv/downloads/pdf/DC4597_4._Curso_3_Conceptos_y_Metodos_Basicos_de_Estadistica.pdf)

**[32] Catalán, A. S.f. Curso internacional: construcción de escenarios económicos y econometría avanzada. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de**

[https://www.cepal.org/sites/default/files/courses/files/04\\_pruebas\\_especificacion.pdf](https://www.cepal.org/sites/default/files/courses/files/04_pruebas_especificacion.pdf)

**[33] Guía para el análisis de datos SPSS. S.f. Hispano portuguesa SPSS Luchana 23, 5ª planta 28010, Madrid. Recuperado de**

<http://www.listinet.com/bibliografia-comuna/Cdu311-F36A.pdf>

**[34] Gómez Fontalva, J., Calvache, M., (2010). Origen de la salinidad de las aguas subterráneas del sistema acuífero costero de Torrevieja: Aspectos Hidroquímicos. Departamento de Geodinámica. Universidad de Granada. Recuperado de**

<http://sge.usal.es/archivos/geogacetas/geo48/art32.pdf>

**[35] Miller, James N., Miller, Jane C., 2002. Estadística y quimiometría para química analítica, 4ª Ed, Pearson Educación, Madrid. Recuperado de**

<http://cmap.upb.edu.co/rid=1SR8GJ7P0-26ZZH0M-12D/Estadistica-y-Quimiometria-para-Quimica-Analitica-4ed-Miller-Miller.pdf>

**[36] Flores Ramos, L., Ruiz Soto, A. 2017. Implementación de una metodología analítica para la cuantificación de proteínas en la microalga Arthrospira platensis. Recuperado de**

[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=11&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj1tZDZ6abkAhUSyFkKHbvjDus4ChAWMAB6BAgEEAE&url=http%3A%2F%2Fwww.scielo.org.pe%2Fscielo.php%3Fscript%3Dsci\\_arttext%26pid%3DS1810-634X2017000400002&usg=AOvVaw3yz0FnPjdkTDctk541GRdy](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=11&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj1tZDZ6abkAhUSyFkKHbvjDus4ChAWMAB6BAgEEAE&url=http%3A%2F%2Fwww.scielo.org.pe%2Fscielo.php%3Fscript%3Dsci_arttext%26pid%3DS1810-634X2017000400002&usg=AOvVaw3yz0FnPjdkTDctk541GRdy)

**[37] Torralvo Martínez, J., 2017. Validación de un método químico analítico de HPLC en R. Fundación universitaria los libertadores. Departamento de Ciencias básicas Especialización en estadística aplicada. Bogotá D.C. Recuperado de <https://repository.libertadores.edu.co/bitstream/handle/11371/1311/torralvojose2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.**



