

# CÁLCULO DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE LA ZONA DE PAUCARANI TACNA, MEDIANTE EL MÉTODO VOLUMÉTRICO

Rosmery Flores Jacobo, Diana Pajuelo  
Aparicio & Gastón Ronald Yupa Paredes





# CONTENIDO

**1. Introducción**

**2. Metodología Aplicada**

**3. Información Obtenida de Paucarani para el cálculo del Potencial Geotérmico**

**4. Resultados**

**5. Conclusiones**

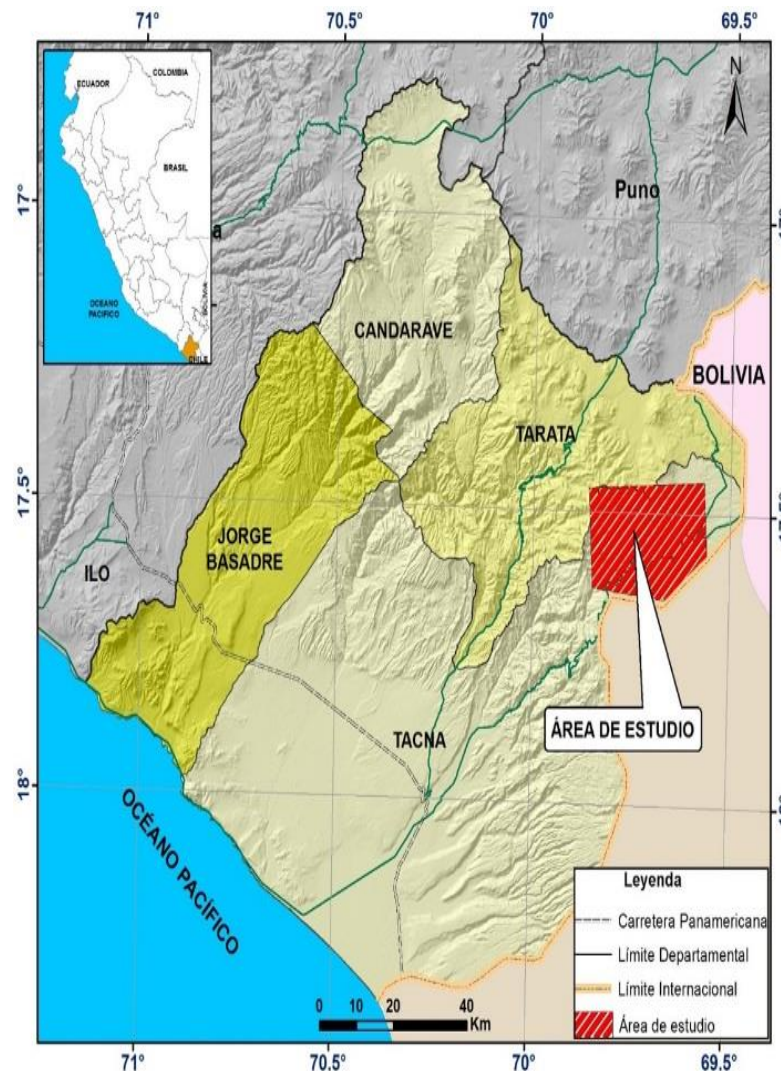


# 1. INTRODUCCIÓN

La zona geotermal de Paucarani está ubicada en la Cordillera Occidental de los Andes, al sur del Perú, forma parte de la cadena de montañas de origen volcánico denominada Cordillera del Barroso.

El área de estudio abarca 600 km<sup>2</sup> y se encuentra en el departamento de Tacna, distrito de Palca. Hidrográficamente, pertenece a la cuenca del río Uchusuma. Accesible desde Tacna – Palca.

El objetivo principal del estudio, es caracterizar y calcular el potencial geotérmico en la zona de Paucarani, mediante el método volumétrico.

