PERÚ | Ministerio de Energía y Minas | Instituto Geológico Minero y Metalúrgico - INGEMMET

INGEMMET

Estudio Geotérmico del Campo Calientes

Boletín N° 48 Serie C
Geodinámica e Ingeniería Geológica

Por:

Víctor Vargas Rodríguez
Vicentina Cruz Pauccara
Yanet Antayhua Vera
Marco Rivera Porras

Lourdes Cacya Dueñas

West JEC
West Japan Engineering Consultants, Inc.

Lima, Perú
2012

PERÚ | Ministerio de Energía y Minas | Instituto Geológico Minero y Metalúrgico - INGEMMET

INGEMMET

Estudio Geotérmico del Campo Calientes

Boletín N° 48 Serie C
Geodinámica e Ingeniería Geológica

Por:

Víctor Vargas Rodríguez
Vicentina Cruz Pauccara
Yanet Antayhua Vera
Marco Rivera Porras

Lourdes Cacya Dueñas

West JEC
West Japan Engineering Consultants, Inc.

Lima, Perú
2012

SERIE C: GEODINÁMICA E INGENIERÍA GEOLÓGICA,
N° 48, 2012

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú
N° 2012-09215
Razón Social: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico
(INGEMMET)
Domicilio: Av. Canadá N° 1470, San Borja, Lima-Perú
Primera Edición, INGEMMET 2012
Se terminó de imprimir el 17 de agosto del año 2012 en los

© **INGEMMET**
Derechos Reservados. Prohibida su reproducción

Presidente del Consejo Directivo: Susana Vilca
Secretario General: Wens Silvestre

Comité Editor: Susana Vilca, Lionel Fídel, Víctor Carlotto,
Humberto Chirif, Giovanna Alfaro

Dirección encargada del estudio: Dirección de Geología
Ambiental y Riesgo Geológico

Unidad encargada de edición: Unidad de Relaciones
Institucionales.

Correción Geocientífica: Enrique Lina, Koji Matsuda
Digitalización y SIG: Víctor Vargas, Samuel Lu
Corrección gramatical y de estilo: Glenda Escajadillo
Diagramación: Zoila Solis

Portada: Manifestaciones Geotermales

Referencia bibliográfica
Vargas, V., Cruz, V., Antayhua, Y., Rivera, M., Cacya, L. & West, J.
(2012) - Estudio geotérmico del campo Calientes. *INGEMMET*,
Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 48, 71 p.,
7 mapas.

Contenido

RESUMEN **1**

INTRODUCCIÓN **3**

CAPÍTULO I
GENERALIDADES 5

CAPÍTULO II
GEOLOGÍA 15

CAPÍTULO III
GEOFÍSICA 23

CAPÍTULO IV
HIDROGEOLOGÍA 29

CAPÍTULO V
GEOQUÍMICA 37

CAPÍTULO VI
MODELO DE LA ESTRUCTURA GEOTÉRMICA 47

CAPÍTULO VII
FACTIBILIDAD DE DESARROLLO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA EN EL PERÚ 53

CAPÍTULO VIII
CONCLUSIONES 59

BIBLIOGRAFÍA **61**

ANEXO 1: INVENTARIO DE MANIFESTACIONES GEOTERMALES **63**

RESUMEN

El Campo Geotermal Calientes está ubicado en la Cordillera Occidental del sur del Perú, en el distrito y provincia de Candarave, departamento de Tacna. Ubicado a 4400 msnm, presenta un clima frío y seco (fuerte insolación en el día y temperaturas bajas en las noches). La flora presente en el campo es bastante pobre, las especies más representativas son los queñuales y las yaretas. La precipitación promedio anual es de 167.4 mm para un registro de 43 años (1964-2006). En el periodo 1964-2002, la temperatura promedio es 9.6 ºC.

En el Campo Calientes existe una cadena volcánica con rumbo NW-SE, y en medio de esta se encuentra un valle ligeramente ancho, controlado por un sistema de fallas que a su vez controlan la presencia de las manifestaciones geotermales de la zona.

El Campo Calientes está caracterizado por la presencia de diferentes sistemas volcánicos y estructuras tectónicas con dirección predominante NE-SO. En el extremo oeste del valle se distingue el complejo volcánico Yucamane-Calientes-Yucamane Chico constituido principalmente por flujos de lava, domos de lava y algunos remanentes de flujos piroclásticos, mientras que en el extremo este se localiza una cadena de complejos superpuestos que han presentado actividad posiblemente hace más de 4 Ma, con los volcanes López Extraña y Choreveco. La litología predominante son lavas andesíticas con algunas intercalaciones de lavas porfiríticas y secuencias de flujos piroclásticos. Los depósitos holocénicos corresponden a depósitos aluviales, coluviales y bofedales, conformados por acumulaciones de gravas, arenas y limos retrabajados, que principalmente se encuentran rellenando los actuales cauces de quebradas y ríos. En el curso medio y superior del valle del río Calientes afloran depósitos de sínter, asociados a la presencia de fuentes termales. Mientras que la mayoría de los depósitos de bofedales están localizados en quebradas y están constituidos principalmente de sedimentos saturados de agua.

En Calientes, la estructura regional geológica se caracteriza por la presencia de una falla estructural con tendencia NO-SE, que se dirige en dirección paralela a la cordillera y las cadenas volcánicas. Los volcanes ubicados alrededor del Campo Geotérmico Calientes están alineados en dirección NE-SO, lo que implica la existencia de una falla estructural con la misma orientación. En general, el sistema estructural de Calientes se puede resumir en lineamientos con tendencia NE-SO, los cuales se extienden a lo largo del río Calientes. Asimismo, en la parte norte del valle se localizan muchas fuentes termales paralelas al río. Además, se han identificado fallas con dirección N-S, las cuales definen el curso del río en la parte sur del valle. Asimismo, el análisis de imágenes satelitales indica la presencia de una falla de rumbo NNO-SSE.

En profundidades de 100 y 200 m, la exploración geofísica ha permitido identificar zonas de baja resistividad aparente, menores de 10 ohm-m y con dirección NE-SO. Sin embargo, a medida que se incrementa la profundidad, la resistividad aparente aumenta. Las resistividades aparentes de 10 a 20 se distribuyen en la zona central de investigación y con orientación NO-SE. En profundidades mayores de 2000 y 2500 m, la resistividad aparente aumenta considerablemente. Los valores de resistividad mayores a 25 ohm-m abarcan los extremos este y sureste, y los valores relativamente menores a 25 ohm-m se observan principalmente en el extremo noroeste de dicha discontinuidad. La investigación a 2500 m de profundidad muestra una distribución de la resistividad más uniforme, con valores entre 30 y 100 ohm-m.

La caracterización hidrogeológica en Calientes ha permitido diferenciar cuatro tipos de estas unidades: un acuífero fisurado sedimentario, acuíferos fisurados volcánicos (manantiales con caudales de hasta 5 L/s)), acuífero poroso no consolidado (manantiales con caudales superiores a 25 L/s) y acuitardos. Asimismo, se han inventariado alrededor de 110 manifestaciones geotermales (fuentes de agua y de vapor), donde las temperaturas varían entre 35 y 90 ºC. La mayoría de las fuentes termales presentan aguas alcalinas, lo cual origina un aumento del pH del río Calientes luego de su confluencia con las fuentes.

Para la evaluación geoquímica del campo Calientes se muestrearon 9 puntos de control entre fuentes termales y frías, y agua del río. Los resultados químicos obtenidos de las aguas muestreadas fueron ploteados en el diagrama de Langelier, donde se observa que las aguas de los manantiales se agrupan dentro de las aguas del tipo cloruradas sódicas o alcalinas. Asimismo, el diagrama ternario de Cl-SO_4-HCO_3 muestra que las aguas se agrupan dentro de las aguas cloruradas profundas, típico de fluidos geotérmicos profundos que se encuentran generalmente en sistemas de

elevadas temperaturas; es decir, son característicos de áreas que contienen calor. Usando el diagrama binario B-Cl se observa que las aguas de la zona de Calientes presentan elevada concentración de boro y alta relación en la proporción B/Cl, lo que podría indicar que en niveles profundos hay una reacción del agua con las rocas sedimentarias marinas. La geotermometría química en fase líquida permitió estimar que la temperatura del recurso geotérmico a 2000 m de profundidad, es superior a 200°C.

De acuerdo al análisis de los resultados de la exploración geológica, geofísica y geoquímica, se determinó el modelo conceptual del Campo Geotérmico de Calientes, el cual está determinado por la estructura geológica (tipos de rocas así como fallas regionales y locales), la estructura del reservorio (estimando las zonas permeables e impermeables que facilitan la formación del reservorio geotérmico) y la estructura térmica (referida a determinar el origen de la fuente de calor así como la temperatura del fluido geotermal).

Finalmente se indica la importancia del desarrollo de la geotermia en el Perú mencionando valía por ser una energía altamente confiable, autóctona y que da estabilidad a la balanza económica; asimismo la geotermia es considerada una de las energías más limpias en el mercado y su desarrollo contribuye a su vez con el desarrollo local de diversas maneras.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el mayor potencial geotérmico se asocia a una discontinua cadena de centros volcánicos de edad del Plioceno-Cuaternario, que forman parte del dominio del Cinturón de Fuego del Pacífico que se inicia en Indonesia y Filipinas, se extiende al Japón, el extremo norte de EE.UU., Centroamérica, Ecuador, Perú y Chile.

El proceso de subducción entre la placa de Nazca y la Sudamericana ha controlado a lo largo del tiempo la evolución geológica del territorio peruano desde el Mesozoico hasta la actualidad, originando complejos procesos magmáticos y tectónicos, relacionados directamente con el desarrollo de ambientes geotérmicos.

El Perú se halla localizado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, caracterizado por la ocurrencia de movimientos sísmicos, fenómenos tectónicos y elevada concentración de flujo calorífico geotermal, especialmente en la zona volcánica del sur del país. La energía geotérmica, que tiene manifestaciones visibles en diversas zonas del país, podría constituir una alternativa importante para incrementar la oferta energética relativamente limpia. Teniendo esto en consideración, el potencial geotérmico del país comienza a ser evaluado a partir del inventario de fuentes termales realizado por INGEMMET en el año 1973 (más de 300 fuentes con temperaturas que van desde 16 hasta 92 ºC). En la zona sur se observa en superficie la presencia de aguas termales, fumarolas y géiseres que ponen en evidencia la presencia en profundidad de una fuente de calor latente.

Luego de un análisis de los resultados en base a la interpretación geológica, a la ocurrencia de las manifestaciones termales con la tectónica y el emplazamiento de magmatismo joven, se priorizaron las siguientes regiones (Fig. 1):

- *Región I*: Cajamarca
- *Región II*: Callejón de Huaylas
- *Región III*: Churín
- *Región IV*: Central
- *Región V*: Eje volcánico del Sur
- *Región VI*: Puno-Cuzco.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro especial agradecimiento al Japan Bank for International Cooperation (JBIC) puesto que este proyecto forma parte de un trabajo conjunto realizado con WEST Japan Engineering Consultants, Phoenix Geophysics Limited de Canadá e INGEMMET. Agradecemos a todas estas instituciones por el apoyo y las enseñanzas. Asimismo, queremos destacar el importantísimo apoyo recibido por la colaboración desinteresada de los pobladores de Candarave y zonas aledañas al campo. Gracias, amigos.

Queremos agradecer también a todos los trabajadores de INGEMMET, quienes participaron en las diferentes etapas de elaboración y publicación del presente estudio.

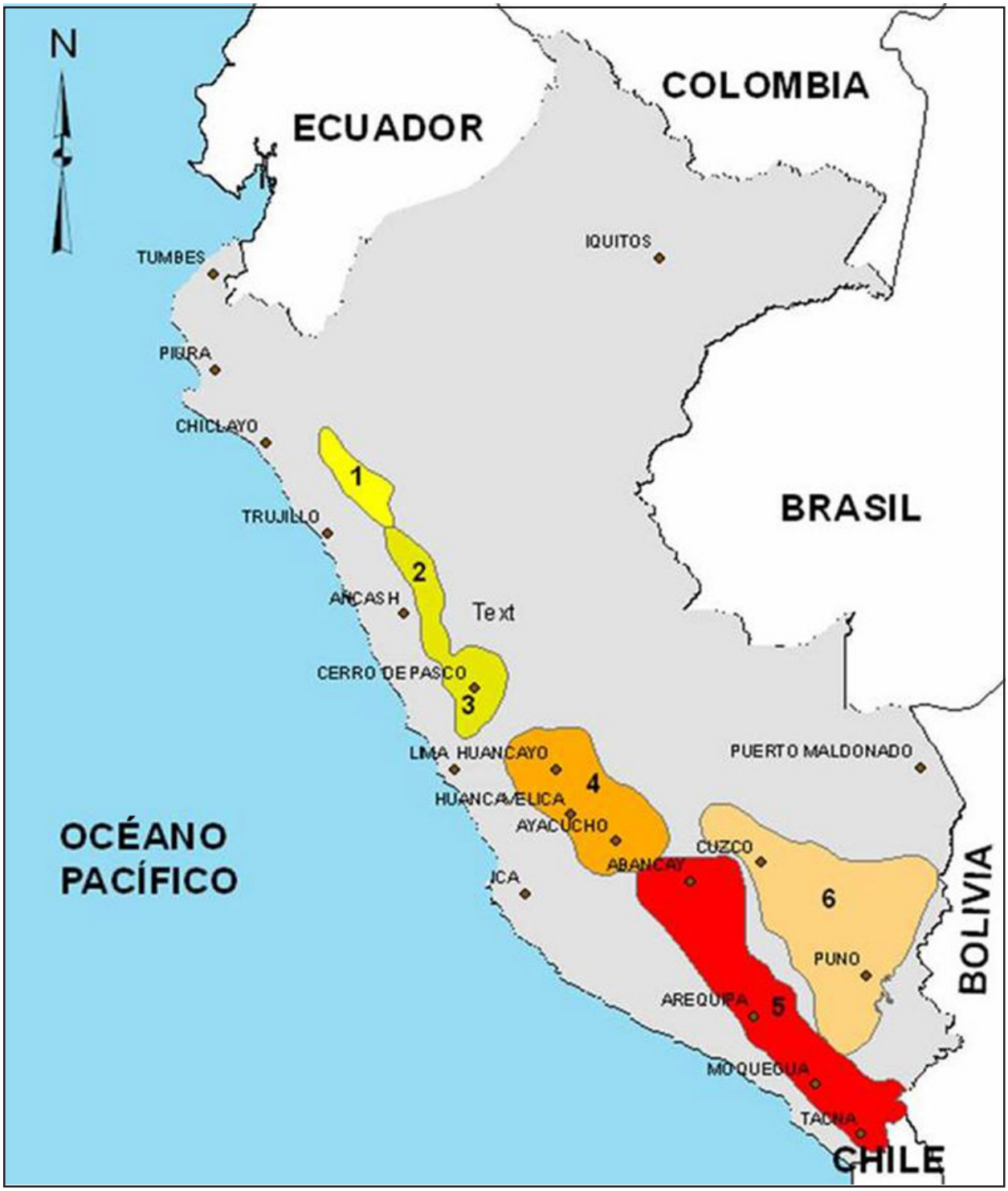

Fig. 1. Regiones geotermales del Perú (Cossío y Vargas, 1979).

CAPÍTULO I
GENERALIDADES

El estudio del Campo Geotermal Calientes pretende ser el punto de partida para la realización de investigaciones que puedan brindar información general sobre el potencial geotérmico del país.

OBJETIVO

Realizar la caracterización geotérmica del campo Calientes en base al conocimiento geológico, geoquímico, geofísico e hidrogeológico, definiendo el modelo de la estructura geotérmica.

METODOLOGÍA

a) Gabinete: Esta parte del trabajo se dividió en dos etapas:

- Recopilación de información sobre las características hidrológicas, geológicas, geoquímicas y cartográficas. También se recopiló datos de investigaciones geotérmicas en el Perú. Se realizó la fotointerpretación de la zona de estudio y se elaboraron mapas preliminares, así como se planificó el trabajo de campo.
- Luego de las salidas de campo se procesó y analizó la información obtenida en campo, y se interpretaron los resultados del análisis de laboratorio. Finalmente se preparó el informe final y los respectivos mapas.

b) Campo: La exploración geotérmica se realizó en base a:

- ***Exploración geológica:*** Usando como base el mapeo realizado por INGEMMET (escalas 1:100000 y 1:50000) se elaboró un nuevo mapa geológico a mayor detalle (1:25000), para lo cual se usaron fotografías aéreas, imágenes satelitales Aster y Landsat.
- ***Exploración geoquímica:*** La geoquímica es un medio útil para determinar si un sistema geotérmico es de agua o de vapor dominante, evaluar la temperatura mínima esperada en profundidad, estimar la homogeneidad del abastecimiento de agua para inferir las características químicas de los fluidos profundos, y para determinar la fuente de recarga del agua.

  También se obtiene información valiosa acerca del tipo de problemas que pueden surgir durante la etapa de reinyección y de utilización de la planta (cambios en la composición del fluido, corrosión e incrustación de los ductos y en los equipos de la planta, impacto ambiental) y cómo evitarlos o aminorarlos.

  Los estudios geoquímicos consisten en el muestreo y análisis químicos y/o isotópicos de agua y gas de las manifestaciones termales (fuentes termales, fumarolas, etc.), o de pozos del área en estudio.

  Esta metodología brinda información que permite planificar la exploración. Además, dado que sus costos son relativamente bajos en comparación con otros métodos exploratorios más sofisticados, como los métodos geofísicos, las técnicas geoquímicas deberían ser utilizadas en la mayor medida posible antes de avanzar con otras metodologías más costosas.
- ***Exploración hidrogeológica:*** Se caracterizó el campo geotermal definiendo las principales unidades hidrogeológicas y sus características. También se realizó el inventario de las principales manifestaciones geotermales, así como los principales manantiales de agua fría que afloran en la zona.
- ***Exploración geofísica:*** Técnica orientada a obtener desde la superficie los parámetros físicos de las formaciones geológicas en profundidad. En el Campo Calientes se utilizó el método magnetotelúrico.

FISIOGRAFÍA

Ubicación geográfica

El Campo Geotermal Calientes está ubicado en la Cordillera Occidental del sur del Perú, y pertenece políticamente al distrito y provincia de Candarave, departamento de Tacna.

El área de estudio tiene una extensión total de 224 km^2, donde la zona principal de investigación está localizada en la parte central de la cuenca del río Calientes, el cual es afluente del río Locumba (Fig. 2).

Se accede a la zona de estudio por la carretera afirmada Tacna-Tarata-Candarave, desde Moquegua por la carretera Binacional, y por carretera afirmada desde el poblado de Locumba.