# **ANEXOS**



**Equipo para medición de pH y CE.**



**Espectrofotómetro**



**Guantes para la toma de muestra**



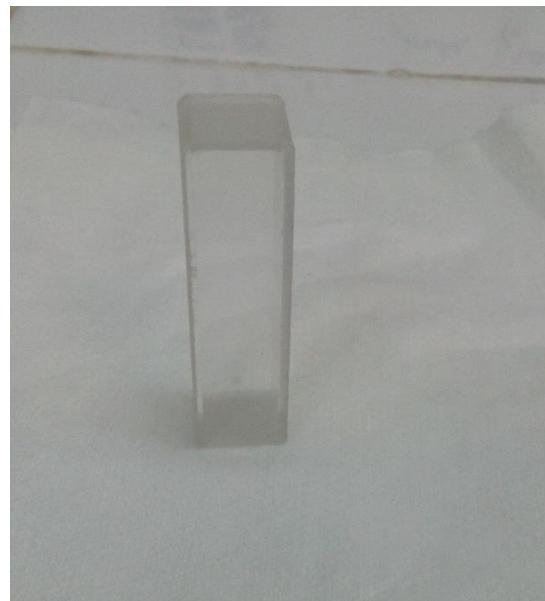
**Protección auditiva**



**Instrumental de vidrio**



**Recipiente de plástico HDPE para**



**Celda espectrofotométrica  
la toma de muestra**



**Termocupla para medir la temperatura  
de la muestra.**



**Micropipetas**



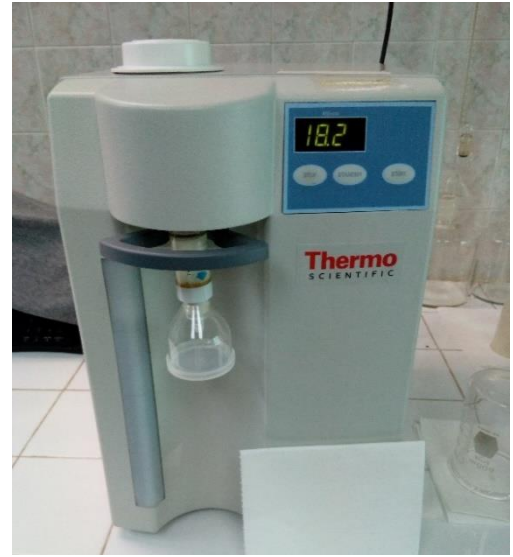
**Lentes protectores**



**Casco protector**



**Incrustación**



**Desionizador**



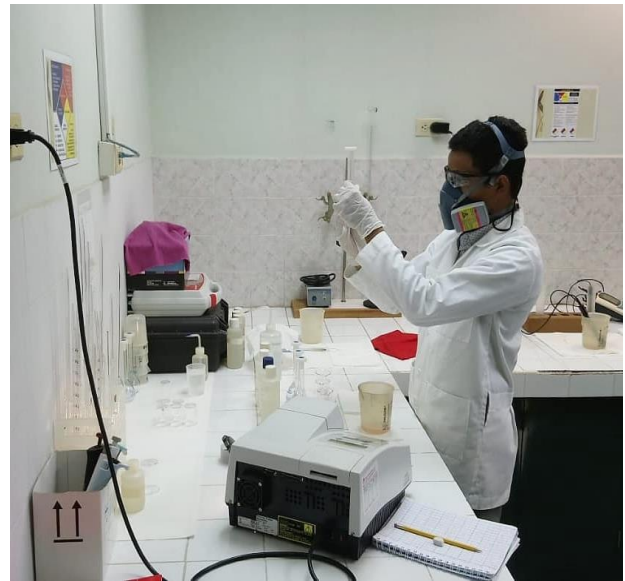
**Análisis físico**



**Medición de las muestras**



**Punto toma de muestra**



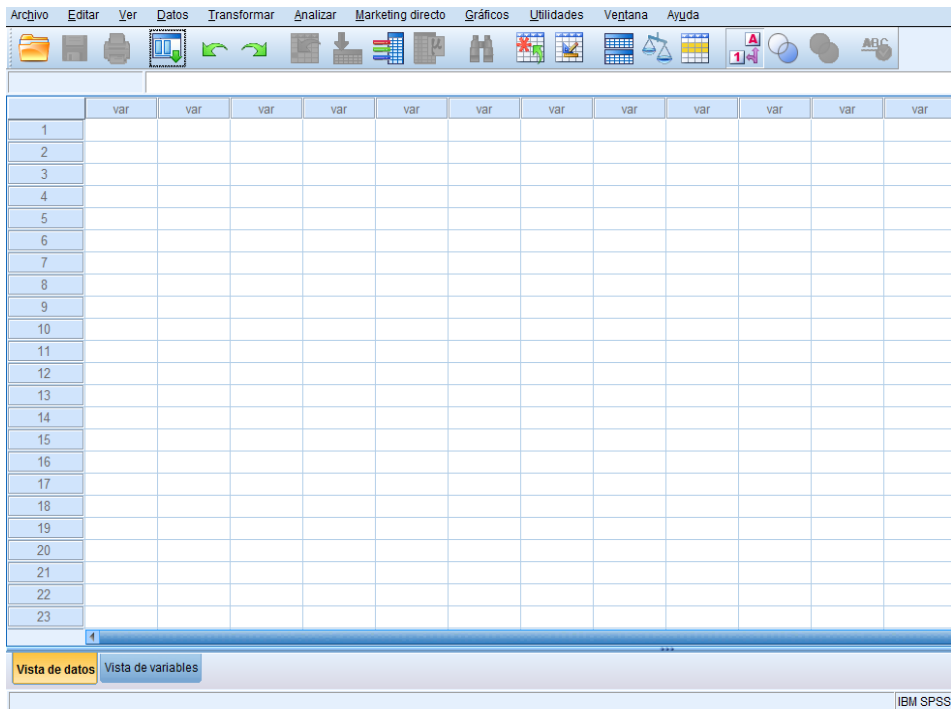
**Análisis químico**

### **ANEXO 1: Interpretación R de Pearson**

| <b>Coefficiente</b> | <b>Interpretación</b> |
|---------------------|-----------------------|
| R=1                 | Correlación Perfecta  |
| $0.80 < R < 1$      | Muy alta              |
| $0.60 < R < 0.80$   | Alta                  |
| $0.40 < R < 0.60$   | Moderada              |
| $0.20 < R < 0.40$   | Baja                  |
| $0 < R < 0.20$      | Muy baja              |
| R=0                 | Nula                  |

*Fuente: (Elaboración propia a partir de (Jiménez Cornejo, D.))*

## ANEXO 2: SPSS



*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

## ANEXO 3: Cálculo del error relativo del modelo del pozo “Y”

$$\%Error\ relativo = \left| \frac{valor\ real - valor\ medido}{valor\ real} \right| \times 100$$

| X<br>Cl <sup>-</sup> (ppm)<br>Laboratorio | Y<br>Cl <sup>-</sup> (ppm)<br>Ecuación | (X-Y)   | % Error<br>relativo | CE<br>μS/cm |
|---|--|---------|---------------------|-------------|
| 5687.50                                   | 5730.71                                | -43.21  | 0.76                | 17390       |
| 5659.51                                   | 5709.26                                | -49.75  | 0.88                | 17340       |
| 5737.95                                   | 5867.99                                | -130.04 | 2.27                | 17710       |
| 5791.93                                   | 5795.06                                | -3.13   | 0.05                | 17540       |
| 5496.99                                   | 5563.40                                | -66.41  | 1.21                | 17000       |
| 5656.25                                   | 5653.49                                | 2.76    | 0.05                | 17210       |
| 5572.29                                   | 5597.72                                | -25.43  | 0.46                | 17080       |

| <b>X</b><br><b>Cl<sup>-</sup> (ppm)</b><br><b>Laboratorio</b> | <b>Y</b><br><b>Cl<sup>-</sup> (ppm)</b><br><b>Ecuación</b> | <b>(X-Y)</b> | <b>% Error</b><br><b>relativo</b> | <b>CE</b><br><b>μS/cm</b> |
|---|--|--------------|-----------------------------------|---------------------------|
| 5484.38   | 5481.89  | 2.49         | 0.05                              | 16810                     |