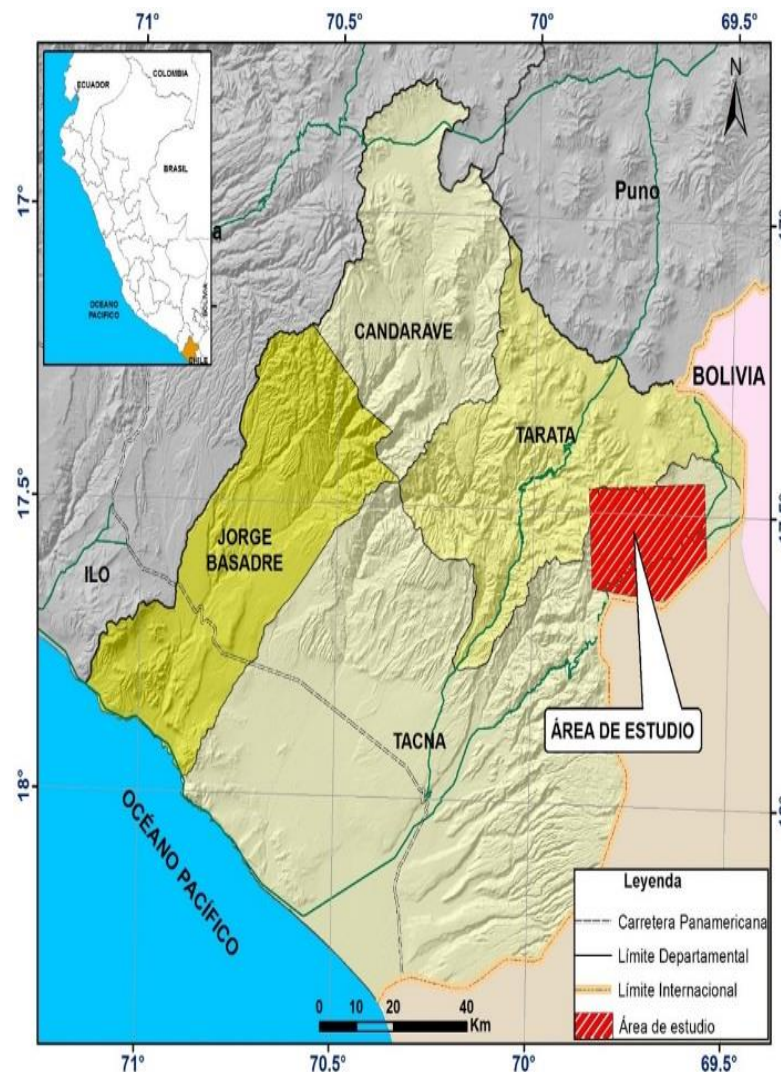




## 1.1 Estudios realizados:

Considerando los diferentes aspectos que involucra la geotermia se hace necesario la aplicación de diversas disciplinas que permitan caracterizar e interpretar el sistema geotérmico. Para el presente estudio se ha aplicado conocimientos de:

- Geología
- hidrogeología
- Geoquímica
- geofísica







## 1.2 Estudios de exploración para la zona geotérmica Paucarani

### Estudios de Geología

- Cartografiado de unidades litológicas
- Geología estructural

### Estudios de Hidrogeología

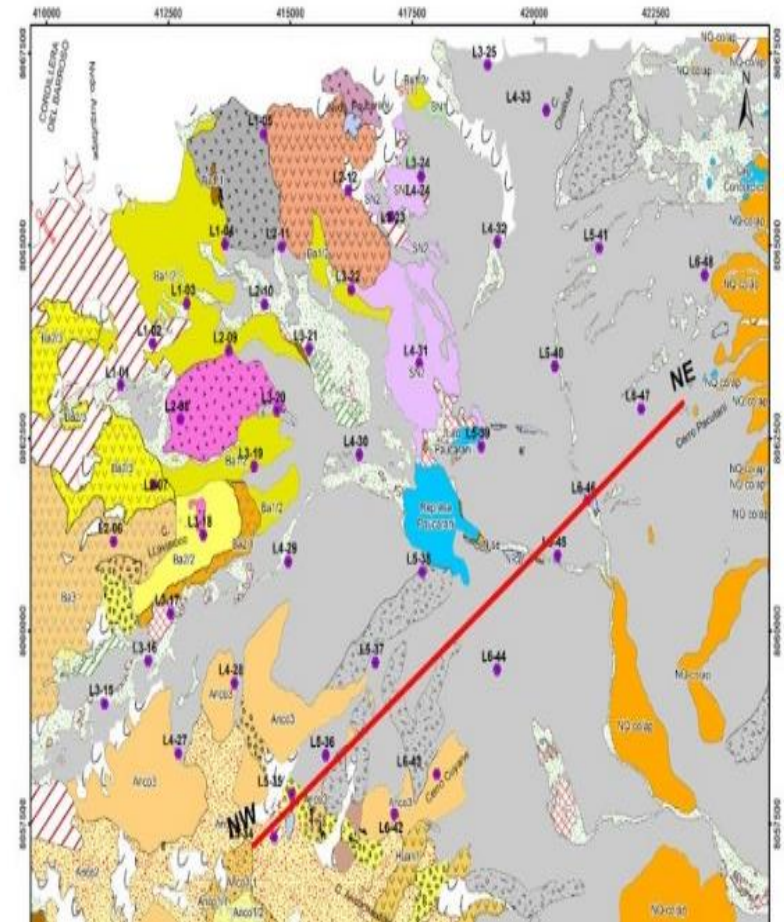
- Hidrología de Paucarani

### Estudios de Geoquímica

- Muestreo de aguas
- Determinación de parámetros físico-químicos en campo
- Análisis en Laboratorio

### Estudios de Geofísica

- Método Magnetotelurico
- Análisis e interpretación de Magnetometría Aérea.