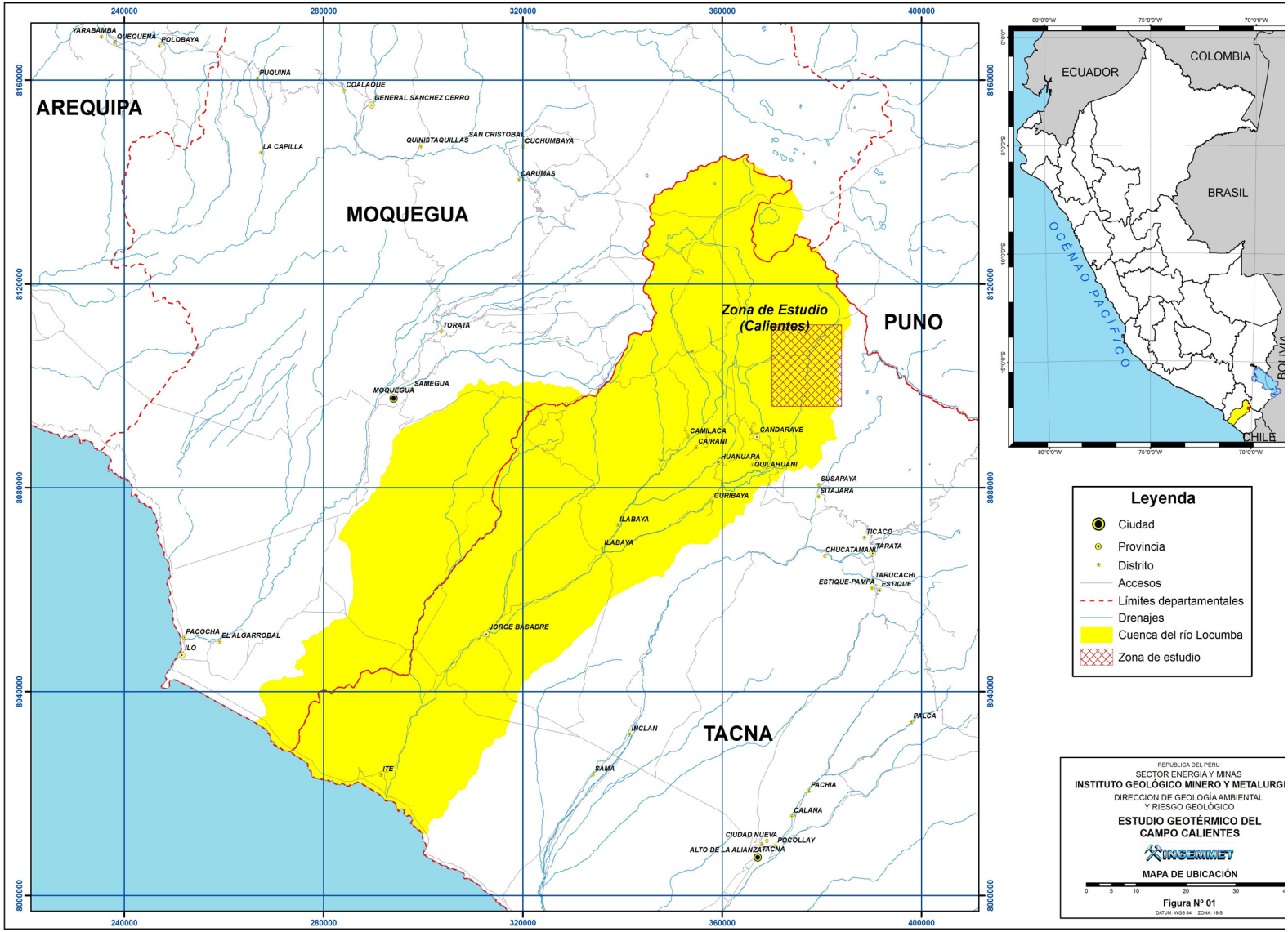

Fig. 2. Mapa de ubicación del Campo Geotermal Calientes.

Clima

Debido a su ubicación geográfica (4400 msnm), la zona de estudio está caracterizada por clima frío y seco, con fuerte insolación en el día y temperaturas bajas en las noches.

Las precipitaciones son principalmente lluvias, aunque también hay granizadas y nevadas, siendo los meses de enero a marzo en los que se registran las mayores precipitaciones.

La humedad está ligada al factor altitudinal, por eso a medida que se asciende los valores de humedad disminuyen, razón por la cual los valores son bajos en la zona de Calientes.

Vegetación

La composición florística es bastante pobre, predominando extensas áreas ralas de suelos desnudos y pedregosos hasta afloramientos rocosos. Las especies más representativas son los queñuales, que se encuentran en el flanco sur del volcán Yucamane, mientras que en los afloramientos de rocas se observan yaretas (Fig. 3). Asimismo, abunda el pastizal denominando ichu en toda la zona del valle.

Fig. 3. Vista de yareta en el valle Calientes.

MORFOLOGÍA

Cadena volcánica

Es una cadena de conos de volcanes-entre los que destacan los volcanes de Yucamane y Calientes-con rumbo NO-SE y un ancho máximo de 10 km. Los conos volcánicos (Fig. 4) se hallan fuertemente erosionados por la glaciación pleistocénica.

Valle

El valle Calientes presenta corto ensanchamiento en su parte norte (0.8 km) y hacia su extremo sur se manifiesta en su punto más extenso con un ancho aproximado de 2 km (Mapa 1).

En el centro del valle se puede observar la presencia del río Calientes así como numerosas manifestaciones geotermales, entre fuentes termales y fuentes de vapor (Fig. 5). Luego de un recorrido de sur a norte de unos 7 km, el valle cambia a la dirección NE-SO debido al control estructural existente en la zona.

Asimismo, las quebradas afluentes al río Calientes tienden a formar pequeños valles, los cuales son usados por los pobladores de zonas aledañas para la ganadería, como en las quebradas Coline, Challepiña y Chuñahua, entre otras (Fig. 6).

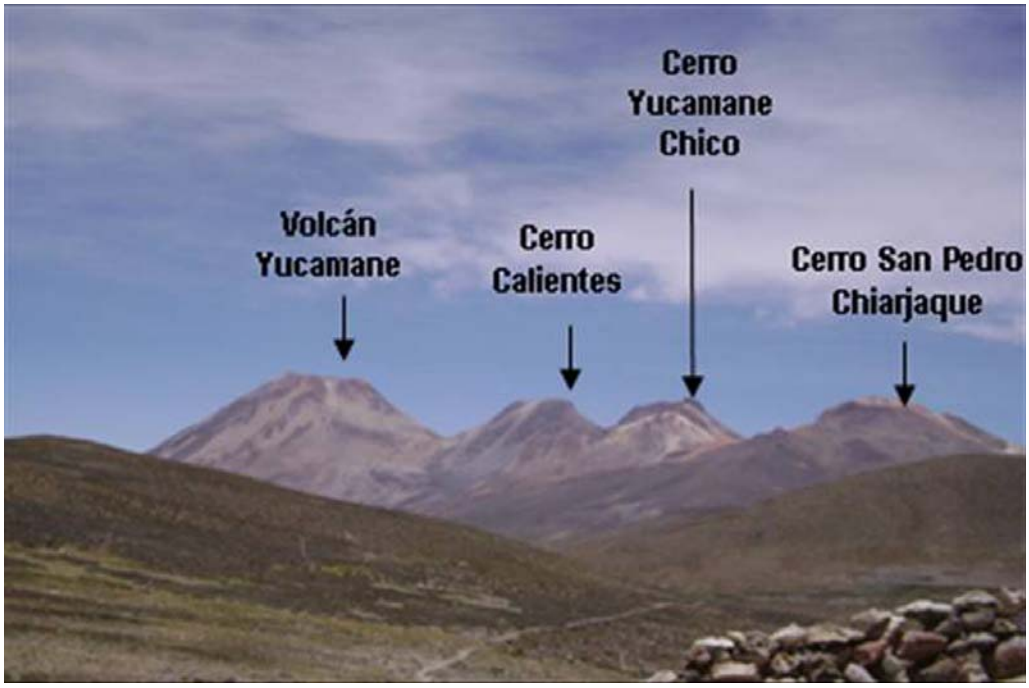

Fig. 4. Vista de la parte suroeste de la cadena volcánica en el sector Calientes.

Fig. 5. Vista de las manifestaciones geotermales en el valle Calientes.

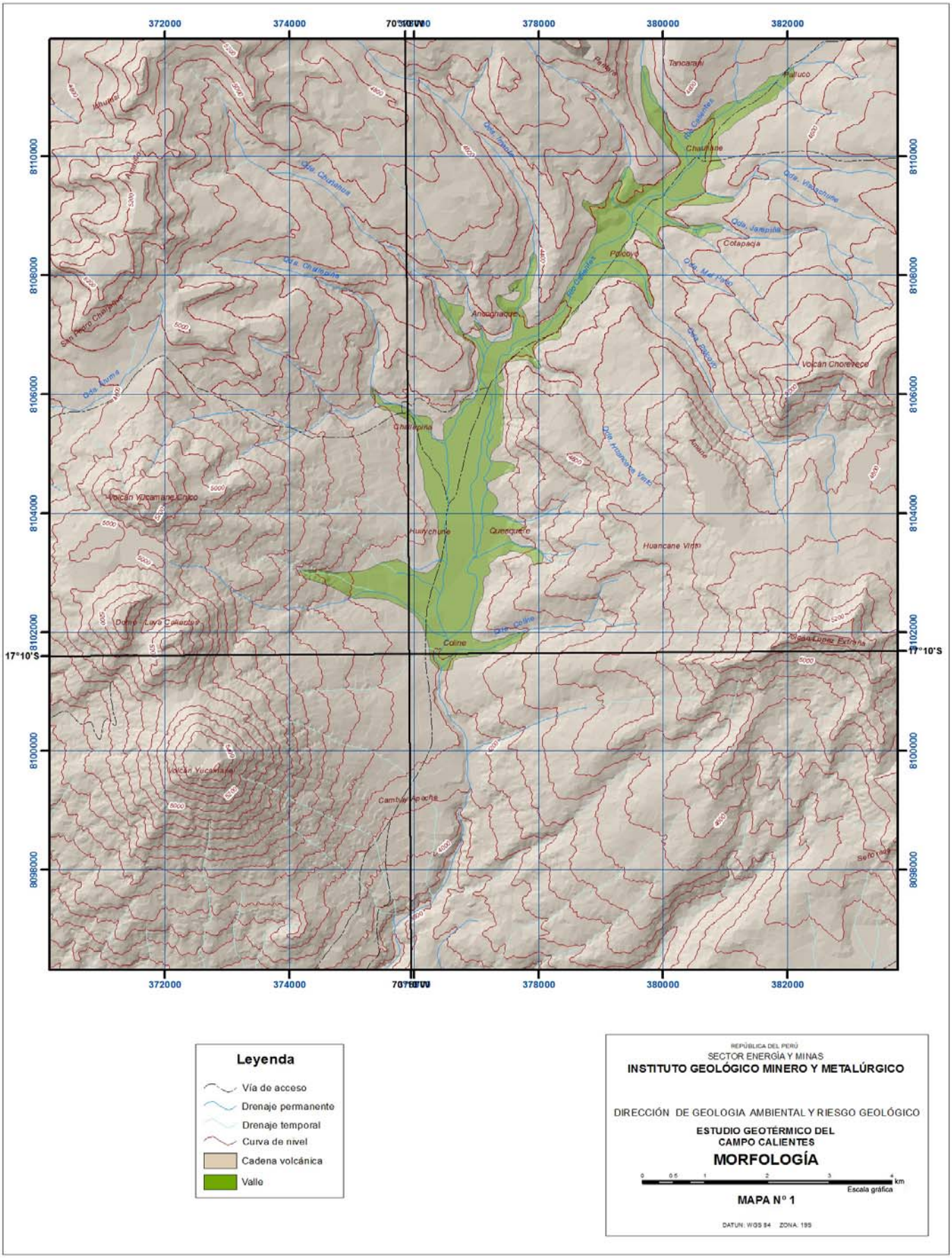
372000
374000
378000
380000
382000
8110000
8108000
8106000
8104000
8102000
8100000
8098000
17°10'S
Tancarani
Palluco
Chaullane
Cotapacja
Palcoyo
Ancoghaque
Volcán Chorevece
Chalapiña
Huarychune
Quesquere
Huancane Vinto
Coline
Volcán Yucamane Chico
Volcán Yucamane
Cambay Apache
Leyenda
Vía de acceso
Drenaje permanente
Drenaje temporal
Curva de nivel
Cadena volcánica
Valle
REPÚBLICA DEL PERÚ
SECTOR ENERGÍA Y MINAS
INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO Y METALÚRGICO
DIRECCIÓN DE GEOLOGIA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO
ESTUDIO GEOTÉRMICO DEL CAMPO CALIENTES
MORFOLOGÍA
0 0.5 1 2 3 4 km
Escala gráfica
MAPA N° 1
DATUN: WGS 84 ZONA: 19S

Fig. 6. Vistas del valle Calientes. La foto de la izquierda muestra la parte sur del valle en el sector de Challepiña, mientras que la de la derecha es una vista de la parte norte en el sector de Chaullane.

HIDROLOGÍA

Para la descripción de los parámetros hidrológicos más importantes se han tomado los datos proporcionados por SENAMHI a través de la Estación Candarave, la estación meteorológica más cercana.

Precipitación

Según los datos de precipitación recopilados (Fig. 7), en el registro histórico de 43 años (1964-2006), la precipitación máxima fue de 225,1 mm (febrero de 2001), con tendencia a precipitaciones nulas en algunos meses del año (mayo a octubre). La precipitación media anual en la zona es de 167,4 mm, lo que indica que es una zona de precipitación baja.

Temperatura

De los datos registrados durante el periodo 1964-2002 (sin datos para los años 1987, 1991 y 1992), se observa que las temperaturas fluctúan entre 6 y 13 ºC, registradas en junio y febrero respectivamente (Fig. 8). La temperatura media anual es de 9,6 ºC.

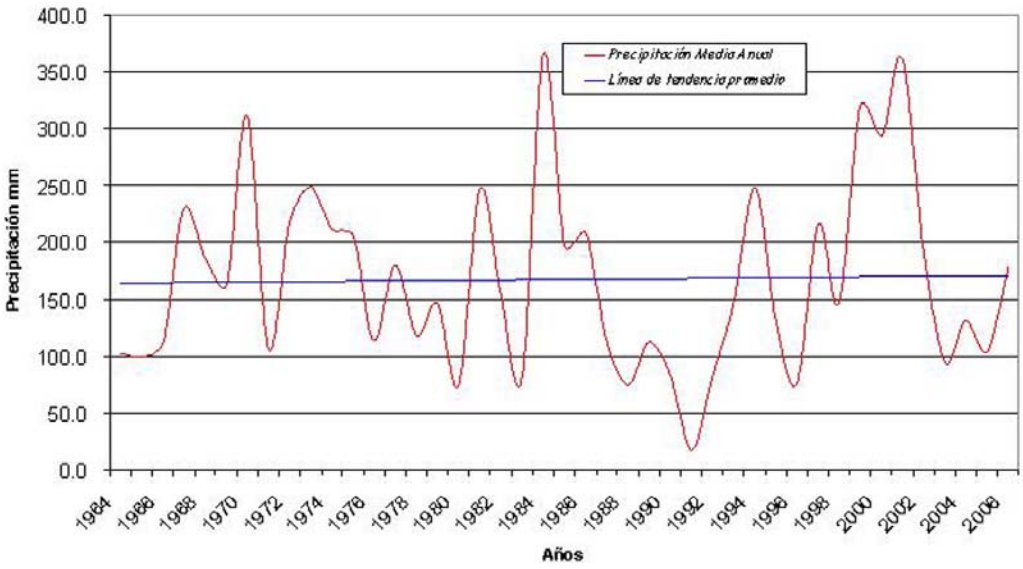

Fig. 7. Variación de la precipitación total anual.

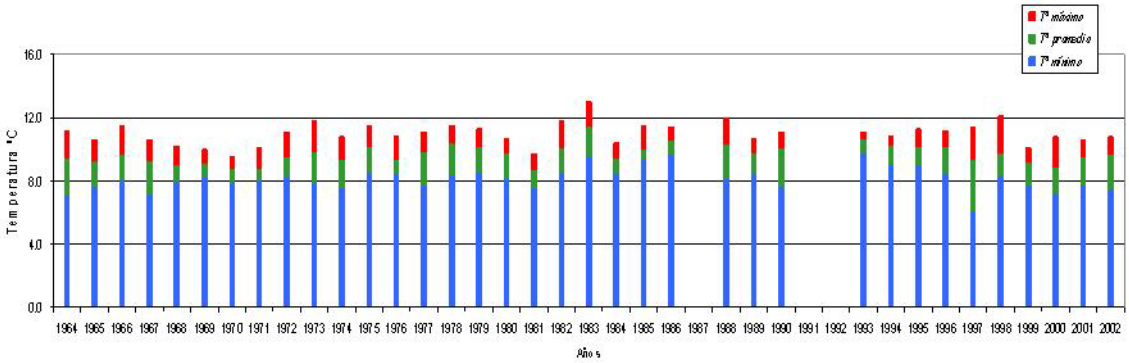

Fig. 8. Variación de la temperatura media anual.

Evaporización

El registro de la evaporación medida entre los años 1996 y 2003, muestra valores máximos hasta de 176,7 mm entre los meses de junio a diciembre y valores mínimos hasta de 37,7 mm entre los meses de enero a mayo (Fig. 9). El promedio anual de evaporación para este registro es de 124,8 mm.

Humedad relativa

La máxima humedad relativa se registró entre los meses de enero y marzo con un valor de 90 %, mientras que las mínimas se dan entre los meses de junio a agosto con valores hasta de 25 %; esto hace que durante el año podamos diferenciar dos temporadas, una húmeda y otra seca (Fig. 10). El promedio anual de humedad para un periodo de 25 años (1964-2002, sin registro en los años 1967-1971, 1977-1982, 1991, 1992, 1999) es de 55,1 %.

Heliofonía

La heliofonía fue medida en las horas de luz y se observó que las mínimas horas de luz coinciden con los meses de lluvias, es decir entre enero y marzo, con valores mínimos hasta de 7,3; mientras que las máximas con valores de 16,0 se presentan entre los meses de agosto a noviembre. La heliofonía media anual es de 12 horas de luz, según el registro desde 1964 a 1986 (23 años, Fig. 11).

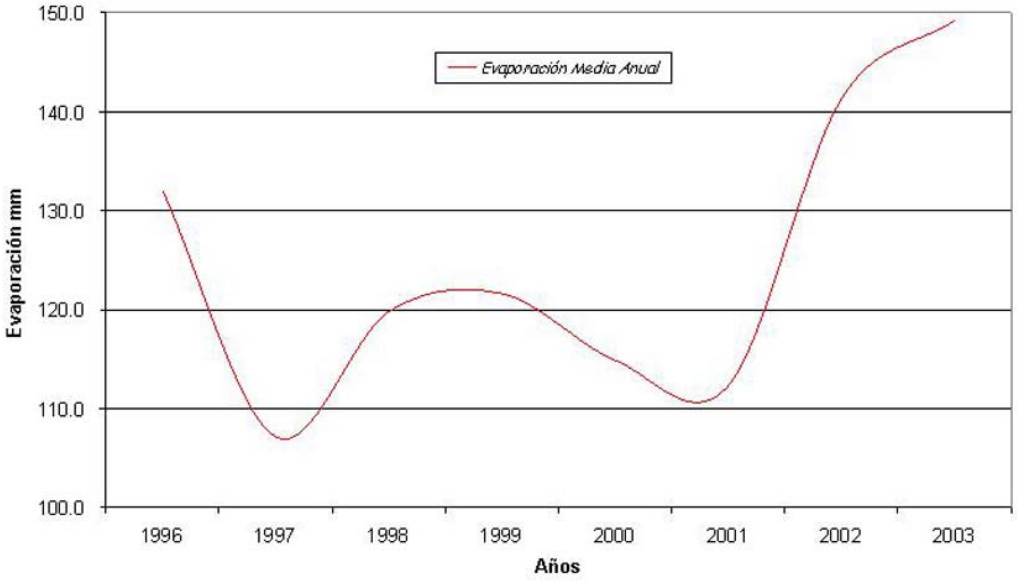

Fig. 9. Variación de la evaporación para un periodo de 8 años.

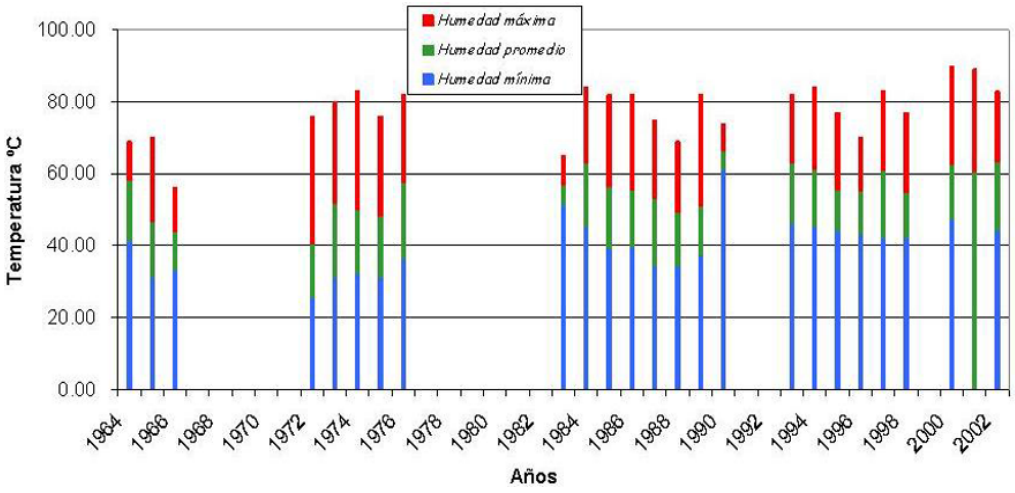

Fig. 10. Variación de las máximas y mínimas de humedad relativa.