| 5628.93   | 5636.33  | -7.40        | 0.13                              | 17170                     |
| 5691.82   | 5683.52  | 8.30         | 0.15                              | 17280                     |
| 5617.28   | 5550.53  | 66.75        | 1.19                              | 16970                     |
| 5462.96   | 5481.89  | -18.93       | 0.35                              | 16810                     |
| 5398.77   | 5396.09  | 2.68         | 0.05                              | 16610                     |
| 5493.83   | 5520.50  | -26.67       | 0.49                              | 16900                     |
| 5521.47   | 5580.56  | -59.09       | 1.07                              | 17040                     |
| 5566.04   | 5567.69  | -1.65        | 0.03                              | 17010                     |
| 5590.06   | 5576.27  | 13.79        | 0.25                              | 17030                     |
| 5450.31   | 5520.50  | -70.19       | 1.29                              | 16900                     |
| 5621.12   | 5571.98  | 49.14        | 0.87                              | 17020                     |
| 5521.47   | 5494.76  | 26.71        | 0.48                              | 16840                     |
| 5552.15   | 5559.11  | -6.96        | 0.13                              | 16990                     |
| 5553.80   | 5520.50  | 33.30        | 0.60                              | 16900                     |
| 5664.56   | 5584.85  | 79.71        | 1.41                              | 17050                     |
| 5442.07   | 5529.08  | -87.01       | 1.60                              | 16920                     |
| 5500.00   | 5541.95  | -41.95       | 0.76                              | 16950                     |
| 5617.96   | 5563.40  | 54.56        | 0.97                              | 17000                     |
| 5640.24   | 5619.17  | 21.07        | 0.37                              | 17130                     |
| 5593.75   | 5584.85  | 8.90         | 0.16                              | 17050                     |
| 5691.82   | 5627.75  | 64.07        | 1.13                              | 17150                     |
| 5705.52   | 5713.55  | -8.03        | 0.14                              | 17350                     |
| 5609.38   | 5567.69  | 41.69        | 0.74                              | 17010                     |
| 5429.45   | 5387.51  | 41.94        | 0.77                              | 16590                     |
| 5414.11   | 5306.00  | 108.11       | 2.00                              | 16400                     |
| 5490.80   | 5443.28  | 47.52        | 0.87                              | 16720                     |
| <b>Promedio</b>   |  |              | <b>0.7</b>                        |                           |
| <b>Error máximo</b>   |  |              | <b>2.27</b>                       |                           |