Perfiles del Método Magnetotelurico



## 2. METODOLOGÍA APLICADA

### 2.1 Método Volumétrico

Se utilizo las siguientes ecuaciones para el cálculo de energía térmica en el reservorio de liquido dominante.

$$Q_T = Q_r + Q_w$$

**Donde:**

$Q_T$  = Energía térmica total  
(kJ/kg)

$Q_r$  = Calor en la roca (kJ/kg)

$Q_w$  = Calor en agua (kJ/kg)

$$Q_r = A \cdot h \cdot [P_r \cdot C_r \cdot (1 - \emptyset) \cdot (T_i - T_f)]$$

$$Q_w = A \cdot h \cdot [P_{wi} \cdot \emptyset \cdot S_w \cdot (H_{wi} - H_{wf})]$$

Los parámetros analizados son los siguientes:

$A$  = Área del reservorio ( $m^2$ )

$H$  = Espesor promedio del reservorio (m)

$P_r$ ,  $\rho_{hor}$  = Densidad de la roca a temperatura del reservorio ( $kg/m^3$ )

$P_{wi}$  = Densidad del agua a temperatura del reservorio ( $kg/m^3$ )

$C_r$  = Calor específico de la roca a condiciones de temperatura del reservorio (kJ/kg $^{\circ}K$ )

$\emptyset$  = porosidad

$S_w$  = saturación del agua

$T_i$  = Temperatura promedio del reservorio ( $^{\circ}C$ )

$T_f$  = Temperatura final o de abandono ( $^{\circ}C$ )

$H_{wi}$  = Agua a temperatura del reservorio (kJ/kg)

$H_{wf}$  = Entalpía final del agua a temperatura de abandono (kJ/kg)



## Cálculo del Potencial de energía o la capacidad de la planta.

$$P = \frac{(Q_T \cdot R_f \cdot C_e)}{P_f \cdot t}$$

### Donde:

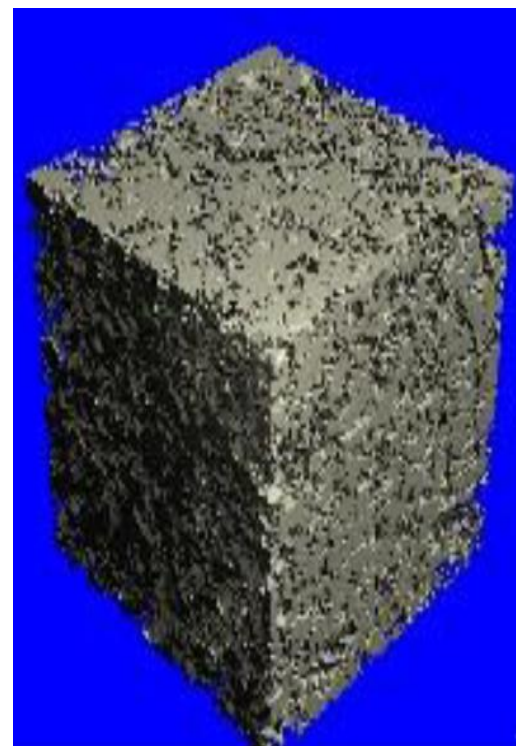
P = Potencial de Energía ( $MW_e$ )

$R_f$  = Factor de recuperación

$C_e$  = Coeficiente de eficiencia de conversión eléctrica

$P_f$  = Factor de planta

t = Tiempo en años (vida económica)