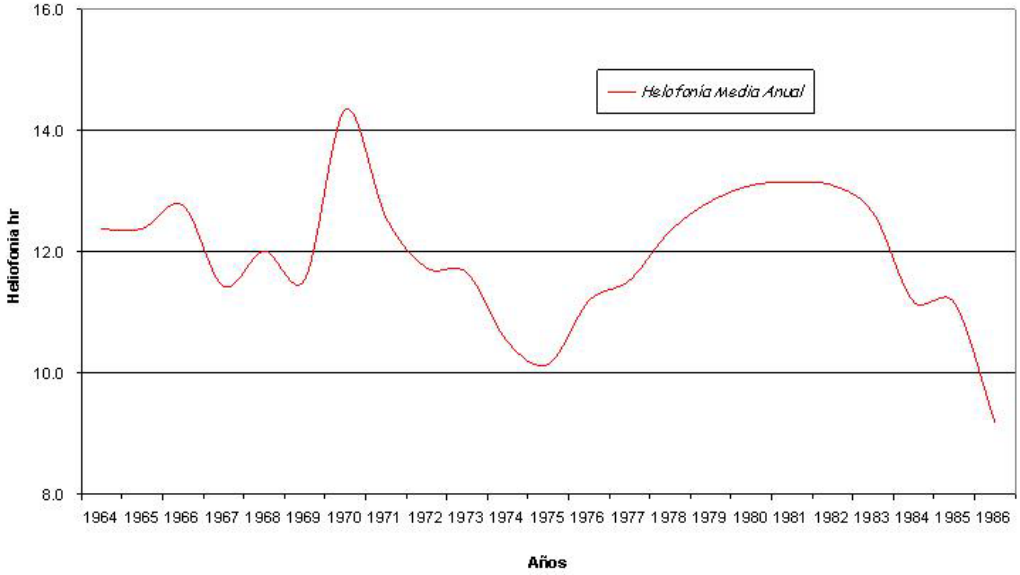

Fig. 11. Variación de heliofonia para un periodo de 23 años.

Dirección y velocidad de viento

En la zona de estudio, las direcciones de viento predominantes son SE y SSE, con velocidades máximas de hasta 4 m/s; ellas fueron registradas entre los meses de mayo y septiembre. En la Fig. 12 se observa la variación de las velocidades máximas, mínima y promedios para un registro de 24 años. En la Fig. 13 se han graficado las direcciones de viento predominantes en la zona de estudio.

Escorrentia superficial

El aforo del río Calientes (Fig. 14) fue realizado el 19 de julio del 2007, luego de su confluencia con todas las fuentes termales del valle, y arrojó un caudal de 257,40 L/s (0,25 m^3/s).

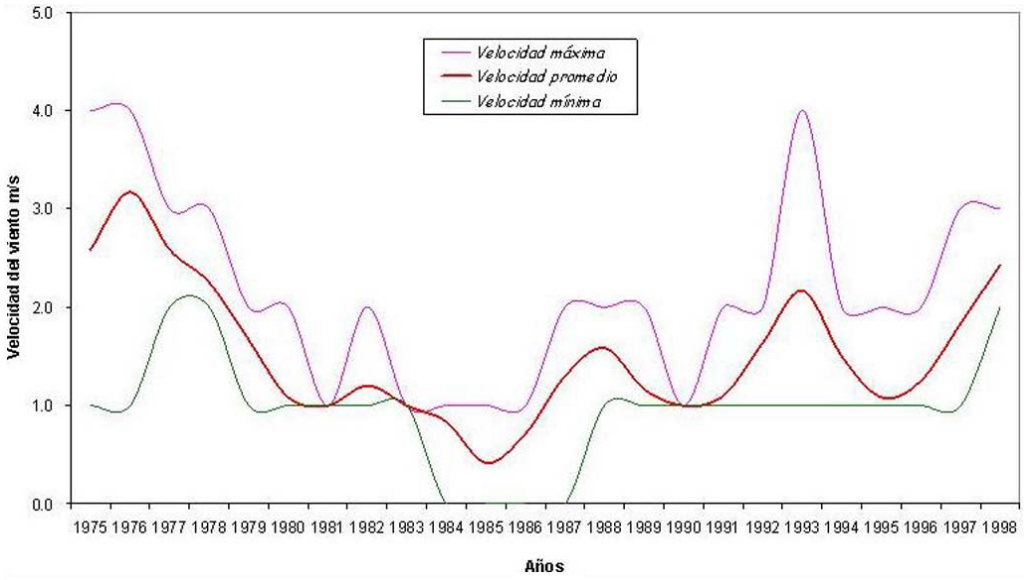

Fig. 12. Variación de la velocidad del viento.

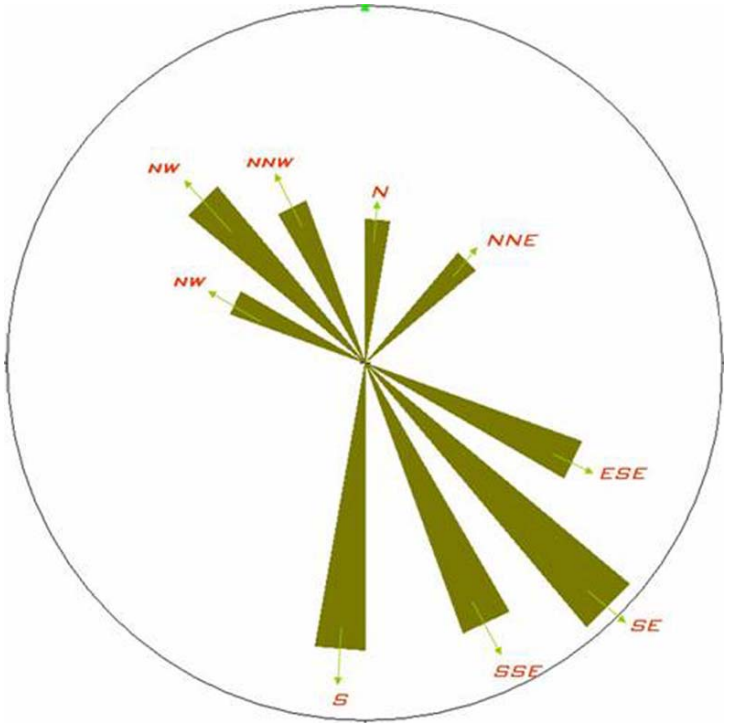

Fig. 13. Diagrama de rosas donde se observan las diferentes direcciones del viento.

Fig. 14. Aforo del río Calientes (junio del 2007) cerca del sector de Huancane Vinto.

CAPÍTULO II
GEOLOGÍA

INTRODUCCIÓN

El potencial geotérmico del campo Calientes está relacionado con su ubicación a lo largo del borde activo de la placa continental, donde la placa Nazca está subduciéndose bajo la placa Sudamericana. Este proceso ha generado actividad magmática asociada a altos flujos de calor, que van desde el Jurásico hasta la actualidad, a lo largo del flanco oeste de los Andes peruanos (Steinmuller, 2001).

Las rocas del basamento en la zona sur de la Cordillera Volcánica del Perú son de edad Mesozoica. El componente mesozoico consiste de unidades estratigráficas de edades del Jurásico medio al Cretáceo, conteniendo rocas silicoclásticas, carbonatadas y volcánicas. El componente Cenozoico consiste principalmente de rocas volcánicas y volcanoclásticas del Paleoceno al Pleistoceno (Steinmüller, 2001).

Las estructuras geológicas regionales están dentro de las líneas de tendencia NO-SE que comprenden la posición de los principales volcanes en el área sur de la Cordillera Volcánica. Además de esas características andinas, existen líneas de tendencia NE-SO, las cuales forman bloques estructurales (Steinmuller, 2001).

ESTRATIGRAFÍA

El cartografiado geológico de los diferentes sistemas volcánicos y estructuras geológicas ubicadas en el sector Calientes muestra la presencia de dos cadenas de volcanes alineados, con dirección SW-NE, en medio de los cuales se localiza el valle del río Calientes. En el extremo oeste del valle se distingue al complejo volcánico Yucamane-Calientes-Yucamane Chico, mientras que en el extremo este se distingue una cadena de complejos volcánicos constituida por varios volcanes superpuestos, alineados en dirección SO-NE, que estuvieron en actividad posiblemente hace más de 4 Ma. Entre los complejos volcánicos destacan los volcanes López Extraña y Choreveco.

Plioceno

Volcán Concave: Los depósitos ligados a este volcán están localizados dentro del área de estudio. Entre los depósitos cartografiados se distinguen lavas andesíticas de textura porfírica con fenocristales de plagioclasa, piroxeno y óxidos, cubiertos por depósitos de flujos piroclásticos de cenizas soldadas. Las lavas están dispuestas en capas que miden entre 40 a 60 m de espesor.

Volcanes Chuchuaura y San Pedro: Lavas y depósitos de flujos piroclásticos asignados al extinto volcán Chuchuaura se distinguen en el extremo noroeste del área de estudio. Las lavas son andesitas de textura porfírica con fenocristales de plagioclasa y piroxeno. Ellas están cubiertas por depósitos de flujos piroclásticos de cenizas cohesivas de color gris, parcialmente erosionados y visibles en la quebrada Chunahue (Fig. 15). En el extremo sur del volcán Chuchuaura se encuentra otro denominado San Pedro, compuesto por lavas porfíricas semialteradas de grano medio, con plagioclasa y anfíbol. Los espesores actuales de este depósito de flujo varían entre 20 a 40 m, pudiendo ser mayor durante su emplazamiento. Por la disposición de los depósitos se asume que la actividad de ambos probablemente fue contemporánea.

Complejo volcánico López Extraña-Ichurasi: Se encuentra localizado en el extremo sureste del área, siguiendo un lineamiento de dirección SO-NE. Está constituido principalmente por flujos de lava andesíticos que miden entre 40 y 80 m de espesor y que tienen entre 10° a 20° de inclinación (Fig. 16). Hemos distinguido tres tipos de lavas: aquellas que están en la base del volcán son masivas y de textura porfírica, presentan fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita. Ellas están cubiertas por lavas andesíticas que contienen fenocristales de plagioclasa y piroxenos dispuestos en niveles de 10 a 20 m de espesor. Finalmente en la parte superior del edificio volcánico se distinguen lavas andesíticas con pendientes de 10 a 15° hacia el suroeste, algunas con importante alteración hidrotermal.

Complejo volcánico Choreveco: Se encuentra localizado en el extremo noreste del área. Está constituido por varios niveles de flujos de lava andesíticas que miden entre 40 y 60 m de espesor. Nosotros hemos distinguido tres tipos de lavas emplazadas en diversas etapas. Las lavas más antiguas tienen composición andesítica y textura porfírica, y contienen fenocristales de plagioclasa y piroxenos. Ellas están cubiertas por lavas andesíticas que contienen fenocristales de plagioclasa, anfíbol y piroxeno. Todas estas lavas son cubiertas por lavas andesíticas porfíricas que contienen fenocristales de plagioclasa y biotita.

Fig. 15. Lavas andesíticas con fenocristales de plagioclasa, piroxenos, y minerales opacos pertenecientes al volcán Chuchuaura. Aflora en la margen derecha del río Calientes.

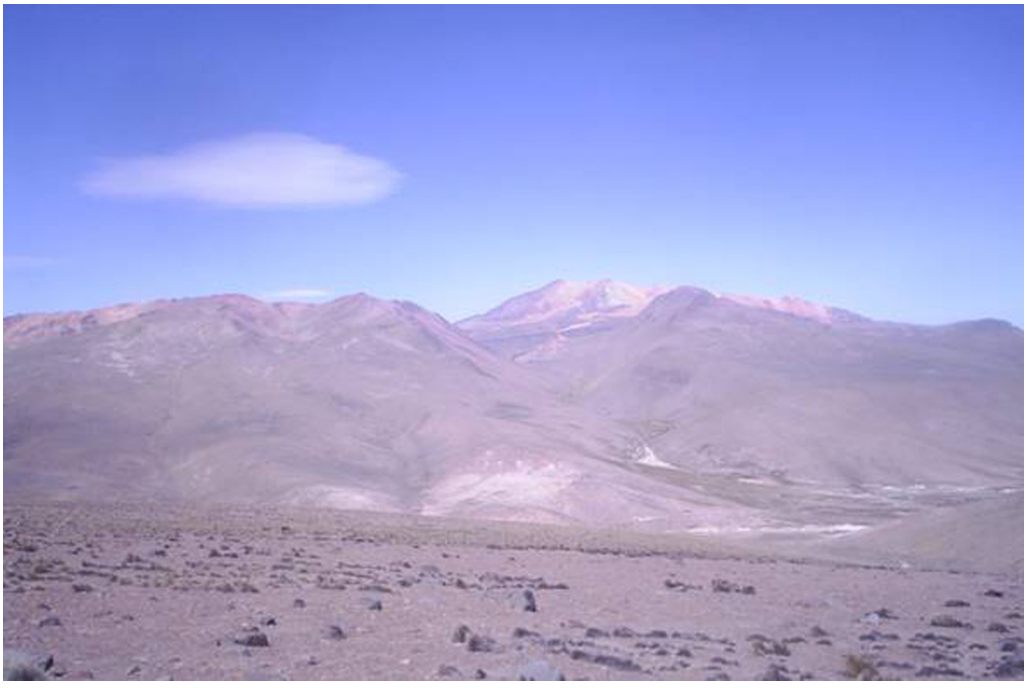

Fig. 16. Vista del sector oeste del complejo volcánico López Extraña constituido principalmente de lavas andesíticas. Este volcán presenta importante alteración hidrotermal argílica en la cima.

Volcán Inciensocucho: El sector sur de este volcán forma parte del área de estudio. En la base se distinguen depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas andesíticos cohesivos que miden más de 8 m de espesor. Sobre estos depósitos se distinguen lavas andesíticas de textura porfírica que contienen fenocristales de plagioclasa y piroxeno. Sobre estos depósitos descansan flujos piroclásticos de cenizas soldadas que contienen bloques líticos lávicos de hasta 6 cm de diámetro.

Pleistoceno

Complejo volcánico Yucamane-Calientes-Yucamane Chico: En el extremo suroeste del área se distingue al complejo volcánico Yucamane-Calientes-Yucamane Chico (Fig. 17), constituido principalmente por flujos de lava, domos de lava y algunos remanentes de flujos piroclásticos. De todos estos volcanes, el Yucamane presentó actividad más reciente, mientras que los volcanes Calientes y Yucamane Chico, localizados más al norte, presentaron actividad posiblemente antes del Pleistoceno (datación en proceso).

Entre los productos emitidos por el volcán Yucamane se distinguen principalmente flujos de lava andesítica, flujos piroclásticos de bloques y cenizas, y domos de lava asociados. La estratigrafía del volcán Yucamane (Fig. 18) evidencia variados eventos volcánicos divididos en dos periodos: Yucamane I y Yucamane II. Este último está dividido en dos fases: Cono de la Cumbre (IIa) y Caldera Reciente (IIb). El Yucamane I constituye el periodo eruptivo inicial que fue principalmente de carácter efusivo, en el cual se emplazaron flujos de lavas andesíticos aproximadamente 0.38±0.3 Ma a.p. Estas lavas descansan sobre un depósito de flujo de pómez y cenizas datado en 0.54±0.18 Ma a.p. (France, 1985). En una fase evolutiva intermedia se produjo el crecimiento y colapso de domos de lava que depositaron un depósito de flujo de bloques y cenizas de 12 m de espesor, a 9 km en el flanco sur del volcán (quebrada Honda). En un segundo periodo, los domos fueron erosionados y cubiertos por flujos de lavas dacíticos y andesíticos que forman el cono superior del volcán, denominado fase Cono de la Cumbre. Posteriormente, en una segunda fase denominada, Caldera Reciente (IIb), que va desde el Pleistoceno superior al reciente, se produjo el emplazamiento de variados depósitos de flujos piroclásticos y caídas de cenizas y lapilli pómez < 1 km^3 que yacen principalmente en el flanco sur y sureste del estratocono, ligados principalmente a erupciones subplinianas, freatomagmáticas y vulcanianas, y que dieron lugar a la formación de la caldera y cráter actual. Un depósito de caída de lapilli pómez de origen freatomagmático < 1 km^3 con dispersión hacia el sureste se formó aproximadamente 3270 años a.p. (Rivera y Mariño, 2004).

Fig. 17. Vista del valle Calientes y al fondo el complejo volcánico Yucamane-Calientes-Yucamane Chico (Sector Noroeste).

Fig. 18. Vista del flanco sureste del volcán Yucamane, cuyo cono está constituido principalmente de flujos de lavas.

Los volcanes Calientes y Yucamane Chico están constituidos principalmente de lavas muy similares entre sí y caracterizadas por su textura porfirítica de grano muy grueso, con fenocristales de plagioclasa en una pasta vítrea de color negro. Se distingue la formación de dos domos posterior al emplazamiento de lavas en la parte superior de la estructura.

DEPÓSITOS HOLOCÉNICOS

Corresponden a depósitos aluviales, coluviales y bofedales. Los primeros están conformados por acumulaciones de gravas, arenas y limos retrabajados, que principalmente se encuentran rellenando los actuales cauces de quebradas y ríos (Fig. 19), como los depósitos aluviales visualizados en el valle del río Calientes que miden más de 8 m de espesor, donde se encuentran bastante compactos, incluso soldados (Fig. 20). En el curso medio y superior del valle del río Calientes afloran depósitos de sínter, asociados a la presencia de fuentes termales. Mientras que los bofedales están localizados generalmente en las quebradas y están constituidos principalmente de sedimentos saturados de agua.

ZONAS DE ALTERACIÓN HIDROTERMAL

En el área de estudio existen numerosos aparatos volcánicos antiguos, fuentes termales y fuentes de gases que presentan zonas de alteración hidrotermal.

Las alteraciones hidrotermales en los volcanes pueden obedecer a la intensa actividad hidrotermal presentada por un volcán en su fase final de actividad (Fig. 21), así como a procesos de alteración debido a la actividad meteorológica y/o debido a ambos procesos. Mientras que las alteraciones hidrotermales relacionadas a campos geotermales se presentan en zonas donde la actividad geotérmica fue intensa y constante, alterando la textura y los componentes minerales de las rocas originales y remplazándolos por sílice, carbonatos, etc.

Las alteraciones hidrotermales en los aparatos volcánicos son visibles en los siguientes sectores:

- *Yucamane Chico-Calientes:* argilización moderada y en partes silicificación intensa.
- *Larjanco:* fuerte silicificación y moderada presencia de arcillas. En algunas zonas hay mayor argilización con presencia de alunita, en las partes superiores se observa brechamientos líticos y matriz silicificada y al suroeste propilitización moderada.
- *Cerro Amarillo:* donde se distingue alteración silito-argílica e intensa silicificación.
- *López Extraña*: los sectores noroeste y suroeste presentan alteración sílica y alteración argílica avanzada. Esta última es la más extensa, cuya área es mayor a 10 km^2.

Las alteraciones relacionadas a fuentes hidrotermales se localizan alrededor del río Calientes, donde se ha depositado sínter de carbonatos y de sílice (Fig. 22).

Fig. 19. Depósitos aluviales y zonas de depositación de sínter visibles dentro del valle Calientes.

Fig. 20. Depósitos aluviales constituidos de bloques subredondeados y subangulosos dentro de una matriz areno-limosa visibles dentro del valle Calientes.

Fig. 21. Vista del sector este del volcán Yucamane Chico, el cual presenta alteración argílica y silicífica.

Fig. 22. Manifestación FT-011, en la cual se observa la precipitación de la sílice y consecuente formación de un depósito de sínter.

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

En el Campo Geotérmico Calientes, situado en la zona sur de la Cordillera Volcánica, la estructura regional geológica se caracteriza por la presencia de una falla estructural con tendencia NO-SE, la cual se dirige en dirección paralela a la cordillera y las cadenas volcánicas. Los volcanes ubicados alrededor del Campo Geotérmico Calientes están alineados en dirección NE-SO, lo que implica la existencia de una falla estructural con tendencia NE-SO. El sistema estructural en Calientes se puede resumir de la siguiente manera: Lineamientos estructurales bien identificados con tendencia NE-SO, los cuales se extienden a lo largo del río Calientes; asimismo paralelo a este, en la parte norte del valle, se localizan muchas fuentes termales; por lo tanto a este sistema se le denomina sistema de falla (Fc-1). Además del sistema descrito se han identificado fallas con dirección N-S, las cuales definen el curso del río Calientes (Fc-2) en la parte sur del valle; a lo largo de esta estructura no se observan manifestaciones geotermales. Asimismo, el análisis de imágenes satelitales indica la presencia de una falla de rumbo NNO-SSE (Fc-3) (Fig. 23).