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*



**ANEXO 4: Estadísticos descriptivos de los modelos.**

|  |            |
|--|------------|
| $\bar{x}$ ( <i>método de laboratorio</i> )                                 | 5575.1903  |
| $\bar{y}$ ( <i>método ecuación matemática</i> )                            | 5574.3774  |
| $S_x^2$ ( <i>método de laboratorio</i> )                                   | 10040.4430 |
| $S_y^2$ ( <i>método ecuación matemática</i> )                              | 12633.2336 |
| $S_x$ ( <i>método de laboratorio</i> )                                     | 100.2020   |
| $S_y$ ( <i>método ecuación matemática</i> )                                | 112.3977   |
| $CV$ ( <i>método de laboratorio</i> )                                      | 1.80       |
| $CV$ ( <i>método ecuación matemática</i> )                                 | 2.02       |
| <b>Error estándar de la media</b><br>( <i>método de laboratorio</i> )      | 17.1845    |
| <b>Error estándar de la media</b><br>( <i>método ecuación matemática</i> ) | 19.2760    |

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

**ANEXO 5: Prueba t para muestras independientes pozo “Y”**

|   | Prueba de Levene de igualdad de varianzas |      | prueba t para la igualdad de medias |        |                  |                      |                              |  |          |
|---|---|------|-------------------------------------|--------|------------------|----------------------|------------------------------|--|----------|
|   | F   | Sig. | t                                   | Gl     | Sig. (bilateral) | Diferencia de medias | Diferencia de error estándar | 95% de intervalo de confianza de la diferencia |          |
|   |   |      |                                     |        |                  |                      |                              | Inferior                                       | Superior |
| Concentración Se asumen varianzas iguales | .088                                      | .767 | .031                                | 66     | .975             | .81294               | 25.82388                     | -50.74610                                      | 52.37198 |
| No se asumen varianzas iguales            |   |      | .031                                | 65.148 | .975             | .81294               | 25.82388                     | -50.75869                                      | 52.38457 |

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

La prueba de Levene para la igualdad de varianzas nos indica si podemos o no suponer varianzas iguales. Procedemos a plantear las hipótesis:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 \text{ (sig. > 0.05 Las varianzas en ambos grupos son iguales)}$$

$$H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \text{ (sig < 0.05: Las varianzas en ambos grupos son diferentes)}$$

Se observa un valor de F=0.088, y dado que el p-valor o sig.= 0.767>0.05, existe suficiente evidencia estadística para aceptar la hipótesis nula, y afirmamos con un 95% de confianza que las varianzas en ambos grupos son iguales, es decir, existe homocedasticidad

Después de asumir las varianzas iguales observamos el estadístico t con su nivel de significación bilateral, este valor nos informa sobre el grado de compatibilidad entre la hipótesis de igualdad de medias y la diferencia entre medias poblacionales observadas.

$H_0: sig. > 0.05$ : Los valores obtenidos por los dos métodos son iguales

$H_1: sig < 0.05$ : Los valores obtenidos por los dos métodos son diferentes

Observamos que el valor de significancia  $0.975 > 0.05$ , aceptamos la hipótesis nula y afirmamos con un 95% de confianza que los dos métodos son iguales.