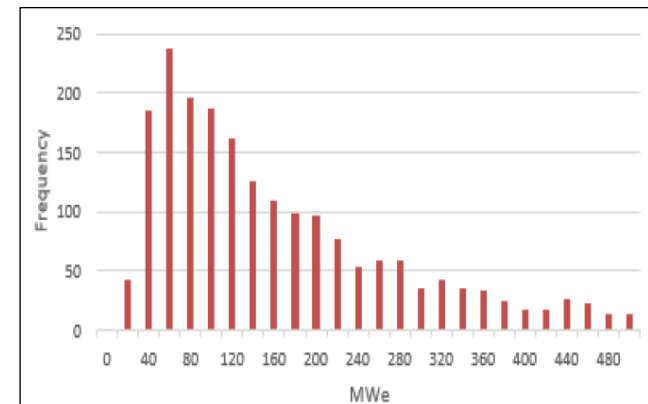
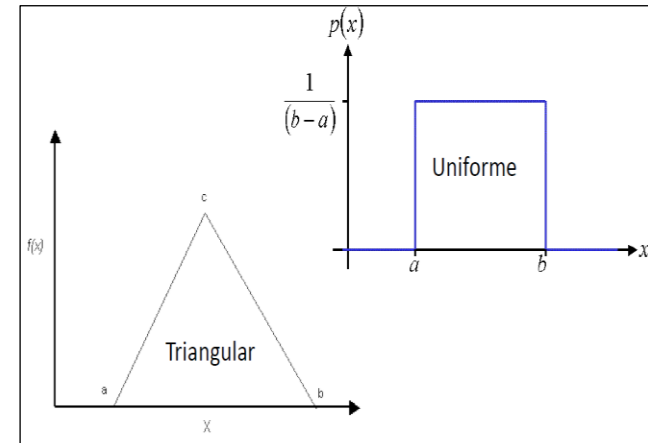


La energía que usamos se encuentra almacenada en la roca caliente



## 2.2 Técnica de simulación de Monte Carlo

- ✓ Es una técnica de simulación probabilística para evaluar reservas o recursos en la cual se mide los efectos de la incertidumbre.
- ✓ los parámetros reciben un rango de datos tomados al azar desde unos máximos a un mínimo, estos son seleccionados y calculados aleatoriamente.
- ✓ De acuerdo a la distribución de probabilidad, puede ser triangular o cuadrada.
- ✓ Estos se resuelven a lo largo de muchas interacciones.
- ✓ Mediante la estimación de los parámetros se puede obtener el potencial de generación de energía eléctrica en MW.
- ✓ Cabe destacar que un recurso inferido o probable sin perforaciones exploratorias es subcomercial y presenta baja certeza.



El resultado no es un valor puntual, es una distribución de probabilidad.