ESTRUCTURAS VOLCÁNICAS

Se han podido identificar las siguientes estructuras:

a. *Estrato Volcanes:* Constituyen las partes más elevadas del área de estudio (cerros Yucamane y Calientes), los volcanes son de tipo estrato volcán, con fuerte elevación hacia el foco, y sus flancos tienen pendientes moderadas generando una forma cónica y muchas veces truncada en el tope. A la vez existen aparatos volcánicos en los que se evidencia la erosión glacial que los ha afectado.

b. *Caldera y Estructuras de Colapso Tectónico:* La presencia de la estructura del cerro López Extraña indica que la actividad tectónica tipo colapso-calderas estuvo procedida por una actividad volcánica explosiva que destruyó los conos volcánicos más antiguos.

c. *Domos:* Estructuras que se forman a partir del enfriamiento de un magma viscoso que, al no poder fluir debido a su alta viscosidad, se acumula a lo largo de las fisuras de emisión. Se han reconocido los siguientes: Domos San Pedro y Yucamane Chico, Domos Señoraca-San Francisco.

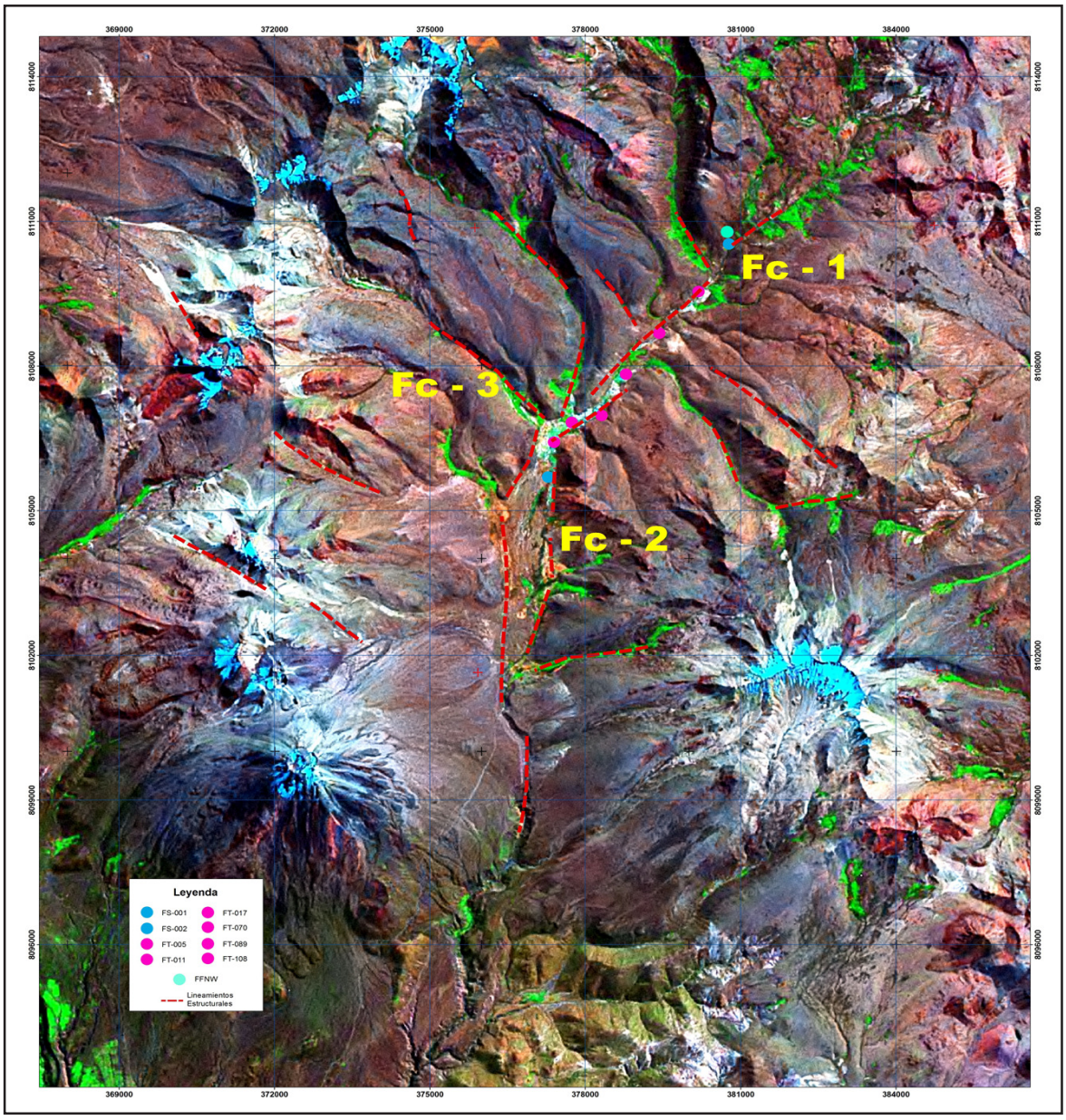

Fig. 23. Imagen Landsat donde se muestran los principales lineamientos estructurales del Campo Geotermal Calientes.

CAPÍTULO III
GEOFÍSICA

INTRODUCCIÓN

En el Campo Geotérmico Calientes se utilizó el método magnetotelúrico (MT) que, a diferencia de otros, mide las variaciones de la resistividad en el subsuelo y tiene como fuente de energía los campos electromagnéticos generados por la interacción entre el campo geomagnético, producido por celdas de convección al interior del manto, y el viento solar, los cuales se propagan hacia el interior de la Tierra. Las variaciones de la resistividad dependen de las propiedades físicas de las rocas, la composición de las capas, la presión, la temperatura, el grado de fracturamiento y la presencia de soluciones salinas.

La resistividad es muy sensible a los cambios de temperatura de un reservorio geotérmico. La resistividad es medida en ohmio-metro (Ω m) y generalmente se entrega como *resistividad aparente* debido a que es un promedio de un conjunto de resistividades reales, las cuales también dependen de la disposición de la instalación de los electrodos. Asimismo, la profundidad de penetración depende de la resistividad de las rocas y la frecuencia con la que se miden. En la Fig. 24 se presenta la configuración del método MT y la disposición de los electrodos correspondiente a los campos: eléctrico en sus componentes horizontales (Ex, Ey) y magnético en sus componentes horizontales (Hx, Hy) y vertical (Hz) (Fig. 25).

El estudio geofísico magnetotelúrico en el Campo Geotérmico Calientes se realizó entre el 6 de octubre y el 16 de noviembre del 2007, a fin de conocer la distribución de la resistividad en profundidad y de este modo detectar zonas con potencial geotérmico que, en general, se caracterizan por presentar bajas resistividades. Este estudio geofísico fue efectuado por Phoenix Geophysics Limited de Canadá, bajo la supervisión de WEST JEC de Japón y con la participación de INGEMMET.

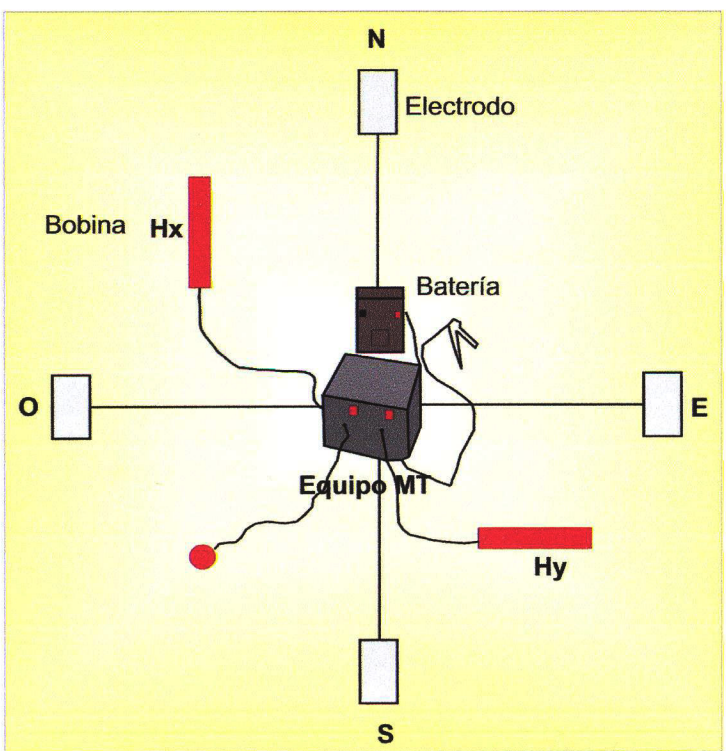

Fig. 24. Configuración del equipo magnetotelúrico (MT).

Fig. 25. La foto de la izquierda muestra el equipo MT que se utiliza para la recepción de datos en la estación. La foto de la derecha muestra el proceso de instalación de la bobina en su componente vertical (Hz).

METODOLOGÍA DE TRABAJO

La aplicación del método MT cubrió un área aproximada de 14 km^2 mediante un enmallado de 40 puntos de medición de MT, distribuidos uniformemente con un distanciamiento entre puntos de 700 m y una estación base ubicada a 2 km en dirección sur del Campo Geotérmico Calientes, libre o bajo nivel de ruidos originados natural (actividad microsísmica, cauces de agua) o artificialmente (líneas eléctricas, tuberías, paso de personas y animales). El rango de frecuencias utilizado en este estudio es de 360 Hz hasta 0.001 Hz, garantizando así alcanzar profundidades mayores a 2500 m. Las experiencias de estudios geotérmicos en otros campos muestran que la profundidad con potencial geotérmico se encuentra entre 1 000 y 2 500 m.

En la Fig. 26 se presenta la distribución de puntos de medición MT, la ubicación de las principales fuentes de agua termales del Campo Geotérmico Calientes y los sistemas de fallas y lineamientos reconocidos en el estudio geológico-tectónico.

ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

Adquisición

Cada día se adquirieron datos en series de tiempo en dos o tres estaciones MT, incluida la estación base. Los datos adquiridos están en el rango de 360 Hz a 0.00041 Hz; estos corresponden a seis componentes: dos componentes del campo eléctrico (Ex, Ey) y tres del campo magnético (Hx, Hy, Hz), con excepción de la estación base donde no se adquirió datos para la componente vertical del campo magnético (Hz). La resistividad aparente en frecuencias altas refleja la estructura resistiva en niveles superficiales, mientras que en frecuencias bajas refleja la estructura resistiva en niveles profundos. La grabación de los datos se realizó por la noche, desde las 16 horas hasta las 8 horas del día siguiente, con la finalidad de reducir el ruido artificial.

Procesamiento

Los datos obtenidos simultáneamente en las estaciones MT y estación base fueron procesados utilizando el software de la empresa Phoenix Geophysics Limited, donde se calculó la resistividad aparente y otros parámetros como los valores de fase de impedancia y desviación estándar de resistividad aparente, además de realizar las correcciones necesarias a fin de obtener resultados de calidad. La distribución de resistividad aparente en superficie y profundidad se presenta en dos dimensiones asumiendo que la distribución de la resistividad varía en dirección horizontal (x) y vertical (z), y utilizando cálculos matemáticos tales como las funciones de Green, entre otros.

Resultados

En la Fig. 27 se presenta la distribución de los valores de resistividad aparente, calculada con una frecuencia de: a) 100 Hz, b) 1 Hz y c) 0.01 Hz.

a) En la Fig. 27a se presenta la distribución de los valores de resistividad aparente a 100 Hz, la profundidad de investigación es superficial y comprende desde 60 hasta 320 m. Los resultados muestran que la resistividad aparente se encuentra en un rango de 3 a 80 ohmio-metro (ohm-m) y la zona de baja resistividad aparente (10 ohm-m) sigue un alineamiento en dirección NE-SO, coincidiendo así con la orientación de un sistema de fallas y la distribución de fuentes de agua termales, lo que probablemente indicaría la presencia de alteración hidrotermal. Los valores de resistividad aparente relativamente altos, mayores de 32 ohm-m, se distribuyen hacia los extremos de la zona de baja resistividad; es decir, hacia el NO y SE respectivamente.

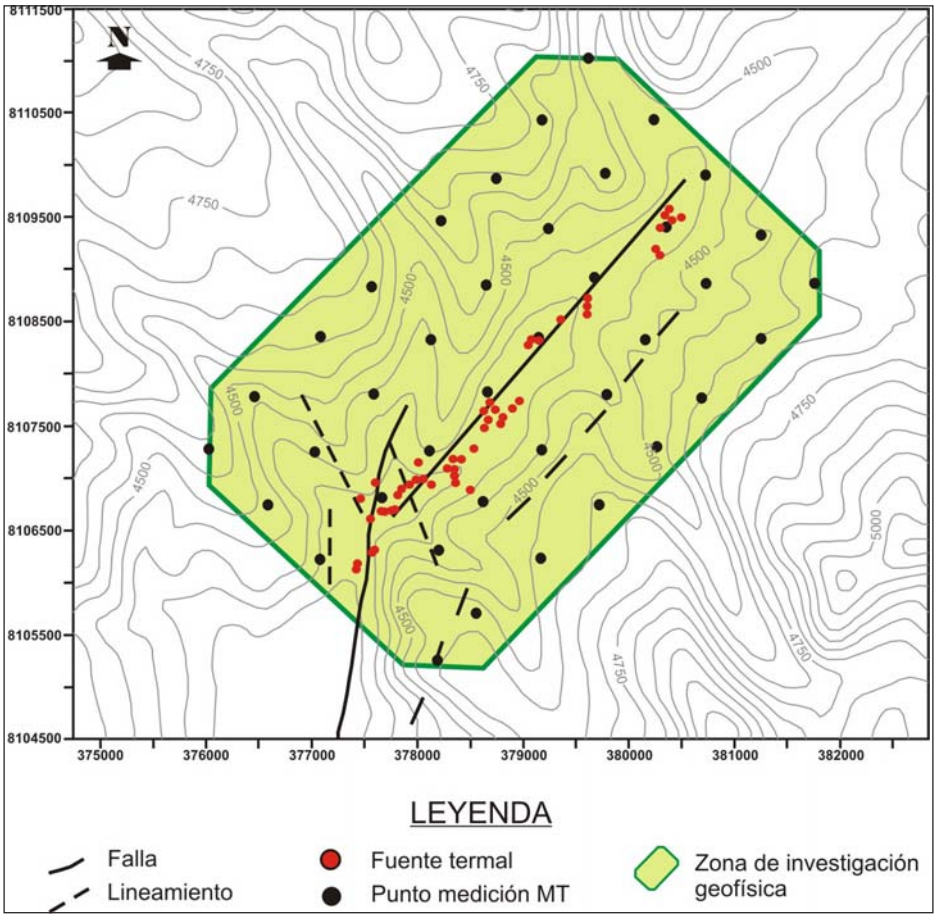

Fig. 26. Mapa que muestra la zona de investigación geofísica y los puntos de medición magnetotelúrica (MT).

b) La distribución de la resistividad aparente a 1 Hz y profundidad de penetración de 450 a 950 m es presentada en la Fig. 27b, y muestra claramente que el rango de resistividad se encuentra entre 1.5 a 7.0 Hz, lo que difiere completamente de lo observado en la Fig. 27a ya que la zona de baja resistividad aparente menor a 4 ohm-m se encuentra en el extremo oeste de la zona de investigación.

c) En la Fig. 27c se presenta la distribución de la resistividad aparente obtenida a 0.01 Hz y cuya profundidad de penetración es desde la superficie hasta 10 000 m. Los valores de resistividad aparente se encuentran entre 10 a 50 ohm-m y se puede observar una distribución similar a la Fig. 27b, donde los valores de resistividad aparente bajos, menores a 20 ohm-m, se presentan en el extremo este y los valores altos en el extremo sur de la zona de investigación.

El rango de frecuencias utilizado para el análisis bidimensional de los cortes está entre 251 Hz y 0.01 Hz, y a diferentes profundidades de penetración: 100, 200, 500, 750, 1000, 1500, 2000 y 2500 m.

- A profundidades de 100 y 200 m (Fig. 28a y 28b), las zonas de baja resistividad aparente, menores a 10 ohm-m e identificadas con línea gruesa de color blanco, se distribuyen principalmente en dirección NE-SO, sobre la zona donde se ubican las manifestaciones geotermales, en tanto que las de resistividad aparente mayor a 32 ohm-m se observan hacia ambos extremos de la zona de baja resistividad, identificándose así dos discontinuidades, Rc1 y Rc2, que separan ambas zonas de baja y alta resistividad aparente. Aunque no es muy evidente, las discontinuidades Rc3 y Rc4 también pueden observarse perpendiculares a la discontinuidad Rc1.
- A medida que se incrementa la profundidad de investigación, la resistividad aparente aumenta, tal como se puede observar en las Fig. 28c, 28d, 28e y 28f que corresponden a profundidades de 500, 750, 1000 y 1500 m respectivamente. En general, de 10 a 20 ohm-m de resistividad aparente (líneas gruesas de color amarillo) se distribuyen en la zona central de investigación y orientados

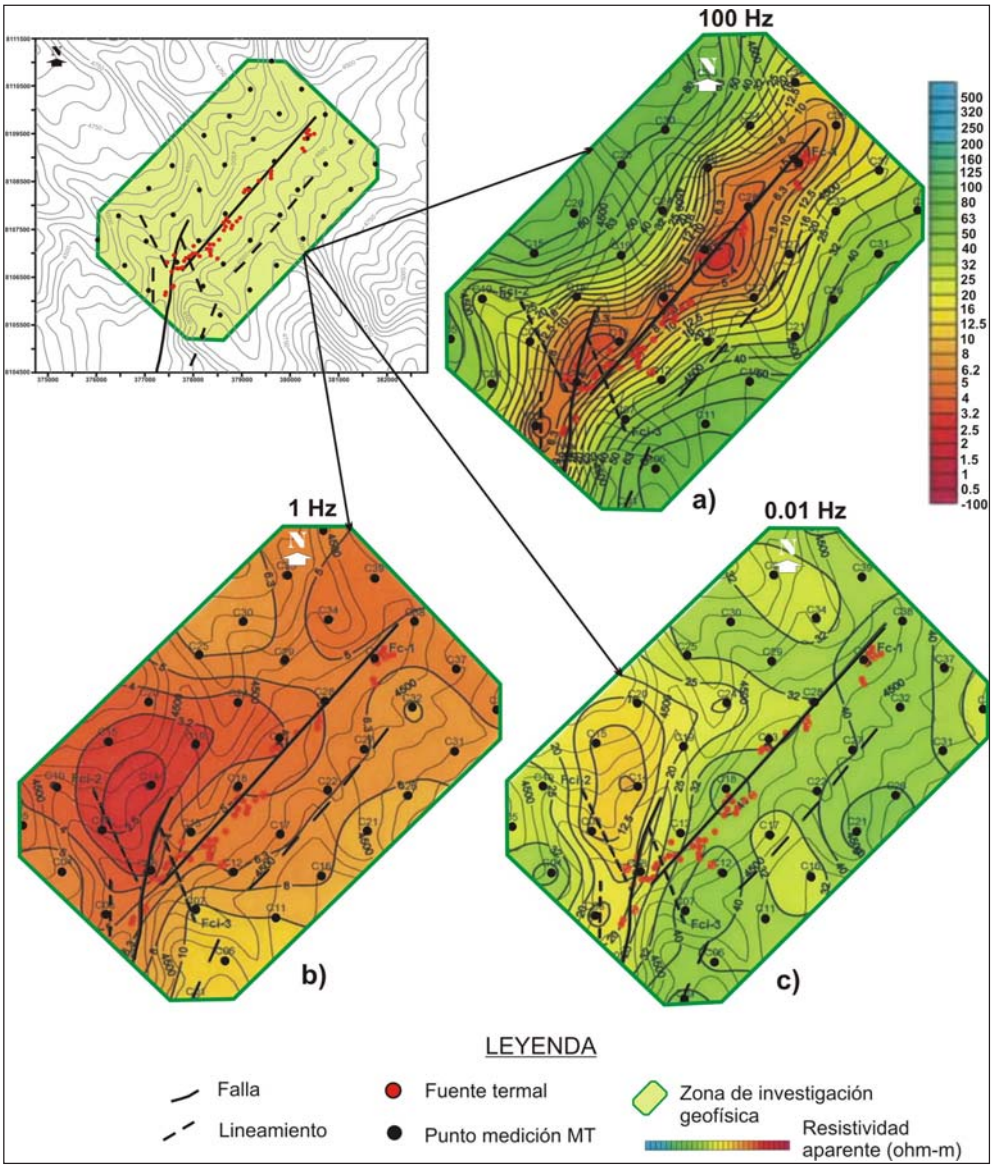

Fig. 27. Distribución de la resistividad aparente en el Campo Geotérmico Calientes utilizando frecuencias de a) 100 Hz, b) 1 Hz y c) 0.01 Hz.

en dirección NO-SE. A diferencia de los resultados obtenidos en las Fig. 29a y 29b, aquellos de las Fig. 29a hasta 29d muestran zonas de resistividad relativamente baja y menor a 10 ohm-m en ambos extremos de la zona de alta resistividad. A estas profundidades, las discontinuidades Rc1 y Rc2 pueden ser identificadas fácilmente.