#### ANEXO 6: Coeficiente de variación (CV)

| VALOR DEL C.V. | GRADO EN QUE LA MEDIA REPRESENTA AL CONJUNTO DE DATOS |
|----------------|---|
| 0-<10%         | Media altamente representativa                        |
| 10% - < 20%    | Media bastante representativa                         |
| 20% - < 30%    | Media tiene representatividad                         |
| 30%- < 40%     | Media con representatividad dudosa                    |
| 40% o más      | Media carente de representatividad                    |

*Fuente: (Ministerio de Hacienda, S.f)*

#### ANEXO 7: Criterios para la aceptación de correlación entre variables

Existirá correlación entre la CE y la concentración del ion  $Cl^-$  si el R de Pearson posee un nivel de significancia bilateral (sig. bilateral) menor a 0.05. La intensidad de la relación dependerá del valor del R de Pearson (Anexo 1).

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

## **ANEXO 8: Criterios para la aceptación de la herramienta matemática predictiva**

- 1- El estadístico de Shapiro-Wilk debe poseer un nivel de significancia mayor a 0.05 (seguir una distribución normal).
- 2- El valor de la prueba F del análisis de regresión de la tabla ANOVA debe poseer un nivel de significancia menor a 0.05 (el modelo debe ser significativo estadísticamente).
- 3- El valor de la prueba t para los coeficientes no estandarizados ( $B_0$  y  $B_1$ ) debe poseer un nivel de significancia menor a 0.05 (deben ser significativos estadísticamente).
- 4- El valor del CV debe ser altamente representativo (menor al 10%). (Anexo 6).
- 5- El valor del Durbin-Watson debe cumplir que  $du < d < (4 - d_u)$  es decir, debe existir independencia de los residuos.
- 6- El valor del estadístico F en la prueba de Levene debe poseer un nivel de significancia mayor a 0.05 (deben poseer igualdad de varianzas, homocedasticidad).
- 7- El valor de la prueba t para muestras independientes debe poseer un nivel de significancia mayor a 0.05 (Anexo 5).
- 8- Los valores de CV, desviación estándar, varianza y error estándar de la media deben ser los más cercanos a los valores del método utilizado en el laboratorio por la técnica de espectrofotometría UV-VIS.
- 9- Utilizar como mínimo un nivel de confianza del 95% y tan solo un 5% de error en equivocarnos para que el modelo y resultados sean válidos estadísticamente.