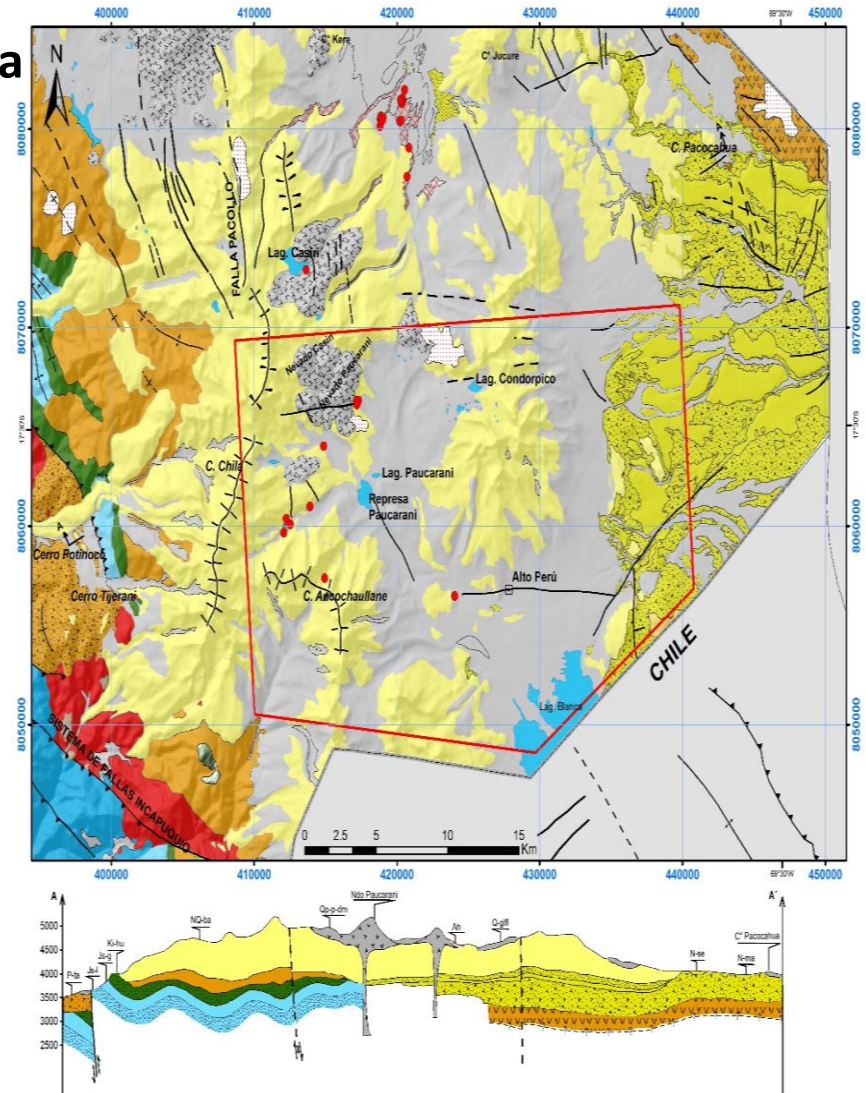




## 3. Información Obtenida de Paucarani para el cálculo del Potencial Geotérmico

### 3.1 Geología

- Conformado en su mayoría por rocas volcánicas andesitas del Grupo Barroso, y en menor cantidad por afloramientos de rocas volcánicas andesitas y dacíticas del Holoceno.
- De acuerdo al análisis geológico se determina como roca sello a las tobas soldadas de la Formación Sencca y como reservorio a las secuencias volcánicas del Grupo Maure.
- Las principales estructuras favorables para el emplazamiento de fluidos geotérmicos identificadas presentan dirección NE-SO

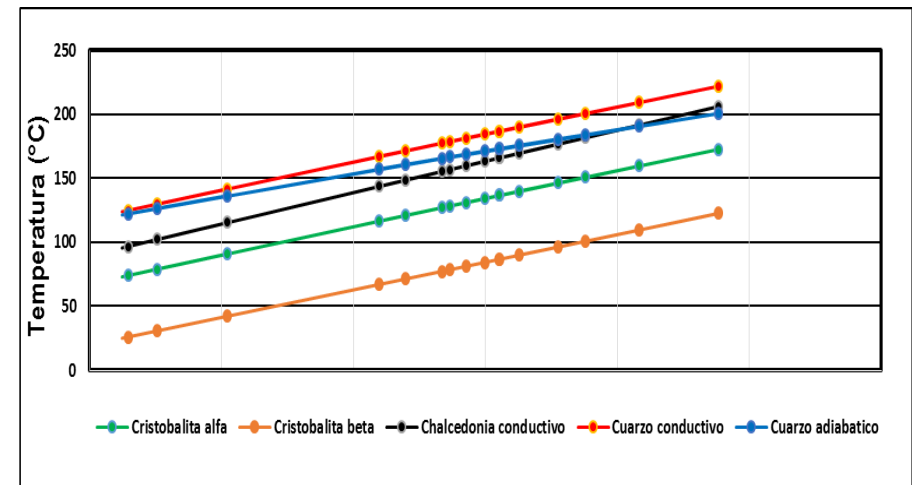




## 3.2 Geoquímica

### Temperatura del Reservorio

- La temperatura estimada para el sistema geotermal Paucarani, se realizó mediante los geotermómetros de sílice y catiónicos en fase líquida.
- Geotermómetros de sílice estimaron temperaturas menores a 221°C.
- Geotermómetros catiónicos determinaron temperaturas desde <120°C (K/Mg) y >260°C (Na-K-Ca).
- Sin embargo, los valores de los geotermómetros Na-K-Ca, podrían ser irreales por no alcanzar el equilibrio agua-roca; mientras que, los obtenidos con los geotermómetros K/Mg podrían ser aún válidas, al menos para el caso de aguas no muy ácidas y con elevado contenido de sulfato.