- A mayores profundidades de 2000 y 2500 m, la resistividad aparente aumenta considerablemente con respecto a las anteriores profundidades (línea gruesa de color verde). Así, en la Fig. 28g los valores de resistividad mayores a 25 ohm-m abarcan los extremos este y sureste de la discontinuidad Rc1, y los valores relativamente menores a 25 ohm-m se observan principalmente en el extremo noroeste de dicha discontinuidad. La investigación a 2500 m de profundidad (Fig. 28h) muestra una distribución de la resistividad más uniforme con valores entre 30 y 100 ohm-m. Las discontinuidades Rc1 y Rc2 a dicha profundidad son difíciles de identificar.

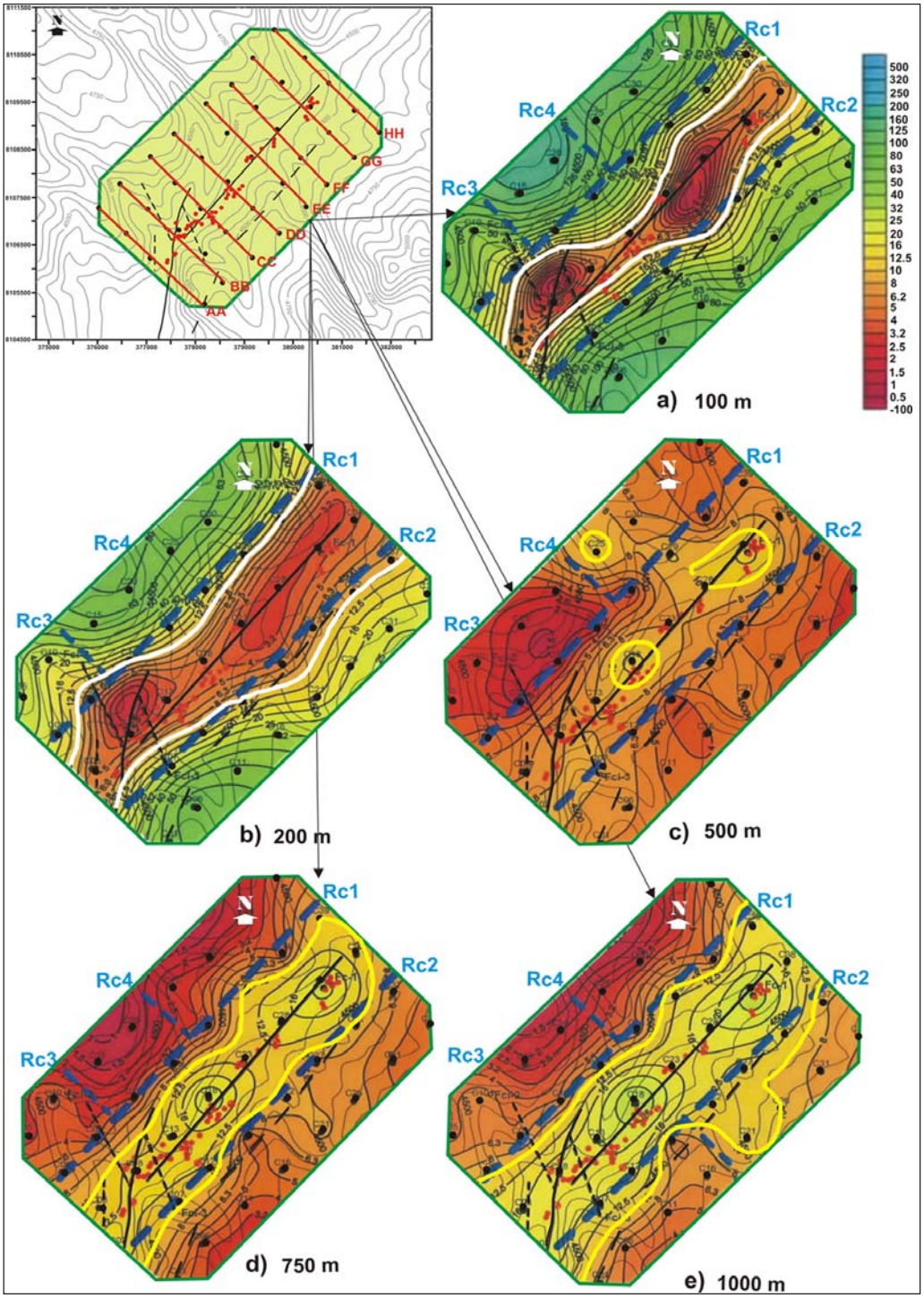

Fig. 28. Distribución de las resistividades aparentes a profundidades de: a) 100 m b) 200 m c) 500 m d) 750 m y e) 1000 m. Las líneas gruesas en color blanco y amarillo identifican las zonas de baja resistividad (a y b), y el incremento de la resistividad con la profundidad (c, d, e, f).

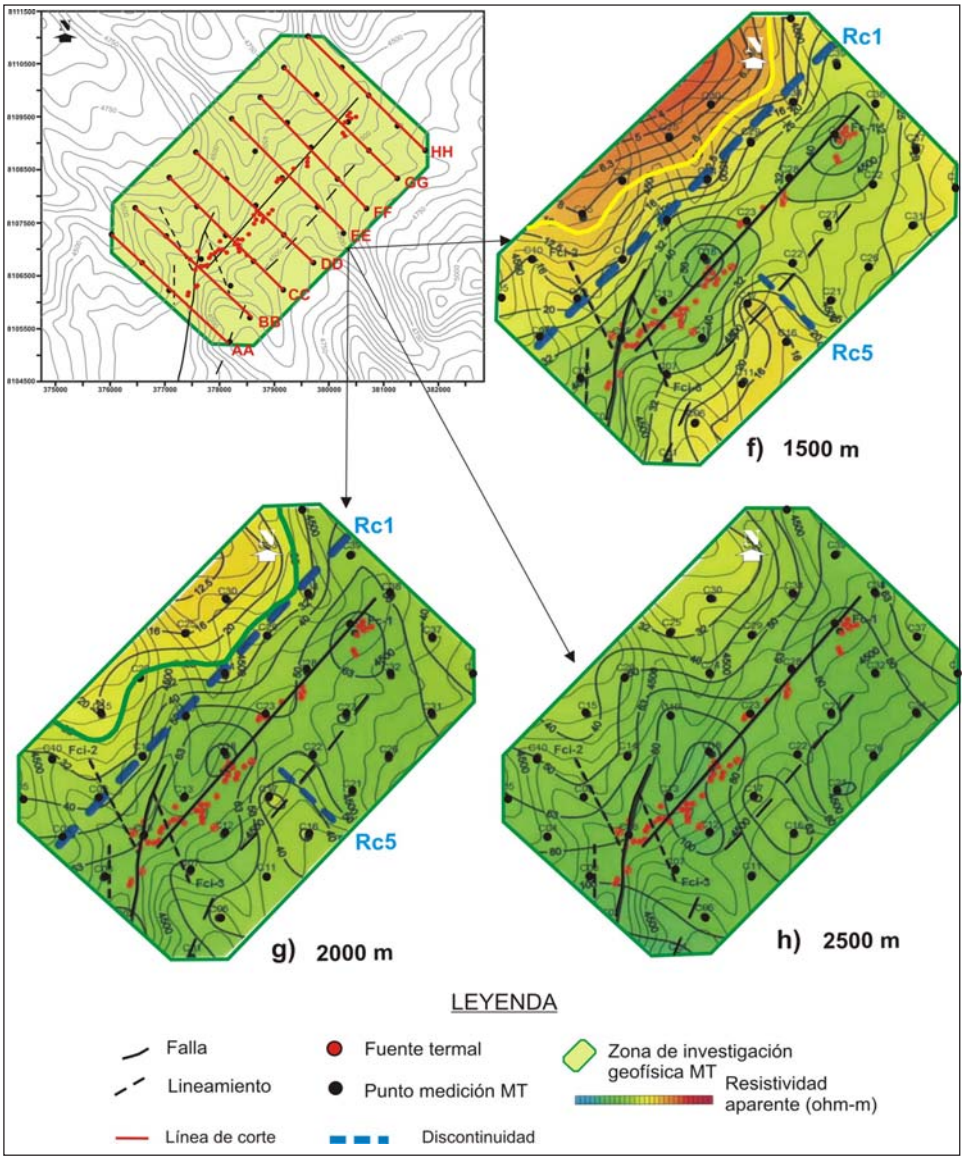

Fig. 28. Continuación: f) 1500 m g) 2000 m y h). 2500 m. Las líneas gruesas de color amarillo y verde, identifican las zonas de incremento de la resistividad con la profundidad (c, d, e, f) y alta resistividad a profundidades de 2000 y 2500 m.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos de la distribución de la resistividad a diferentes profundidades descritos en el ítem anterior, y mostrados en las Fig. 29a hasta Fig. 29h, muestran claramente que la resistividad aumenta con la profundidad y se distribuyen con orientación NE-SO.

- Las bajas resistividades (menores a 10 ohm-m) a poca profundidad, entre 100 y 200 m, podrían estar relacionadas con la presencia de minerales arcillosos de baja temperatura, tales como la esmectita y zeolita que estarían actuando como capa impermeable.
- Los valores altos de resistividad (10 a 20 ohm-m y mayor a 25 ohm-m) a profundidades de 500 hasta 1500 m podrían estar asociados a la circulación de fluidos geotérmicos y probablemente también estén presentes productos de alteración, tales como las arcillas y cloritas de alta temperatura.
- A profundidades mayores de 2000 y 2500 m, la distribución uniforme de la resistividad (mayores de 30 ohm-m) podría sugerir una zona de alta temperatura. La interacción de la zona más profunda desde donde proviene la fuente de alta temperatura y el fluido geotérmico con la parte más superficial (200 a 300 m), podría estar controlada por las discontinuidades (probablemente fallas) Rc1 y Rc2 que se extenderían desde la superficie hasta 2000 m de profundidad aproximadamente.

CAPÍTULO IV
HIDROGEOLOGÍA

Las características de las aguas subterráneas en Calientes se encuentran ligadas a las condiciones geológicas de la zona, donde el factor estructural y el climático son condicionantes principales para la formación de unidades acuíferas en la zona de Calientes.

La caracterización hidrogeológica permite diferenciar cuatro tipos de estas unidades: un acuífero fisurado sedimentario, acuíferos fisurados volcánicos, acuífero poroso no consolidado y acuitardos.

INVENTARIO DE MANIFESTACIONES GEOTERMALES

De acuerdo al inventario realizado en el valle Calientes se ha podido distinguir dos tipos de manifestaciones geotermales: fuentes termales y fuentes de gas (Fig. 29). Además, también hay numerosos manantiales de agua fría, y la toma de puntos de control se realiza en los cursos superficiales de agua, haciendo un total de 134 puntos inventariados (véase Anexo 1).

Determinaciones de campo

Durante la realización del inventario de las manifestaciones geotermales se midieron los parámetros fisicoquímicos (Fig. 30), así como el caudal de las principales manifestaciones.

- *Temperatura*: Los valores de temperatura de las manifestaciones son variados, teniendo como mínimo 36,40 ºC de la fuente FT-086 y como máxima 90,40 ºC de la fuente FT-081. Adicionalmente, en la parte sur de la zona de estudio, el manantial FM-007 tiene una temperatura de 43,60 ºC; este manantial no es una manifestación geotermal, y su valor elevado se debe al gradiente geotérmico de la zona, es decir, la circulación de agua a niveles profundos.

  En el Cuadro 1 se muestra la clasificación de fuentes termales y frías según su temperatura (Bogomolov, 1966). El manantial que presenta la más elevada temperatura, es FM-007 con un valor de 43,50 ºC; este manantial se ubica en la parte sur de la zona de estudio, fuera de la influencia del Campo Geotermal Calientes, es probable que estas aguas tengan un recorrido profundo considerable, lo cual ocasiona que la temperatura se eleve.

- pH: Para el análisis de éste parámetro, se tomó en cuenta, la clasificación de aguas propuesta por Baquero (2007)[2].

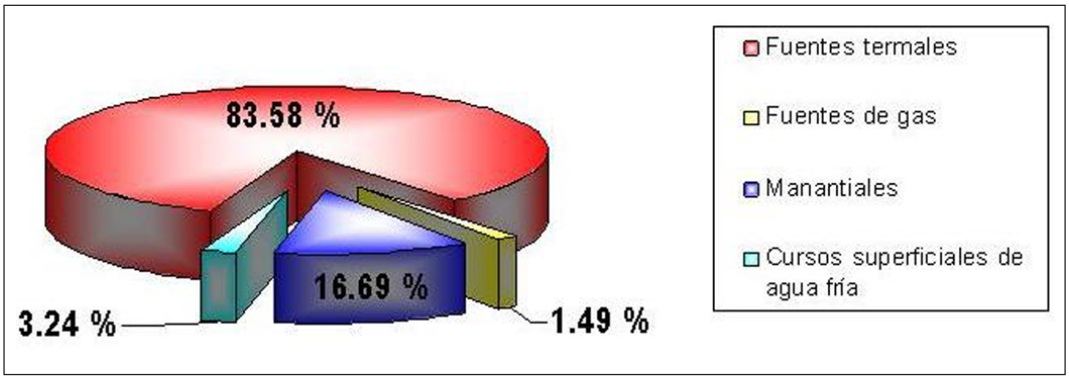

Fig. 29. Distribución de los tipos de fuentes inventariadas.

Tipo	Rango de pH
Ácido	0,0 – 6,5
Neutro	6,5 – 7,5
Básico	7,5 – 14,0

[2] J. Baquero. 2007. Clasificación de aguas según pH.

Fig. 30. Toma de parámetros fisicoquímicos con equipos portátiles.

Cuadro 1
Clasificación de aguas según temperatura

Categoría	Rangos de T (ºC)	N.º de manifestaciones geotermales	N.º de manantiales
Muy frías	< 5	-	3
Frías	5 – 10	-	1
Moderadamente frías	10 – 18	-	9
Tibias	18 – 25	-	3
Moderadamente tibias	25 – 37	1	-
Calientes	37 – 42	3	-
Muy calientes	> 42	110	1

En el Cuadro 2 se muestra la clasificación de las manifestaciones según su pH, así como de los manantiales y puntos de control.

La alcalinidad de la mayoría de las fuentes se debe al origen de las aguas, puesto que provienen de un reservorio de rocas cretáceas carbonatadas (véase capítulo de Geoquímica).

Es importante mencionar que antes de la confluencia del río Calientes con las manifestaciones geotermales, este presenta un pH de 3,35 y dicho valor aumenta hasta 8,06 en el curso posterior al de la confluencia del río con las manifestaciones, lo cual ratifica la alcalinidad predominante en la zona.

Cuadro 2
Clasificación de aguas según pH

Categoría	Rangos de Ph	Nº de manifestaciones geotermales	Nº de manantiales	Nº de puntos de control en el río Calientes
Ácidas	0,00 – 6,50	7	2	1
Neutras	6,50 – 7,50	59	4	-
Básicas	7,50 – 14,00	48	11	2

- *Conductividad Eléctrica:* Los valores de conductividad eléctrica de las manifestaciones geotermales son muy altos, llegando incluso a superar 7,9 mS/cm. Estos valores altos en el 96 %, son típicos en campos geotermales.

  Los valores de conductividad eléctrica de los manantiales y aniegos son normales, con valores inferiores a los límites máximos permisibles según la OMS (1,5 mS/cm); con excepción del manantial FM-007, que presenta una conductividad eléctrica de 5,90 mS/cm; este manantial se ubica en la parte sur de la zona de estudio, fuera de la influencia del Campo Geotermal Calientes.

  Analizando estos tres parámetros y su comportamiento en las manifestaciones geotermales, en la zona entre Jarepiña y Malpaso, donde se han registrado las máximas temperaturas, también se registran elevados valores de conductividad eléctrica, y a la vez el pH es generalmente ácido. En zonas donde las fuentes presentan un pH alcalino la conductividad eléctrica tiende a disminuir.

- *Caudal:* El aforo de las fuentes se realizó utilizando el método volumétrico (Fig. 31), con estos resultados y de acuerdo a la clasificación de manantiales de Meinzer (1923), en el Cuadro 3 se presenta la categorización respectiva.

  Todas las manifestaciones geotermales Calientes suman un caudal de casi 70 L/s. Así mismo, los manantiales fríos tienen en conjunto un caudal superior a 60 L/s.

Fig. 31. Detalle del aforo, de manifestación geotermal, en dos puntos en la zona de la quebrada Huancane Vinto.

Cuadro 3
Clasificación de manantiales según su caudal

Categoría	Caudal (l/s)	Nº de manifestaciones geotermales	Nº de manantiales
Octava	< 0,008	48	2
Sétima	0,008 – 0,67	–	–
Sexta	0,07 – 0,67	30	3
Quinta	0,67 – 6,30	34	9
Cuarta	6,30 – 28,00	–	3

UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

La caracterización hidrogeológica del campo Calientes ha permitido diferenciar las siguientes unidades hidrogeológicas:

Acuíferos porosos no consolidados: Este tipo de acuíferos han sido caracterizados en la zona del piso del valle Calientes, así como en los pequeños valles formados por las quebradas afluentes al río Calientes. Según el tipo de material así como la producción de agua, se ha podido distinguir tres categorías de este tipo de acuíferos: de alta, media y baja producción.

El primero está referido a los depósitos de bofedales, los cuales se encuentran ubicados en las pequeñas quebradas afluentes al río Calientes (Fig. 32), así como en las márgenes del valle en el sector norte. Estos depósitos conformados por clastos de rocas volcánicas que van desde subredondeados a subangulosos, con matriz areno-limosa, se encuentran completamente saturados de agua, originando abundante vegetación y caudales mayores a 5 L/s (Fig. 33).

El segundo acuífero se refiere a los depósitos aluviales constituidos por gravas, arenas y limos retrabajados, ubicados principalmente en la parte central del valle Calientes, en el sector sur. En estos depósitos se han encontrado manantiales cuyos caudales no son muy considerables (caudales inferiores a 1 L/s) debido a la permeabilidad media de los depósitos (Fig. 34).

El tercer acuífero está constituido por los depósitos coluviales, restringidos a las laderas de los cerros circundantes al valle y a las quebradas afluentes al mismo. Dada su corta extensión, estos depósitos constituyen el acuífero cuaternario de menor producción. En algunos sectores como el de Ancochaque se han inventariado manantiales fríos y en otros, como en el sector de Huancane Vinto, hay surgencias de algunas manifestaciones geotermales (Fig. 35).

Acuífero fisurado sedimentario: Constituido por las areniscas cuarzosas intercaladas por delgados bancos de lutitas de la Formación Hualhuani (Fig. 36), las cuales afloran al sur del volcán Yucamane. Una de las características importantes de las areniscas cuarzosas de esta unidad hidrogeológica es que ha sido sometida a una intensa actividad tectónica expresada por el intenso fracturamiento que se observa al sur de la zona de estudio. Aunque la Formación Hualhuani no es muy importante a nivel superficial debido a su poca extensión, estudios posteriores podrían determinar si es que en profundidad se comportaría como un reservorio del campo geotermal.

Fig. 32. Vista de bofedal en la quebrada Pantara, sector noreste del valle Calientes.

Fig. 33. Detalle de la surgencia de agua en una manantial ubicado en el sector de Challepiña.

Fig. 34. Manante que origina el aniego en el sector de Quesquere.

Fig. 35. Manifestación geotermal en depósito coluvial.

Fig. 36. Afloramiento de areniscas de la Formación Hualhuani.

Acuíferos fisurados volcánicos: Conformados por andesitas, flujos piroclásticos y depósitos de caída emplazados en las laderas distales de los centros volcánicos alrededor del valle Calientes. Se han podido distinguir tres categorías de acuíferos: de alta, media y baja producción. Los acuíferos de alta producción son las andesitas en las cuales se han inventariado los manantiales de mayor producción, llegando a tener hasta 25 L/s (Manantial Chaullani Aguilar). Es importante mencionar que algunas de las manifestaciones geotermales que presentan menor temperatura, surgen en las laderas de los cerros donde se han identificado estos acuíferos (Fig. 37).