*Fuente: (Elaboración propia, 2019)*

## ANEXO 9

### Estadístico de Durbin-Watson - Puntos críticos de $d_L$ y $d_u$ al nivel de significación del 5%.

| n  | $k^* = 1$ |       | $k^* = 2$ |       | $k^* = 3$ |       | $k^* = 4$ |       | $k^* = 5$ |       | $k^* = 6$ |       |
|----|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
|    | $d_L$     | $d_u$ | $d_L$     | $d_u$ | $d_L$     | $d_u$ | $d_L$     | $d_u$ | $d_L$     | $d_u$ | $d_L$     | $d_u$ |
| 6  | 0.610     | 1.400 |           |       |           |       |           |       |           |       |           |       |
| 7  | 0.700     | 1.356 | 0.467     | 1.896 |           |       |           |       |           |       |           |       |
| 8  | 0.763     | 1.332 | 0.559     | 1.777 | 0.368     | 2.287 |           |       |           |       |           |       |
| 9  | 0.824     | 1.320 | 0.629     | 1.699 | 0.455     | 2.128 | 0.296     | 2.588 |           |       |           |       |
| 10 | 0.879     | 1.320 | 0.697     | 1.641 | 0.525     | 2.016 | 0.376     | 2.414 | 0.243     | 2.822 |           |       |
| 11 | 0.927     | 1.324 | 0.658     | 1.604 | 0.595     | 1.928 | 0.444     | 2.283 | 0.316     | 2.645 | 0.203     | 3.005 |
| 12 | 0.971     | 1.331 | 0.812     | 1.579 | 0.658     | 1.864 | 0.512     | 2.177 | 0.379     | 2.506 | 0.268     | 2.832 |
| 13 | 1.010     | 1.340 | 0.861     | 1.562 | 0.715     | 1.816 | 0.574     | 2.094 | 0.445     | 2.390 | 0.328     | 2.692 |
| 14 | 1.045     | 1.350 | 0.905     | 1.551 | 0.767     | 1.779 | 0.632     | 2.030 | 0.505     | 2.296 | 0.389     | 2.572 |
| 15 | 1.077     | 1.361 | 0.946     | 1.543 | 0.814     | 1.750 | 0.685     | 1.977 | 0.562     | 2.220 | 0.447     | 2.472 |
| 16 | 1.106     | 1.371 | 0.982     | 1.539 | 0.857     | 1.728 | 0.734     | 1.935 | 0.615     | 2.157 | 0.502     | 2.388 |
| 17 | 1.133     | 1.381 | 1.015     | 1.536 | 0.897     | 1.710 | 0.779     | 1.900 | 0.664     | 2.104 | 0.554     | 2.318 |
| 18 | 1.158     | 1.391 | 1.046     | 1.535 | 0.933     | 1.696 | 0.820     | 1.872 | 0.710     | 2.060 | 0.603     | 2.257 |
| 19 | 1.180     | 1.401 | 1.074     | 1.536 | 0.967     | 1.685 | 0.859     | 1.848 | 0.752     | 2.023 | 0.649     | 2.206 |
| 20 | 1.201     | 1.411 | 1.100     | 1.537 | 0.998     | 1.676 | 0.894     | 1.828 | 0.792     | 1.991 | 0.692     | 2.162 |
| 21 | 1.221     | 1.420 | 1.125     | 1.538 | 1.026     | 1.669 | 0.927     | 1.812 | 0.829     | 1.964 | 0.732     | 2.124 |
| 22 | 1.239     | 1.429 | 1.147     | 1.541 | 1.053     | 1.664 | 0.958     | 1.797 | 0.863     | 1.940 | 0.769     | 2.090 |
| 23 | 1.257     | 1.437 | 1.168     | 1.543 | 1.078     | 1.660 | 0.986     | 1.785 | 0.895     | 1.920 | 0.804     | 2.061 |
| 24 | 1.273     | 1.446 | 1.188     | 1.546 | 1.101     | 1.656 | 1.013     | 1.775 | 0.925     | 1.902 | 0.837     | 2.035 |
| 25 | 1.288     | 1.454 | 1.206     | 1.550 | 1.123     | 1.654 | 1.038     | 1.767 | 0.953     | 1.886 | 0.868     | 2.012 |
| 26 | 1.302     | 1.461 | 1.224     | 1.553 | 1.143     | 1.652 | 1.062     | 1.759 | 0.979     | 1.873 | 0.897     | 1.992 |
| 27 | 1.316     | 1.469 | 1.240     | 1.556 | 1.162     | 1.651 | 1.084     | 1.753 | 1.004     | 1.861 | 0.925     | 1.974 |
| 28 | 1.328     | 1.476 | 1.255     | 1.560 | 1.181     | 1.650 | 1.104     | 1.747 | 1.028     | 1.850 | 0.951     | 1.958 |
| 29 | 1.341     | 1.483 | 1.270     | 1.563 | 1.198     | 1.650 | 1.124     | 1.743 | 1.050     | 1.841 | 0.975     | 1.944 |
| 30 | 1.352     | 1.489 | 1.284     | 1.567 | 1.214     | 1.650 | 1.143     | 1.739 | 1.071     | 1.833 | 0.998     | 1.931 |
| 31 | 1.363     | 1.496 | 1.297     | 1.570 | 1.229     | 1.650 | 1.160     | 1.735 | 1.090     | 1.825 | 1.020     | 1.920 |
| 32 | 1.373     | 1.502 | 1.309     | 1.574 | 1.244     | 1.650 | 1.177     | 1.732 | 1.109     | 1.819 | 1.041     | 1.909 |
| 33 | 1.383     | 1.508 | 1.321     | 1.577 | 1.258     | 1.651 | 1.193     | 1.730 | 1.127     | 1.813 | 1.061     | 1.900 |
| 34 | 1.393     | 1.514 | 1.333     | 1.580 | 1.271     | 1.652 | 1.208     | 1.728 | 1.144     | 1.808 | 1.080     | 1.891 |
| 35 | 1.402     | 1.519 | 1.343     | 1.584 | 1.283     | 1.653 | 1.222     | 1.726 | 1.160     | 1.803 | 1.097     | 1.884 |
| 36 | 1.411     | 1.525 | 1.354     | 1.587 | 1.295     | 1.654 | 1.236     | 1.724 | 1.175     | 1.799 | 1.114     | 1.877 |
| 37 | 1.419     | 1.530 | 1.364     | 1.590 | 1.307     | 1.655 | 1.249     | 1.723 | 1.190     | 1.795 | 1.131     | 1.870 |
| 38 | 1.427     | 1.535 | 1.373     | 1.594 | 1.318     | 1.656 | 1.261     | 1.722 | 1.204     | 1.792 | 1.146     | 1.864 |
| 39 | 1.435     | 1.540 | 1.382     | 1.597 | 1.328     | 1.658 | 1.273     | 1.722 | 1.218     | 1.789 | 1.161     | 1.859 |
| 40 | 1.442     | 1.544 | 1.391     | 1.600 | 1.338     | 1.659 | 1.285     | 1.721 | 1.230     | 1.786 | 1.175     | 1.854 |
| 45 | 1.475     | 1.566 | 1.430     | 1.615 | 1.383     | 1.666 | 1.336     | 1.720 | 1.287     | 1.776 | 1.238     | 1.835 |
| 50 | 1.503     | 1.585 | 1.462     | 1.628 | 1.421     | 1.674 | 1.378     | 1.721 | 1.335     | 1.771 | 1.291     | 1.822 |
| 55 | 1.528     | 1.601 | 1.490     | 1.641 | 1.452     | 1.681 | 1.414     | 1.724 | 1.374     | 1.768 | 1.334     | 1.814 |
| 60 | 1.549     | 1.616 | 1.514     | 1.652 | 1.480     | 1.689 | 1.444     | 1.727 | 1.408     | 1.767 | 1.372     | 1.808 |
| 65 | 1.567     | 1.629 | 1.536     | 1.662 | 1.503     | 1.696 | 1.471     | 1.731 | 1.438     | 1.767 | 1.404     | 1.805 |
| 70 | 1.583     | 1.641 | 1.554     | 1.672 | 1.525     | 1.703 | 1.494     | 1.735 | 1.464     | 1.768 | 1.433     | 1.802 |
| 75 | 1.598     | 1.652 | 1.571     | 1.680 | 1.543     | 1.709 | 1.515     | 1.739 | 1.487     | 1.770 | 1.458     | 1.801 |
| 80 | 1.611     | 1.662 | 1.586     | 1.688 | 1.560     | 1.715 | 1.534     | 1.743 | 1.507     | 1.772 | 1.480     | 1.801 |
| 85 | 1.624     | 1.671 | 1.600     | 1.696 | 1.575     | 1.721 | 1.550     | 1.747 | 1.525     | 1.774 | 1.500     | 1.801 |
| 90 | 1.635     | 1.679 | 1.612     | 1.703 | 1.589     | 1.726 | 1.566     | 1.751 | 1.542     | 1.776 | 1.518     | 1.801 |