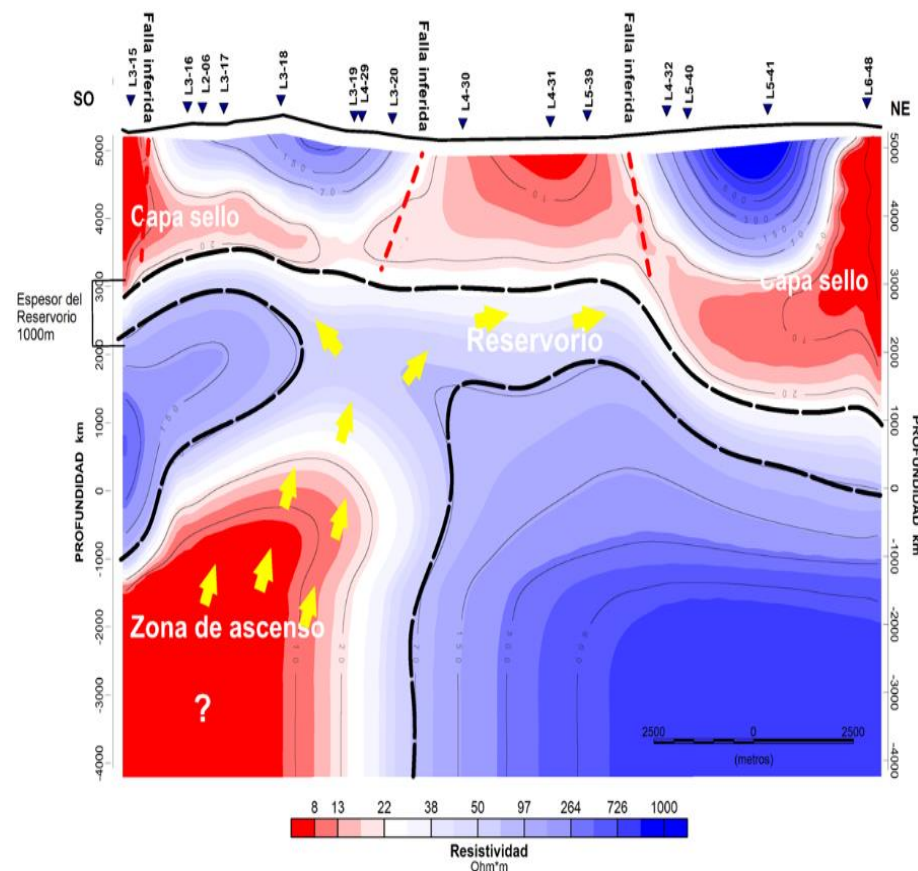


Temperaturas de geotermómetros de Sílice para las aguas termales asociadas al sistema geotermal Paucarani.



## 3.3 Geofísica

- Del análisis de los datos magnetotelúricos (MT), se detectó la presencia de una anomalía conductiva ( $< 10 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ ) desde la superficie hasta los 2000 metros de profundidad, relacionada con la capa sello (clay cap) con un espesor de 1200m.
- Una anomalía resistiva de  $8 \text{ Ohm}\cdot\text{m} - 70 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$  desde los 2000 metros hasta los 4000 metros de profundidad, vinculada posiblemente con el reservorio del sistema



Perfil de resistividad (método Magnetotelurico)

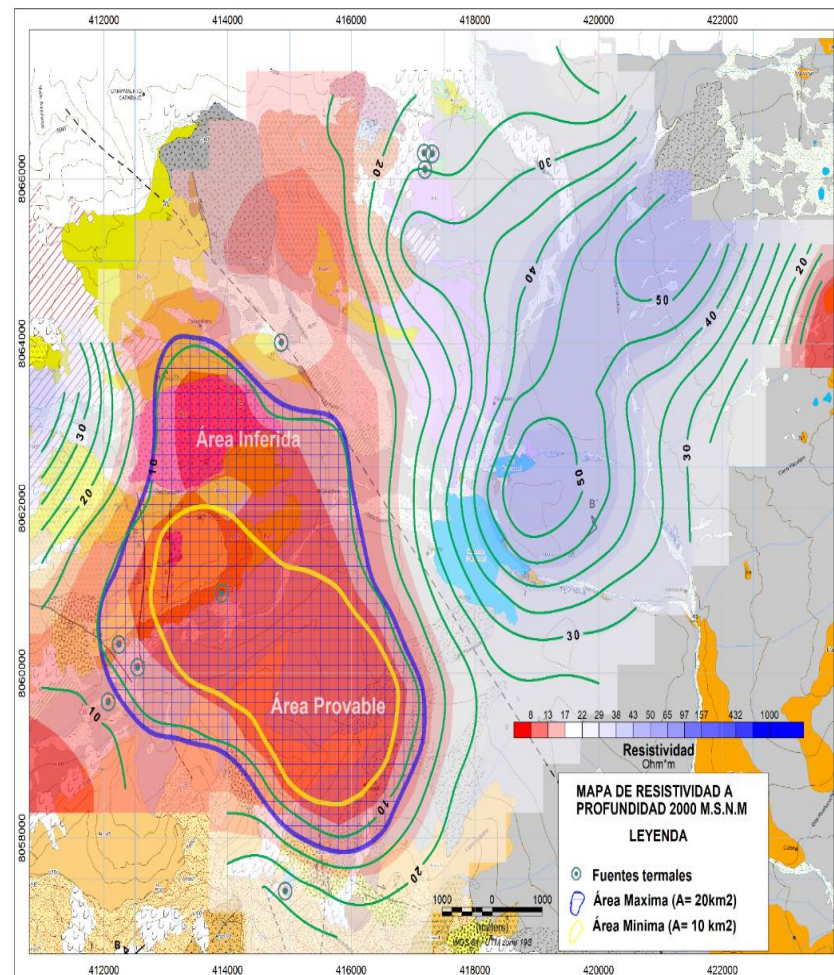




## 3.4. Tamaño del Recurso

Mediante el análisis de la información geoquímica, geológica y geofísica se define:

- Área mínima de 10km<sup>2</sup> considerando resistividades menores a 7 ohm\*m y las fuentes con valores maximos de temperatura. así como alteraciones hidrotermales argílica y argílica avanzada.
- Área máxima de 20km<sup>2</sup> considerando resistividades menores a 10 ohm\*m







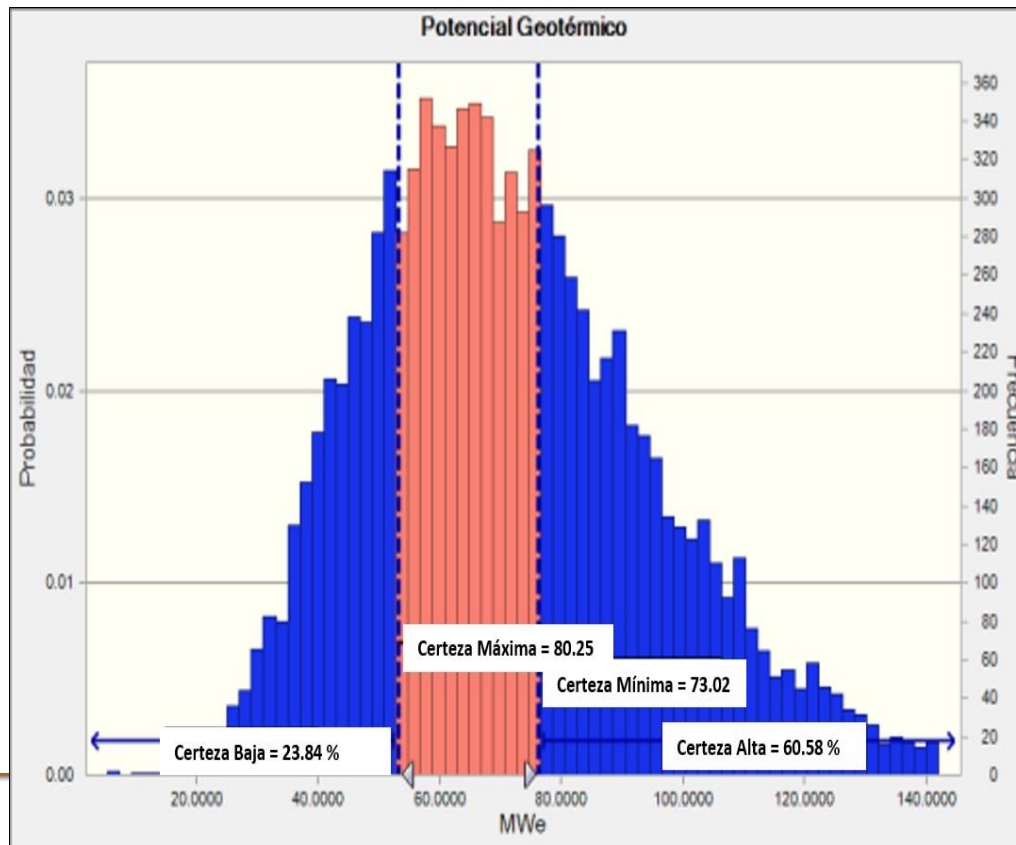
### 3.5 Parámetros para la estimación del potencial geotérmico

Parámetros		Mínima	Promedio	Máxima	Unidades	
Área	A	10	18	20	km2	Geofísica
Espesor de Reservorio	h	800	1000	1200	m	Geofísica
Calor Específico de la Roca	Cr	0.9	0.9	0.9	kJ/kg deg(C)	Tablas Teóricas
Calor Específico del Fluido	Cf	4.2	4.2	4.8	kJ/kg deg(C)	Tablas Teóricas
Porosidad de la Roca	phi	0.1	0.1	0.1		Tipo de Roca, característico de Geotermia
Temperatura Media del Reservorio	Ti	124	180	221	deg(C)	Geoquímica
Temperatura de Abandono del Reservorio	Tf		90		deg(C)	Asumido
Densidad de la Roca	rhorr	2200	2300	2400	kg/m3	Tablas a partir del tipo de Roca
Densidad del Fluido	rhof		926		kg/m3	Tablas Teóricas
Factor de Recuperación del Calor	Rf	0.1	0.15	0.1	adim	Característico de Geotermia
Eficiencia de Conversión	Ce	0.1	0.1	0.15	adim	Tablas Teóricas
Factor de Planta	Pf	0.9	0.95	0.9	adim	Asume
Tiempo	t	25	25	25	years	Asume