Los acuíferos volcánicos de producción media son aquellos ubicados en las zonas medias de los cerros. Se han encontrado importantes manantiales hasta de 5 L/s en los sectores de Quesquere y Coline; dichas aguas son usadas para el consumo humano y de los animales. Finalmente los acuíferos de baja producción están ubicados en las partes más altas de los cerros. En ellos se han podido identificar pequeñas nacientes de manantiales o formación de vegetación, lo que indica la presencia de agua en el interior de estas rocas (Fig. 38).

Acuitardos: Como acuitardos se han considerado a andesitas y cenizas ubicadas en las partes altas del volcán Yucamane, cerros Calientes, Amane, Cheroveco y las nacientes de la quebrada Uchusuma de la zona de Calientes, clasificadas así por ser consideradas un medio de circulación de las aguas subterráneas, es decir, por donde el agua, producto de las precipitaciones o el deshielo de los nevados, comienza a infiltrarse a través de fracturas u otras estructuras hasta encontrar zonas aptas para su almacenamiento y posterior descarga.

Estos acuitardos presentan las características de porosidad y permeabilidad que los hacen ser considerados como acuíferos, pero su ubicación y que no se hayan encontrado manantiales en estas zonas, ha determinado que se caractericen como acuitardos; también podrían ser considerados como la zona de recarga de los acuíferos de las partes bajas del valle.

Fig. 37. Manifestación geotermal ubicada en ladera de cerro en la margen derecha del río Calientes, frente al sector de Palcoyo.

Fig. 38. Surgencia de agua en andesitas en el sector de Huancane Vinto.

CAPÍTULO V
GEOQUÍMICA

Entre el 6 y el 14 de octubre del 2007 se realizó el estudio de las fuentes termales y frías en la zona geotermal de Calientes, con el objetivo de conseguir información sobre las características geoquímicas de las aguas, como temperatura mínima a nivel profundo, origen, condición del reservorio, etc.

Los estudios geoquímicos consistieron en la toma de muestras y la medición de parámetros físico-químicos en campo (temperatura, pH, conductividad, flujo). También se realizó los análisis químicos e isotópicos de las muestras colectadas en la zona de estudio (Fig. 39).

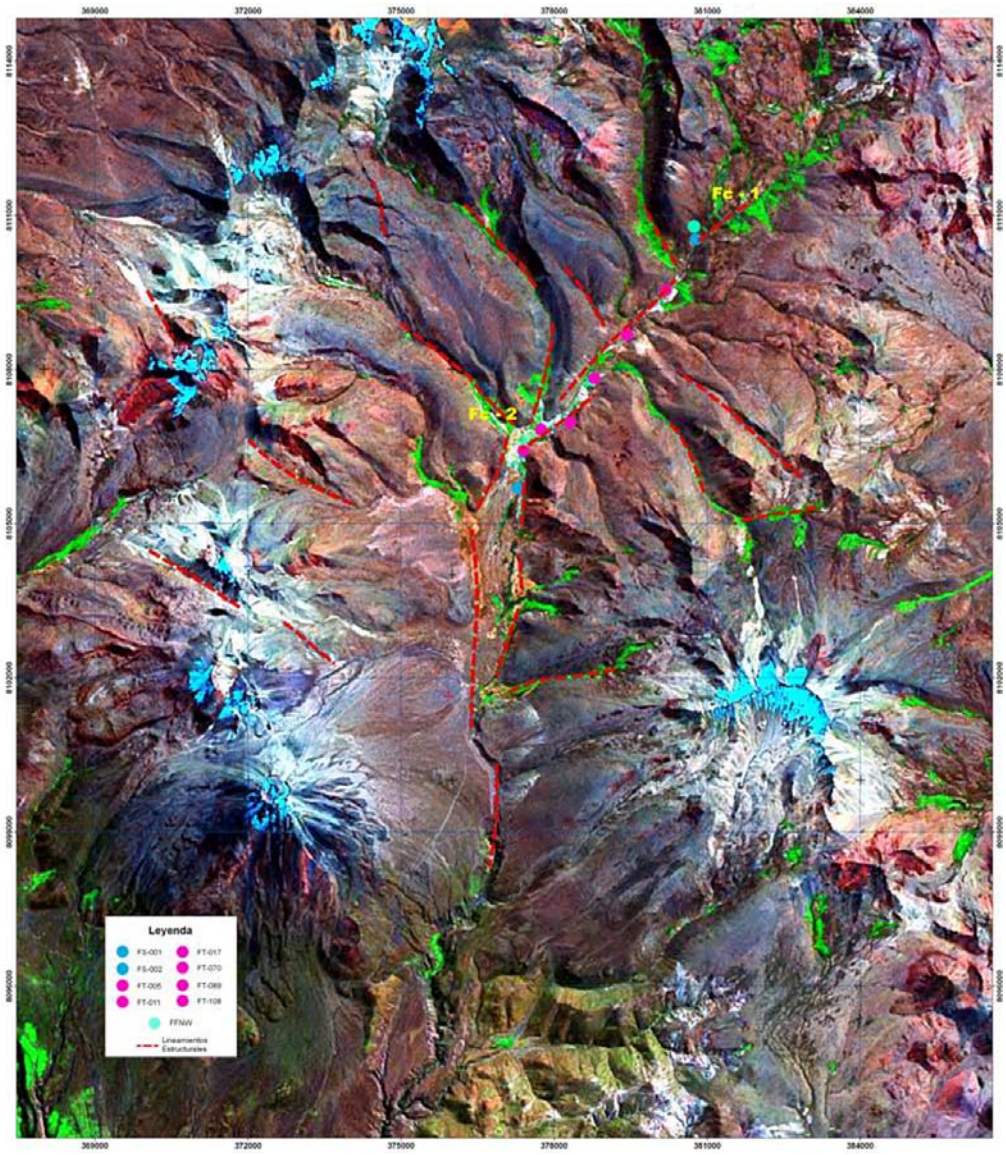

Fig. 39. Imagen satelital con los lineamientos principales y la ubicación de las fuentes muestreadas.

METODOLOGÍA DE MUESTREO

Durante la evaluación geoquímica de fluidos hidrotermales se colectaron nueve muestras, de las cuales seis se fueron de fuentes termales, una de fuente fría y dos muestras corresponden al río Calientes.

Se utilizaron tres técnicas de muestreo, dependiendo del tipo de análisis. Tres muestras se colectaron en botellas de polietileno: una para el análisis de cationes, para la cual se filtró y se adicionó ácido clorhídrico ultrex (HCl), la segunda para la determinación de aniones, y la tercera para análisis isotópico.

En campo se midieron los parámetros de temperatura, pH y conductividad con equipos portátiles. Las mediciones se realizaron conjuntamente con el MSC. Koji Matsuda de WEST Japan Engineering Consultants, INC (WEST JEC). Las muestras se enviaron a Japón para que sean analizadas.

En el río Calientes se colectaron dos muestras, una antes de mezclarse con las fuentes termales y otra en la parte final de la localización de las fuentes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos durante la misión de campo llevada a cabo entre el 10 y 11 de octubre del 2007 (Cuadro 4) revelan que las aguas asociadas a los manantiales de la zona de Calientes presentan temperaturas entre 50 y 87 °C y pH entre 6 y 8, con excepción del agua del río Calientes en la parte alta, que presentó un pH ácido de 3,5. Los resultados de la composición química de las aguas muestreadas desde las fuentes termales de la zona de Calientes se presentan en el Cuadro 5.

Las seis fuentes termales (FT-005, FT-011, FT-017, FT-070, FT-089, FT-108) asociadas a la zona de Calientes han mostrado concentraciones de sodio y potasio con rangos entre 774 y 1190 mg/L, y 48,6 mg/L a 112 mg/L respectivamente. También se observó elevada concentración del ión cloruro, cuyos rangos van desde 271 hasta 1900 mg/L. Algunos componentes no están presentes en la lista del Cuadro 5 debido que sus concentraciones son muy bajas; tal es el caso de los iones nitratos, ioduros y nitritos.

La mayoría de estas fuentes presentan burbujas que señalan la presencia de gas de CO_2. La concentración de los iones bicarbonatos oscila desde 83 a 195 mg/L, la de sulfatos desde 21 hasta 128 mg/L, y las de calcio y magnesio son bajas en comparación con los iones descritos. El cloro es el principal ión dominante en estas aguas, seguido del ión sodio.

También hemos observado que la mayoría de las fuentes de agua muestreadas presentan pH neutro y químicamente son aguas cloruradas- sódicas, típico de aguas geotermales.

Los resultados químicos obtenidos de las aguas muestreadas fueron ploteados en el diagrama de Langelier (Fig. 40) (Fyticas et al., 1989), donde se ha observado que todas las aguas asociadas a los manantiales de la zona de Calientes se agrupan dentro del cuadrante de las proporciones químicas $Cl + SO_4$ – Na + K, lo que indica que las aguas son del tipo cloruradas sódicas o alcalinas. Asimismo, es evidente que la fuente FT-070 y las aguas del río Calientes se separan, y esto se debe al proceso de mezcla con aguas meteóricas y, en el caso del rio Calientes, con aguas termales.

Cuadro 4

Parámetros in situ de las muestras tomadas

N.º	*Código*	*T (ºC)*	*T ambiente (ºC)*	*pH*	*CE (µS/cm)*	*Fecha de la toma de muestras*
1	*FFNW*	*26,9*	*13,5*	*7,24*	*110*	*10/10/2007*
2	*FS-001*	*7,4*	*11,6*	*3,40*	*907*	*10/10/2007*
3	*FT-005*	*87,3*	*13,5*	*7,60*	*5 920*	*10/10/2007*
4	*FT-011*	*81,7*	*11,6*	*7,44*	*5 900*	*10/10/2007*
5	*FT-017*	*86,6*	*11,6*	*6,90*	*3 900*	*11/10/2007*
6	*FT-070*	*54,8*	*15,2*	*7,53*	*1 160*	*11/10/2007*
7	*FT-089*	*84,3*	*12,5*	*7,12*	*5 690*	*11/10/2007*
8	*FT-108*	*84,3*	*11,9*	*7,90*	*5 380*	*11/10/2007*
9	*FS-002*	*23,8*	*10,5*	*8,34*	*4 140*	*11/10/2007*

Cuadro 5
Resultado de los análisis en laboratorio (Laboratorio de WEST JEC)

N.º	Código	pH	CE (µS/cm)	Na mg/L	K mg/L	Li mgL	Ca mg/L	Mg mg/L	Fe mg/L	Al mg/L	Cl mg/L	SO_4 mg/L	HCO_3 mg/L	F mg/L	B mg/L	As mg/L	SiO_2 mg/L
1	FFNW	7,7	114								3,05					0,084	
2	FS-001	3,1	970								8,17	479,0			0,26	<0,005	
3	FT-005	7,8	6 200	1 190	112,0	11,0	52,5	0,24	<0,04	0,02	1 900,00	60,2	117	3,62	54,80	8,660	263
4	FT-011	7,4	6 040	1 180	88,3		32,5	0,24			1 860,00	84,1	83		53,40	6,330	258
5	FT-017	7,4	4 030	774	55,4		45,6	3,87			1 110,00	99,1	195		32,10	5,010	204
6	FT-070	7,6	1 180								271,00	21,0	123				141
7	FT-089	7,3	5 890	1 180	51,6	9,8	39,1	0,22	0,10	0,07	1 810,00	128,0	53	3,34	52,70	7,880	248
8	FT-108	8,1	5 600	1 120	48,6		33,5	0,04			1 700,00	122,0	78		49,80	8,330	297
9	FS-002	8,1	4 080								1 170,00					3,930	

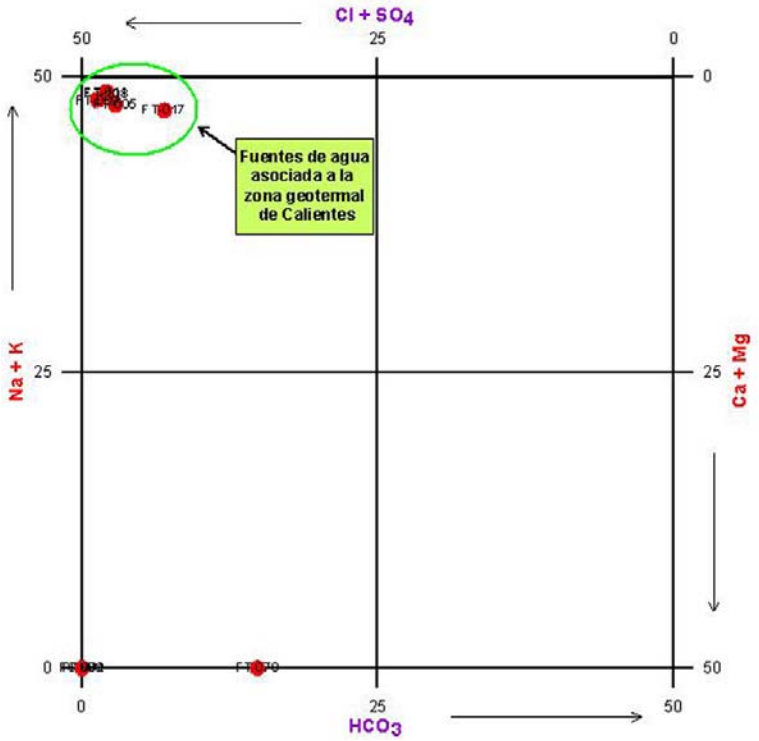

Fig. 40. Diagrama de Langelier.

Según el diagrama ternario (Giggenbach, 1988), las aguas termales pueden ser divididas en los siguientes tipos hidroquímicos, sobre la base de contenidos relativos de Na, Ca y Mg, y las concentraciones relativas de Cl, SO_4 y HCO_3. Para las aguas en estudio, se ha empleado el diagrama ternario de Cl-SO_4-HCO_3 (Fig. 41), que ilustra que las fuentes termales se agrupan dentro de las aguas cloruradas profundas, común en los fluidos geotérmicos profundos, que generlamente se encuentran en sistemas de elevadas temperaturas; es decir, son característicos de áreas que contienen calor, fuentes con flujos grandes de agua y altas concentraciones de cloruros que son alimentados directamente desde reservorios clorurados a nivel profundo. Esto quiere decir que las aguas termales de la zona de Calientes provienen de reservorios geotérmicos (Nicholson, 1993).

Por su parte, la muestra de agua colectada río arriba de Calientes es un tipo de agua sulfatada, posiblemente asociada con fluidos volcánicos ácidos.

El propósito del diagrama de Piper (Fig. 42) es mostrar el agrupamiento de los datos para indicar que las muestras tienen composiciones similares. Todos los elementos mayores pueden ser mostrados en este diagrama, sin embargo, solo muestra proporciones relativas y no concentraciones absolutas.

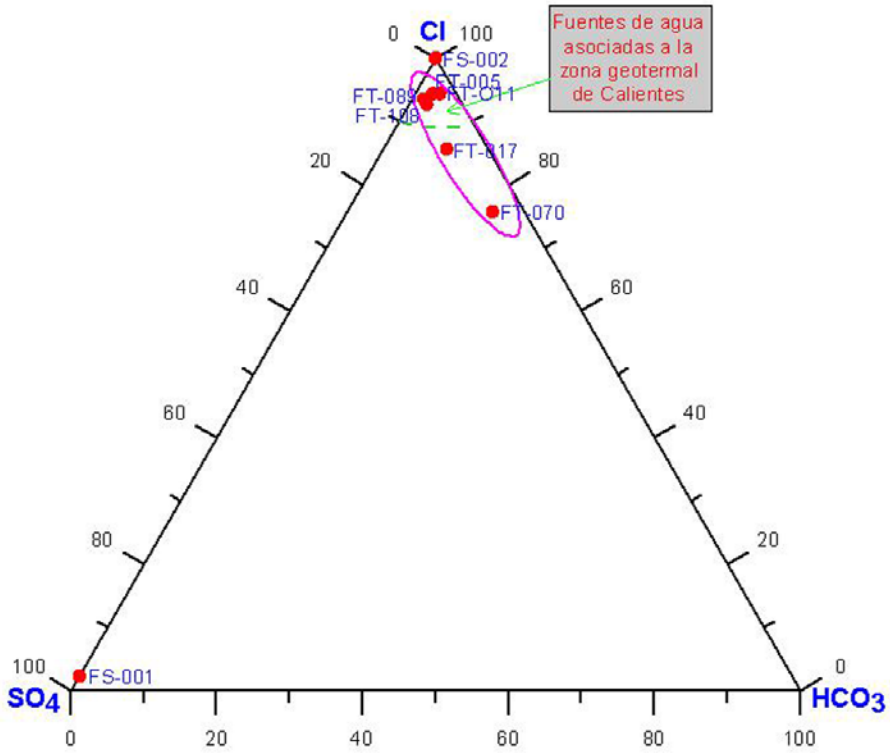

Fig. 41. Diagrama ternario (Giggenbach, 1998).

En la Fig. 42 se observa que las aguas en estudio se ubican dentro del cuadrante de aguas cloruro alcalinas. Esto indica que los principales tipos químicos de las aguas geotermales son Cl^- y Na^+, iones dominantes en la composición química de las aguas en estudio. El diagrama de Piper no hace más que apoyar la hipótesis mostrada por el diagrama de Langelier.

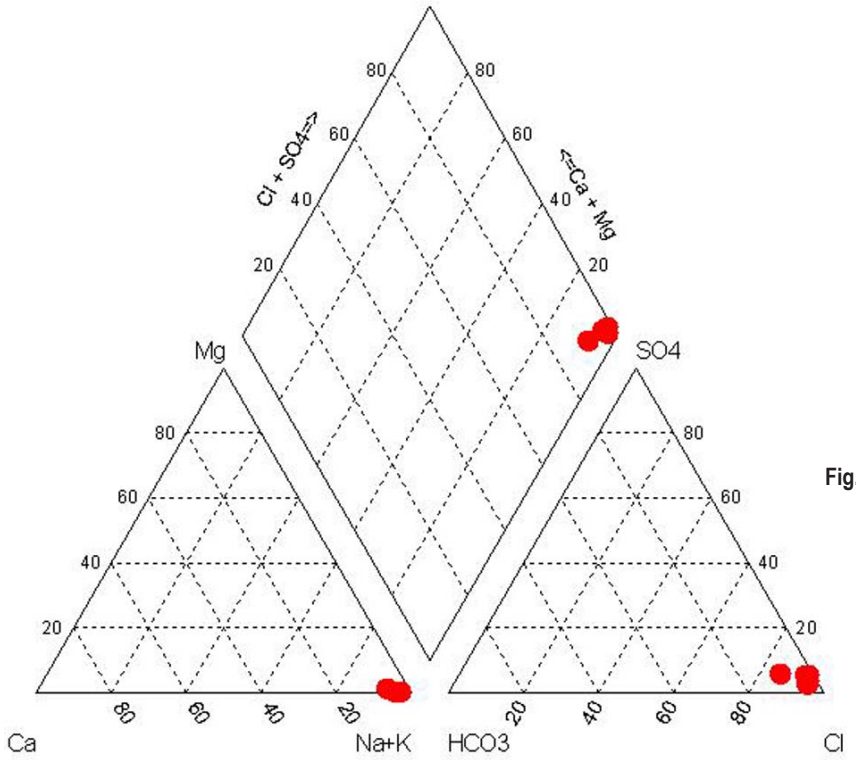

Fig. 42. Diagrama de Pipper.

El diagrama de Schoeller (Marini, 2000) puede ser usado para los cambios hidroquímicos con el tiempo o entre diferentes localizaciones. Los valores para el *Log* de concentración de un número de muestras de agua se unen con una línea y pueden mostrar una amplia gama de concentraciones. La mezcla con agua diluida tiene el efecto de mover la línea de unión o conexión verticalmente sin cambiar su forma (Truesdell, 1991).

En la Fig. 43 se observa que las fuentes FT-005, FT-011, FT-017, FT-089 y FT-108 muestran dentro de su composición química altas concentraciones de sodio (Na) y cloro (Cl), a diferencia de la fuente FT-070 cuyos valores son bajos en Cl, SO_4 y HCO_3, posiblemente por estar diluida con aguas meteóricas. También notamos que la muestra colectada en la parte alta del río presenta como anión dominante el SO_4 característico de aguas ácidas, coincidiendo con el pH de 3,1 obtenido en campo. Asimismo, notamos que la muestra colectada en la parte baja del río presenta alta concentración de cloruros, lo que indica que el agua del río Calientes está siendo alimentada por aguas de este tipo, provenientes de las fuentes termales que se localizan cerca de la orilla.