## ABREVIATURAS

**CE o k:** Conductividad eléctrica

**$\Lambda_m$ :** Conductividad molar

**k<sub>i</sub>:** Conductividad eléctrica de un determinado ion

**$\Lambda_m^o$ :** Conductividad molar a dilución infinita

**$\lambda_+^o, \lambda_-^o$ :** Conductividad molar iónica a dilución infinita del catión y anión respectivamente.

**$\nu_+, \nu_-$ :** Número de cationes y aniones respectivamente por electrolito

**Cl<sup>-</sup>:** ion cloruro

**Ca<sup>+2</sup>:** ion calcio

**CGA:** Central Geotérmica de Ahuachapán

**EPI's:** Equipo de protección individual

**HDPE:** polietileno de alta densidad

**F:** Prueba de Fisher

**Gl, gl:** grados de libertad

**Sig. o p-valor:** Nivel de significancia

**B<sub>0</sub>, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub>:** Coeficientes o parámetros del modelo

**Y:** Variable dependiente

**X:** Variable independiente

**t:** Prueba t

**d<sub>u</sub>:** Valor crítico superior

**d<sub>L</sub>:** Valor crítico inferior

**DW o d:** Durbin-Watson

**UV-VIS:** Ultravioleta visible

**R:** Coeficiente de correlación de Pearson

**N:** tamaño de la muestra

**H<sub>0</sub>:** Hipótesis nula

**H<sub>1</sub>:** Hipótesis alternativa

**$\sigma$ :** Varianza

**CV:** Coeficiente de variación

**TDS:** Sólidos totales disueltos

**$\alpha$ :** Grado de disociación