## 4. RESULTADOS

El cálculo del potencial geotérmico se realizó con el software Crystal Ball mediante simulaciones, ejecutando 10,000 iteraciones para determinar valores probabilísticos que puede tener el potencial del recurso, respecto al área definido. Los valores estimados por combinaciones aleatorias de parámetros están dados en función de la confiabilidad de combinación aleatoria.



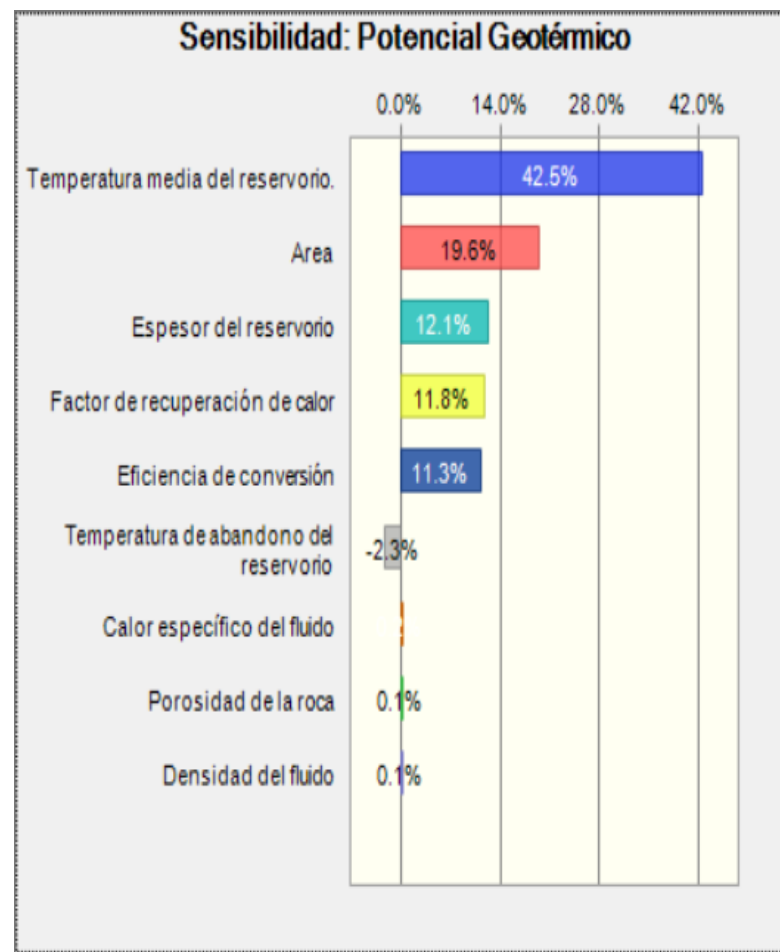
### Resultados Obtenidos

Pruebas	10,000
Caso base	73.0116
Media	72.0314
Mediana	68.9501
Modo	---
Desviación estándar	25.0293
Varianza	626.4666
Sesgo	0.7435
Curtosis	3.95
Coefficiente de variación	0.3475
Mínimo	5.2832
Máximo	212.3652
Ancho de rango	207.0820
Error estándar medio	0.2503



## 4. RESULTADOS

- Las variable con mayor sensibilidad como son la Temperatura del reservorio con 42.5%, el Area con 19.6% y el espesor del reservorio con 12.1% representan los escenarios mas pesimistas en mediciones de la incertidumbre del potencial geotérmico





# CONCLUSIONES

- Para la zona geotermal Paucarani se aplicó el método volumétrico para evaluar las reservas considerando información de exploración superficial y teniendo en cuenta un reservorio geotérmico de tipo líquido.
- Los resultados indican para un área mínima de 10km<sup>2</sup> dentro del sistema geotérmico Paucarani, existe la probabilidad del 62% de aprovechar un potencial geotérmico de 72.03 MW eléctricos.
- Las variables más sensibles son, la temperatura del reservorio con 42.5% y el área con 19.6%.