El boro es un elemento importante para los estudios geotérmicos. Las fuentes que descargan fluidos clorurados usualmente contienen entre 10-50 mg/kg de boro, pero se encuentra en muy altas concentraciones (~800-1000 mg/kg) en las aguas asociadas con rocas sedimentarias ricas en orgánicos. Además, las aguas que están asociadas con rocas andesíticas encajantes y/o volcánicas también presentan niveles altos de boro que pueden estar asociados a actividades geotérmicas tales como volcanes, vapores geotérmicos, entre otros (Nicholson, 1993).

El diagrama binario B-Cl (Fig. 44) muestra que las aguas de la zona de Calientes presentan elevada concentración de boro y alta proporción B/Cl, lo que podría indicar que a niveles profundos hay reacción del agua con las rocas sedimentarias marinas.

El diagrama ternario Na-K-Mg (Giggenbach et.al., 1983) puede ser usado en la clasificación de aguas dentro del equilibrio completo, equilibrio parcial y aguas superficiales. También permite visualizar con mayor claridad el origen de las aguas, así como determinar si el fluido tiene equilibrio con minerales hidrotermales y predecir las temperaturas de equilibrio Tº- Na-K y Tº- K-Mg.

La evaluación de los datos analíticos del contenido de Na^+, K^+ y Mg^{++} que se muestra en la Fig. 45, permite observar que las aguas en estudio se encuentran cerca de la línea de equilibrio químico total, característico de aguas provenientes de reservorios geotermales profundos. También se ha observado que la fuente FT-017 se ubica dentro del equilibrio parcial, y esto sugiere que esta fuente de agua sufre un proceso de dilución o mezcla con aguas superficiales.

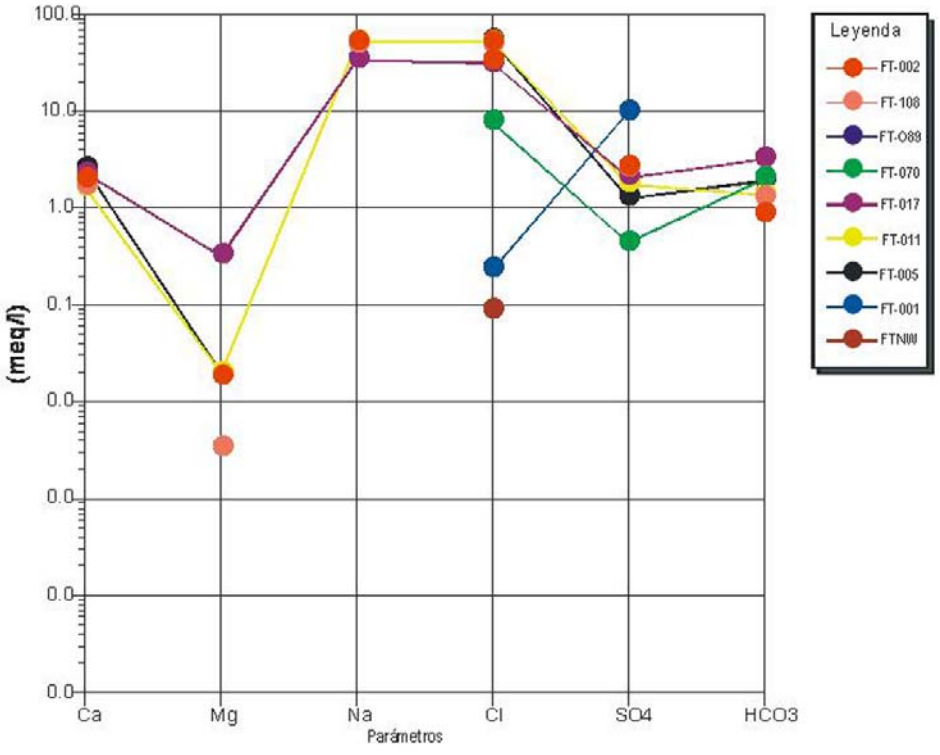

Fig. 43. Diagrama de Schoeller.

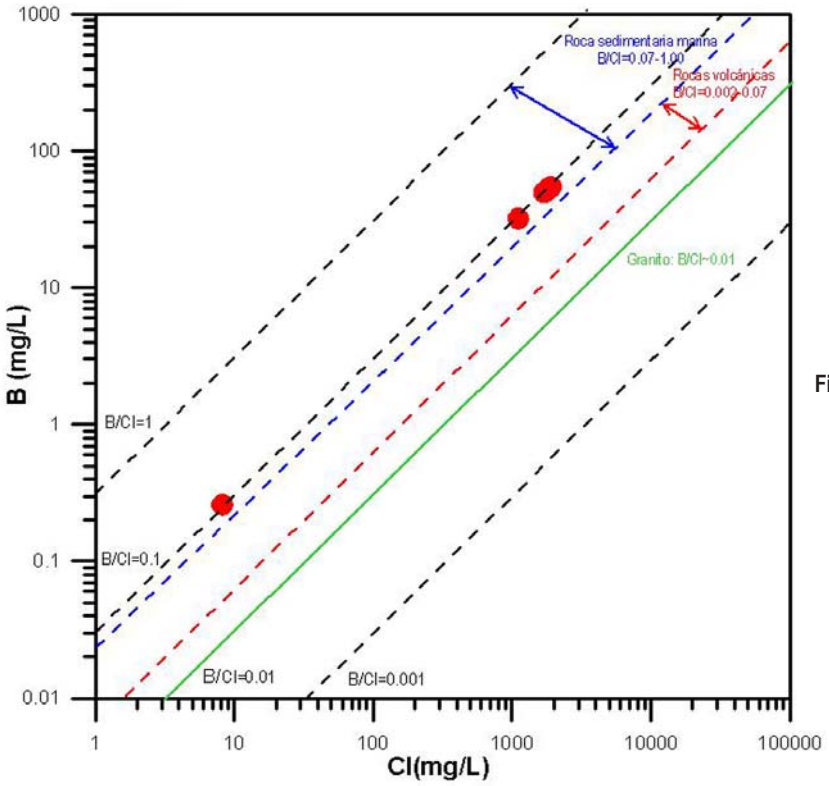

Fig. 44. Diagrama Boro vs Cloruro (Shigeno, et al. 1993).

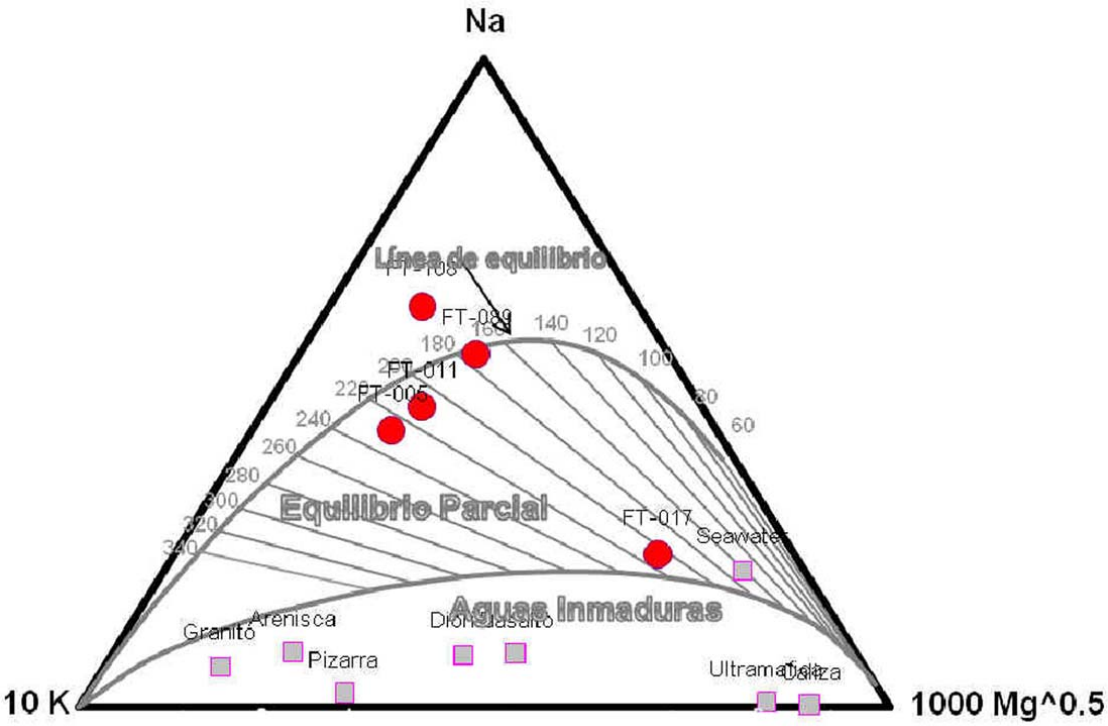

Fig. 45. Diagrama ternario (Giggenbach, 1983).

RESULTADOS DE ISÓTOPOS

Los isótopos estables son una herramienta valiosa para determinar el origen y la dirección de la migración del fluido, asimismo, permite evaluar la intensidad de la interacción entre los fluidos y los minerales de las rocas. Por ejemplo, los isótopos de hidrogeno y oxígeno en aguas geotermales son constantemente usados para obtener mayor información confiable acerca del origen y la posible recarga de un acuífero. El isótopo de äD es usado como un trazador natural para localizar la cuenca de un depósito geotérmico e investigar el paso del flujo de las aguas subterráneas regionales, mientras que el ^{18}O cambia para cada sistema y brinda información acerca de la interacción roca-agua a profundidad. Por lo tanto, el valor de ^{18}O de aguas meteóricas en cualquier lugar depende de la latitud, altitud, temperatura, clima y la distancia desde el océano. Esta variación es sistemática, y Craig (1961) mostró que sobre una escala global la gráfica isotópica de hidrogeno-oxígeno para aguas frescas podría definirse por la ecuación äD = 8ä^{18}O +10. La línea definida por esta ecuación es llamada la línea de agua meteórica.

Craig (Craig et al., 1956; Craig 1963) también demostró que el contenido de äD en aguas geotermales es similar a las aguas meteóricas locales, mientras que el valor de ^{18}O de las aguas geotermales es más positivo que las aguas meteóricas. Esta característica ha podido ser notada en las aguas de Calientes (Fig. 46). Las aguas frías presentan valores de ^{18}O más negativos en comparación a las aguas termales, lo que puede indicar que las aguas termales son una mezcla de aguas meteóricas con fluidos magmáticos (Cuadro 6).

La Fig. 46 muestra la relaciones entre ^{18}O en los límites -16.1 a -13.3 ‰ y äD, en los límites -122 a -111 ‰. Además, se ha observado que los puntos de las fuentes de agua fría se localizan cerca de la Línea de Agua Meteórica Local (Cortecci et al, 2005), indicando que las aguas son alimentadas principalmente por agua meteórica, a través de un periodo largo de circulación de precipitación de agua de lluvia. Asimismo, se nota que los puntos de las fuentes termales se alejan de la Línea de Agua Meteórica

Cuadro 6
Resultados de análisis isotópicos

N.º	*Código*	δ $D(H_2O)$	δ $^{18}O(H_2O)$	δ $^{34}S(SO_4)$	δ $^{18}O(SO_4)$
1	*FFNW*	*-122*	*-16,1*		
2	*FS-001*	*-111*	*-15,4*		
3	*FT-005*	*-117*	*-13,6*	*6,5*	*-7,4*
4	*FT-089*	*-115*	*-13,3*	*10*	*-6,3*

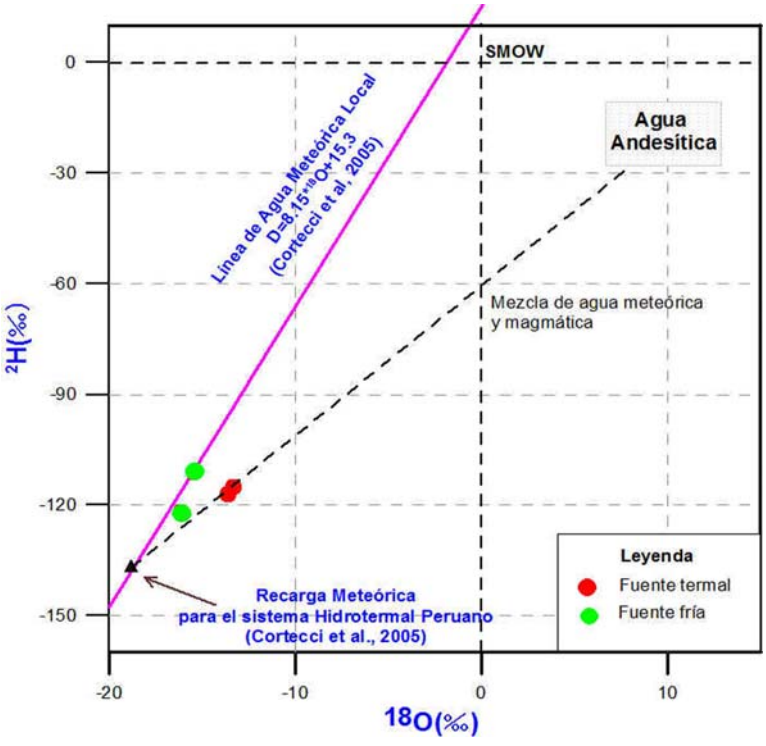

Fig. 46. ä18O vs äD para las aguas de Calientes.

Local, indicando que estas aguas se mezclan con aguas magmáticas.

Las aguas termales son enriquecidas por ambos isótopos de ^{18}O y äD. La interacción de las aguas termales con las rocas circundantes se evidencia en la relación de la temperatura con los isótopos (Hitchon y Friedman, 1969).

La Fig. 47 muestra que las aguas termales y frías pueden presentar valores similares de isótopos de äD, mientras que en la Fig. 48 se nota claramente que las aguas frías muestran valores de isótopos de ^{18}O más negativos que las aguas termales. Asimismo, se observa que los isótopos de ^{18}O son enriquecidos con el incremento de la temperatura, lo que implica que la interacción entre el agua y la roca es afectada por la temperatura que puede producir cambios en las capas de las rocas circundantes al acuífero geotermal (Pang, 2000).

RESULTADOS DE LOS GEOTERMÓMETROS

En la etapa de exploración de un sistema geotérmico, la estimación de las temperaturas a profundidad constituye una tarea geoquímica fundamental que ayuda a estimar el potencial geoenergético disponible y la factibilidad de explotar sus recursos para la generación de energía eléctrica (Fournier, 1991; Santoyo y Verma, 1993; Arnórsson, 2000a; D'Amore y Arnórsson, 2000; Verma, 2002). Para la estimación de temperatura se recurre a geotermómetros que emplean la composición química o isotópica de los fluidos que emergen en manantiales hidrotermales o fumarolas, o que son extraídos de pozos perforados (Benjamin et al., 1983; Nicholson, 1993; Arnórsson et. al., 2006).

Geotermometría química:

Los geotermómetros químicos son herramientas de bajo costo que se usan tanto para predecir las temperaturas de equilibrio de los sistemas geotérmicos, como para dilucidar los principales procesos geoquímicos que ocurren en el interior de los yacimientos. Estos geotermómetros son ecuaciones analíticas fundamentadas, en forma empírica, en bases de datos creadas con mediciones de temperatura y de composición química de fluidos muestreados en pozos o manifestaciones termales (p. ej., Fournier, 1979; Nieva y Nieva, 1987).

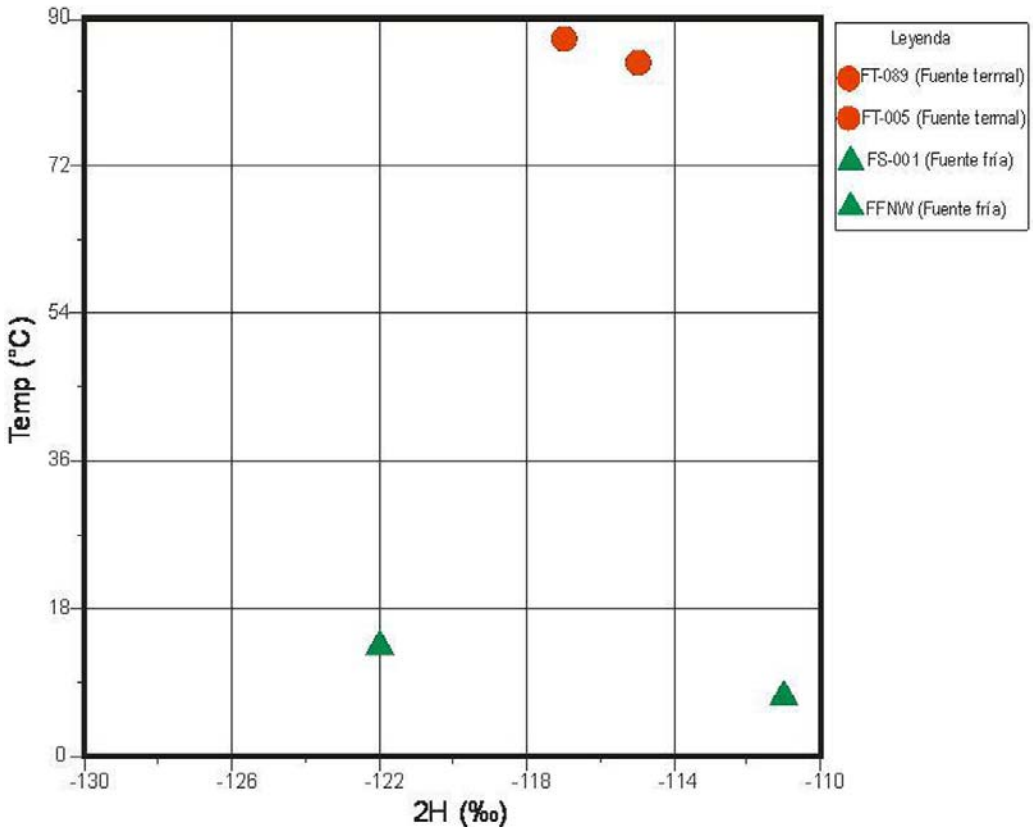

Fig. 47. ä D vs temperatura.

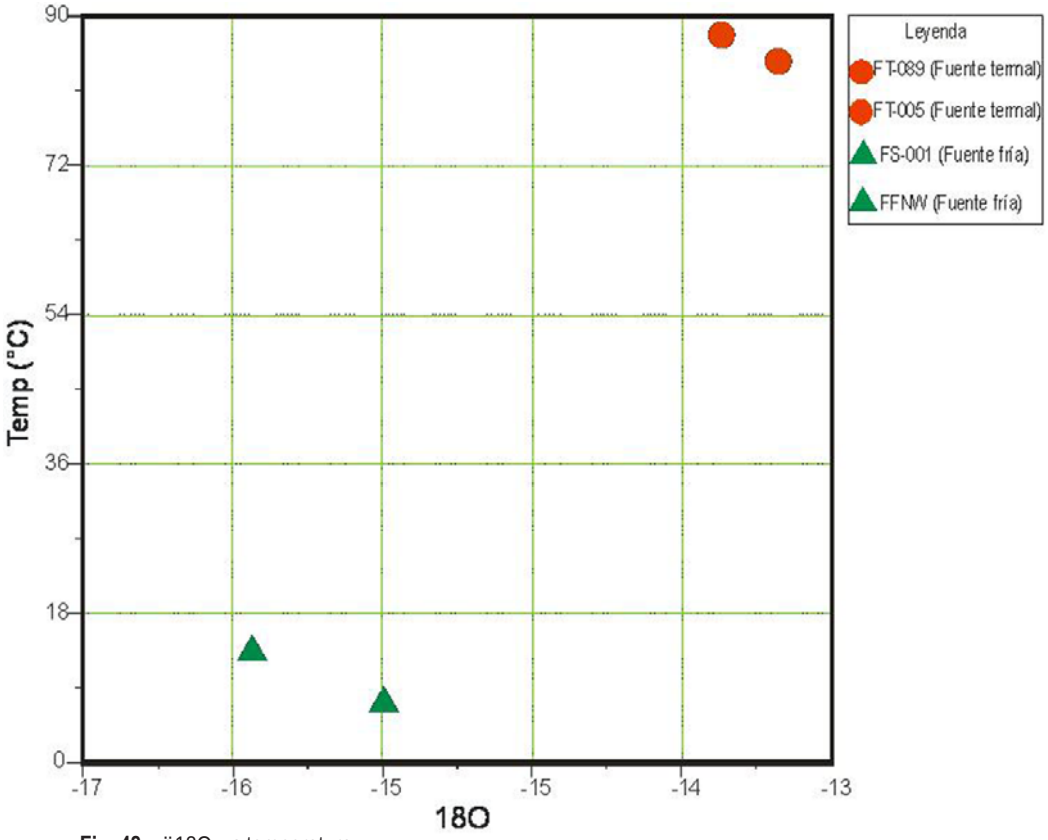

Fig. 48. ä18O vs temperatura.

La geotermometría química en fase líquida permitió estimar la temperatura a profundidad del recurso geotérmico de la zona de Calientes. Según los resultados obtenidos de los geotermómetros (Cuadro 7 y Fig. 49), se estima que la temperatura del recurso geotérmico es superior a 200 °C (entre 240 y 280 °C) a 2000 m de profundidad aproximadamente.

Cuadro 7
Resultados aplicando geotermómetros

N.º	Código	T-Quartz (°C)	T-Calcedonia (°C)	T-α Cristobalita (°C)	T-β Cristobalita (°C)	T-Na/K(T) (°C)	T-NaKCa (°C)	T-NaKCa-Mg (°C)	T-K/Mg (°C)	T-Na/Li (°C)	T – δ 18O(H_2O-SO4) (°C)
1	FT-005	199	181	151	101	181	228	205	205	252	254
2	FT-011	198	180	149	99	159	233	187	194		
3	FT-017	181	160	132	82	154	182	146	126		
4	FT-070	157	133	107	58						
5	FT-089	195	176	146	96	113	192	156	173	239	235
6	FT-108	209	192	160	110	113	193	165	206		

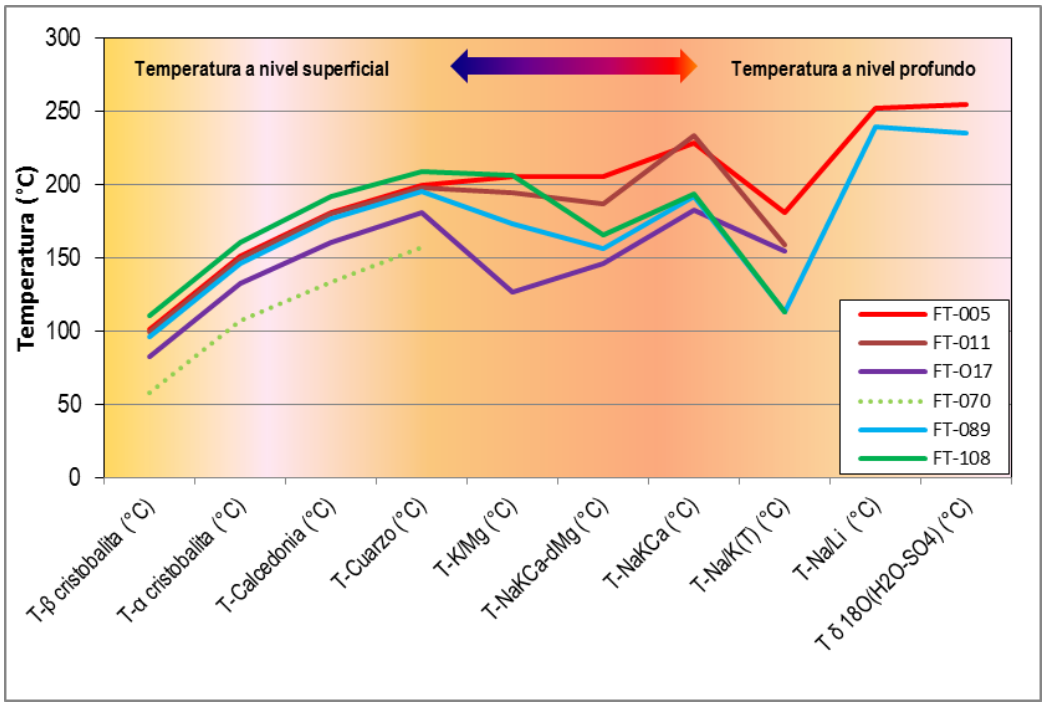

Fig. 49. Temperaturas geoquímicas de aguas termales de la zona geotermal de Calientes.

CAPÍTULO VI

MODELO DE LA ESTRUCTURA GEOTÉRMICA

El modelo conceptual del Campo Geotérmico Calientes está determinado de la siguiente manera:

ESTRUCTURA GEOLÓGICA

a. *Estratigrafía:* El basamento de rocas en el Campo Geotérmico Calientes se compone de rocas sedimentarias cretáceas y los volcánicos cenozoicos. Las rocas sedimentarias se componen de areniscas estratificadas, calizas y areniscas de grano medio; mientras que las volcánicas están conformadas principalmente por flujos de andesitas porfiríticas (Fig. 50), dacitas, flujos piroclásticos, flujos de bloques y cenizas, y lapilli.

   En el área de estudio hay una cuenca angosta, a lo largo del río Calientes, que se extiende en dirección NE-SO y luego de N-S. El valle se encuentra circundado por centros volcánicos recientes, los cuales tienen alturas mayores de 5000 msnm. Las laderas volcánicas están cubiertas por depósitos glaciares.

b. *Estructura geológica:* La descripción del sistema de fallas y fracturas del sistema de Calientes indica la presencia de lineamientos NO-SE a lo largo del río Calientes. En ellos se encuentran numerosas manifestaciones geotermales dentro del valle del río Calientes. Esto indica que el sistema es de una falla coincidente con la falla Fc-1. Adicionalmente se identificó otro sistema de orientación N-S y que se denominó falla Fc-2. Los lineamientos topográficos implicaron la existencia de un sistema de fallas de orientación NNO-SSE (Fig. 23).

   Del estudio magnetotelúrico se identificaron zonas de baja resistividad a lo largo del valle de los ríos Calientes, coincidentes con la falla Fc-1. Se mapearon discontinuidades geoeléctricas en el límite noroeste y a esto se denominó Rc1, asociado a una zona de elevada resistividad en profundidad. Se detectó otra discontinuidad eléctrica de similar orientación a la que se denominó Rc2. La zona de baja resistividad se encuentra entre estas dos discontinuidades y entre ellas está también la falla identificada como Fc-1, por lo que estas discontinuidades geoeléctricas están asociadas a una zona de falla con su zona de fracturamiento.

Fig. 50. Andesitas fracturadas en el sector de Huancane Vinto.

Se pudieron identificar difusamente las discontinuidades geoeléctricas denominadas Rc3, Rc4 y Rc5, por la indefinición del patrón de resistividades, sin embargo se presume que estas discontinuidades son relativamente de corta longitud. La integración de los estudios definirá si estas estructuras están relacionadas al sistema geotérmico.

ESTRUCTURA DEL RESERVORIO

a. *Zonas permeables:* Las zonas permeables del reservorio generalmente están relacionadas a conductos por los cuales el fluido geotérmico migra, y también a la productividad que puedan tener los futuros pozos geotérmicos. Las discontinuidades Rc1 y Rc2 parecen representar estructuras permeables a través de las cuales los fluidos ascienden. Una anomalía de baja resistividad alineada con la discontinuidad Rc1 es claramente detectable en el lado noreste de la zona de alta resistividad profunda y permite detectar la discontinuidad Rc2 en el lado sureste de la misma zona. Entre las dos discontinuidades Rc1 y Rc2, se detectó una estructura profunda levantada en dirección NE-SO, lo que indica la posibilidad que las discontinuidades Rc1 y Rc2 sean un sistema de fracturas que controlan el paso del fluido geotermal a profundidad. De acuerdo a los resultados de la resistividad de la estructura, es posible que los fluidos geotérmicos de elevada temperatura estén ascendiendo a la superficie a través de los conductos, donde se generan las discontinuidades Rc1 y Rc2 equivalentes a una zona de fracturamiento bien desarrollada.

   Como se describió anteriormente, las discontinuidades Rc1 y Rc2 parecen representar la existencia de fallas estructurales en las rocas volcánicas, desarrollando zonas altamente permeables debido al fracturamiento de las fallas (Fig. 51). El alto ángulo de buzamiento de las fallas proporciona buena permeabilidad vertical. Las manifestaciones geotermales la superficie tales como fuentes termales y las zonas de alteración que están situadas a lo largo del río Calientes, son una muestra clara de que la zona de fractura se desarrolla a lo largo del río. Además, la zona está altamente relacionada con los conductos de flujos ascendentes de fluidos en el campo Calientes (Fig. 52).

b. *Zona impermeable:* Compuesta por rocas que evitan que las aguas subterráneas de baja temperatura penetren a las zonas de alta temperatura del reservorio. Asimismo, retiene los fluidos a manera de un sistema de gases subpresurizados, siendo uno de los elementos más importantes para que un reservorio geotérmico pueda suministrar vapor de forma sostenible. Solo fue posible analizar esta zona en base al estudio geofísico

   Esta zona de alta resistividad se encontró ampliamente distribuida desde la parte sureste hasta la parte noreste del área de estudio, con profundidades entre 100 m y 200 m, como se muestra en la Fig. 28a y 28b, y está alineada aproximadamente en dirección NE-SO, con profundidades entre 200 m y 500 m. Se cree que esta zona de alta resistividad refleja la presencia de minerales arcillosos alterados de alta temperatura (cloriticas, illitas y epidota), las cuales a menudo forman las zonas impermeables de alta resistividad que subyacen a la zona de baja resistividad, que podría indicar una zona de temperatura relativamente alta donde posiblemente circulen fluidos geotérmicos.

c. *Reservorio geotérmico:* Almacenado principalmente en zonas de alta permeabilidad a lo largo de las fallas en rocas volcánicas.

   Se reconoce una zona de alta resistividad entre las discontinuidades eléctricas Rc1 y Rc2, y que está alineada en dirección NE-SO. Se supone que esta zona de resistividad relativamente alta refleja la presencia de productos de alteración tales como illita y/o clorita. Por esta razón, comparada con las áreas alrededor de la zona de alta resistividad a profundidad desde la parte suroeste hasta la parte noreste, posiblemente es una señal de la presencia de una zona profunda de alta temperatura. Por lo tanto, se considera que el fluido geotérmico profundo está ascendiendo a través de la zona altamente permeable dentro y a lo largo de las discontinuidades eléctricas Rc1 y Rc2. Se considera que la zona de fractura se desarrolló en esta área debido al desplazamiento de las fallas. El fluido geotérmico ascendente está almacenado en las fracturas debajo de la zona impermeable en una profundidad entre 200 a 500 m. A lo largo del río Calientes, parte del fluido del reservorio junto con gases y vapor, ascienden hasta la superficie a través del sistema de fracturas a lo largo de fallas, y calienta el agua subterránea somera, la que descarga como manantiales termales en ebullición.

ESTRUCTURA TÉRMICA

a. *Actividad volcánica y fuente de calor:* El Campo Geotérmico Calientes está ubicado en una región de actividad volcánica cenozoica representada por un gran número de conos de cenizas, domos y estratovolcanes superpuestos a lo largo y cerca de un eje NE-SO. Este alineamiento implica la existencia de una estructura geológica con la misma orientación. Alrededor del campo Calientes se encuentran varios conos volcánicos como los cerros Choreveco, Amane, López Extraña, Ichurasi, Amarillo, San Pedro, Yucamane Chico, Calientes y el volcán Yucamane (Fig. 53).

   La abundancia de aparatos volcánicos recientes como domos, cráteres de colapso, calderas, volcanes en escudo y secuencias piroclásticas de gran potencia, indican la existencia

Fig. 51. Vista de seis manifestaciones geotermales alineadas por una fractura de rumbo N 45º O.

Fig. 52. Vista de manifestaciones geotermales en el valle Calientes.

Fig. 53. Vista desde el valle Calientes del volcán Yucamane (flanco noreste).

de una cámara magmática aún activa. De esta evidencia se asume que la fuente de calor del campo Calientes está relacionada con la última actividad volcánica cuaternaria.

b. *Temperatura del subsuelo:* Ha sido determinada en base al uso de geotermómetros químicos. Los cálculos de las temperaturas de sílice y de la mayoría de cationes resultaron de 200 ºC o menores. Pero, en el caso del agua de los manantiales FT-005 y FT-089, las temperaturas sodio/litio (Na/Li) y las de isótopos de oxigeno (T-ä^{18}O en (SO_4-H_2O)), que representan temperaturas del fluido profundo, resultaron en la vecindad de 240-250 ºC.

   La temperatura del isótopo de oxigeno (T-ä^{18}O) no se pudo correlacionar con la información histórica del agua ya que sólo existen unas pocas muestras de aguas del campo geotérmico Calientes y muestran temperaturas T-Na/Li alrededor de 280 ºC, independientemente de la temperatura sílice.

   Las fuentes termales del campo Calientes tienen aguas con pH neutro y son del tipo cloruradas sódicas, revelando su origen en una salmuera geotérmica profunda. La temperatura medida en las fuentes termales tiene valores cercanos al punto de ebullición, sin embargo, su química no permite estimar temperaturas a profundidad con una alta precisión. La máxima temperatura posible del fluido profundo en el campo se estima en 240-280 ºC a partir de la química superficial.

FLUJO DEL FLUIDO DEL RESERVORIO

a. *Características químicas del fluido:* Además de lo mencionado en el apartado anterior, algunas aguas son relativamente bajas en cloruros, incluyendo las de los manantiales FT-017 y FT-070 que son clasificadas como del tipo Cl-HCO_3. La concentración de bicarbonato relativamente alta (HCO_3) puede implicar una menor temperatura del acuífero.

   El agua termal del campo tiene concentración relativamente alta en boro (B), la cual alcanza 54,8 mg/L. La proporción atómica de B/Cl relativamente alta (alrededor de 0,1) sugiere que el agua caliente ha circulado en el nivel profundo, donde existen algunas rocas sedimentarias.

   La proporción B/Cl del agua termal en Calientes es menor que la proporción del agua termal de Borateras (B/Cl=1,5). Esto sugiere que la contribución de las rocas sedimentarias marinas en las aguas termales de Calientes es menor que en las aguas de Borateras, y que ambos sistemas hidrotermales están separados uno del otro.

b. *Origen del fluido:* De la composición isotópica de hidrógeno y oxígeno, además de la concentración de Cl en las aguas de los manantiales, parece probable que el agua de reservorio geotérmico en el campo se origina con la mezcla de agua meteórica y agua magmática que circula a profundidad en un ambiente sedimentario.

   Sin embargo, la proporción de agua magmática (agua andesítica) en la mezcla se estima solo alrededor de 20 %. Por lo tanto, el principal constituyente es agua meteórica infiltrada en el subsuelo.

c. *Patrón de flujo de fluidos:* El posible fluido original en el campo proviene principalmente de aguas meteóricas que son calentadas por la adición de fluido magmático caliente y por el calor conductivo de los cuerpos magmáticos en profundidad, a temperaturas en un rango de 240 a 280 ºC. La proporción de fluido magmático es estimado alrededor de 20 %, tomando en consideración la ubicación de las manifestaciones termales y la topografía del área alrededor de ellas. La contribución del agua meteórica a los fluidos térmicos se realiza a través del proceso de infiltración alrededor del sur del área volcánica representado por el cerro López Extraña. Se piensa que el fluido térmico ha circulado en niveles profundos donde hay rocas que tienen contenidos de boro (B) relativamente altos.

El fluido original asciende a través de zonas de alta permeabilidad desarrolladas a lo largo de las fallas y se almacena en rocas volcánicas. Las zonas de alta permeabilidad se desarrollan principalmente a lo largo de las fallas con tendencia NE-SO, anteriormente descritas como la falla **Fc-1**, y las discontinuidades resistivas **Rc1** y **Rc2**.

Se considera que el fluido geotérmico en las profundidades del campo asciende a través de la zona de alta permeabilidad a lo largo de las discontinuidades de resistividad **Rc1** y **Rc2**. El fluido geotérmico ascendente se almacena en las fracturas debajo de la capa impermeable a profundidades entre 200 y 500 m.

El agua caliente asciende hasta niveles someros donde entra en ebullición debido a la caída de presión, luego parte del vapor y los gases producidos por ebullición alcanzan la superficie, manifestándose como fumarolas. El agua caliente ascendente se descarga en la superficie como aguas en ebullición. El agua de las fuentes termales que tiene una baja temperatura relativa es diluida por aguas subterráneas someras. La temperatura del agua caliente en niveles relativamente someros es estimada en 200 ºC.

CAPÍTULO VII

FACTIBILIDAD DE DESARROLLO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA EN EL PERÚ

VALORES DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

Valor de la geotermia como una fuente de energía altamente confiable

Dentro de las energías renovables, una de las cualidades de la energía eléctrica generada a base de recursos geotérmicos es el alto factor de utilización y la estabilidad del suministro a la red día y noche y durante todo el año, por lo que la geotermia es una fuente de suministro muy confiable (véase un ejemplo en la Fig. 54).

Valor de energía geotérmica como una fuente de energía autóctona

La energía geotérmica es genuinamente una energía autóctona. En un país que no cuenta con recursos fósiles de energía, el uso de energía geotérmica representa la oportunidad de disminuir la importación de combustibles; y en el caso de un país que dispone de fuentes fósiles en cantidades exportables, la utilización de la energía geotérmica podría representar un incremento en sus exportaciones o un ahorro de sus reservas para las generaciones futuras. El Perú se encuentra en la segunda categoría y asumiendo el funcionamiento de una planta geotérmica —por ejemplo de 55 MW—, en términos de energía primaria equivaldría a la explotación de un campo de petróleo de producción anual de 650 mil barriles equivalentes de petróleo, sin embargo, ya que el equivalente es energía renovable, esta fuente se podría considerar prácticamente inagotable. Tomando en consideración el valor actual de mercado, el equivalente anual seria de 52 millones de dólares y el ahorro en el lapso de 30 años sería aproximadamente 20 millones de barriles, o sea 1,600 millones de dólares (Fig. 55).

Valor de la energía geotérmica en la estabilidad de la balanza económica

A pesar de que el desarrollo de la energía geotérmica requiere comparativamente una inversión inicial mayor, esta es independiente del movimiento en el precio internacional de los combustibles fósiles o de los movimientos del tipo de cambio de moneda nacional. Como resultado, la geotermia resulta ser una fuente de energía de precio constante, lo que significa estabilidad en la balanza económica del país que la explota.

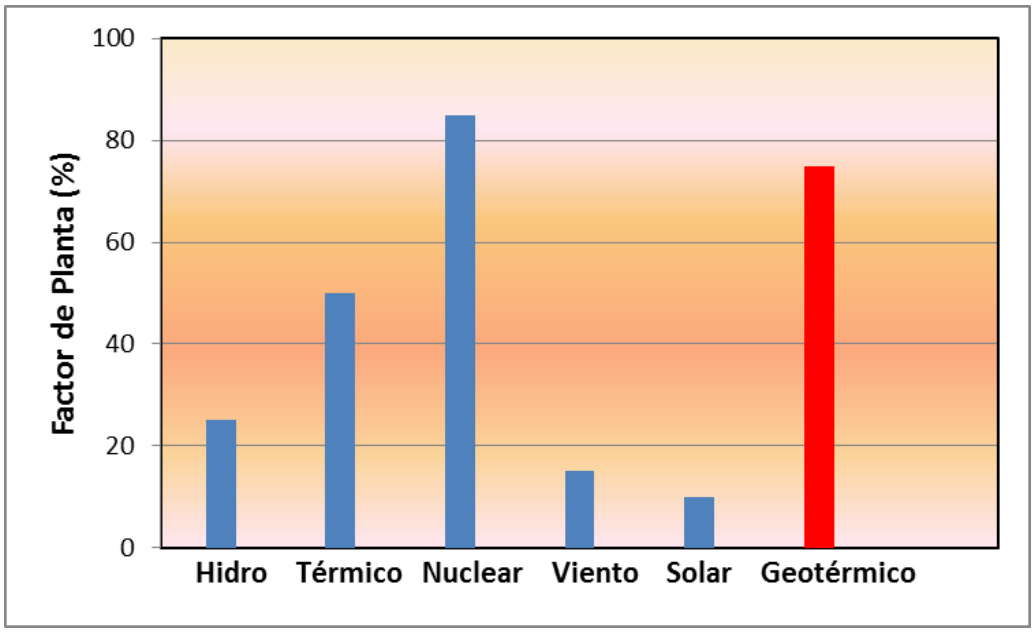

Fig. 54. Factor de utilización de las diferentes fuentes de electricidad en Japón (West Jec, 2008).

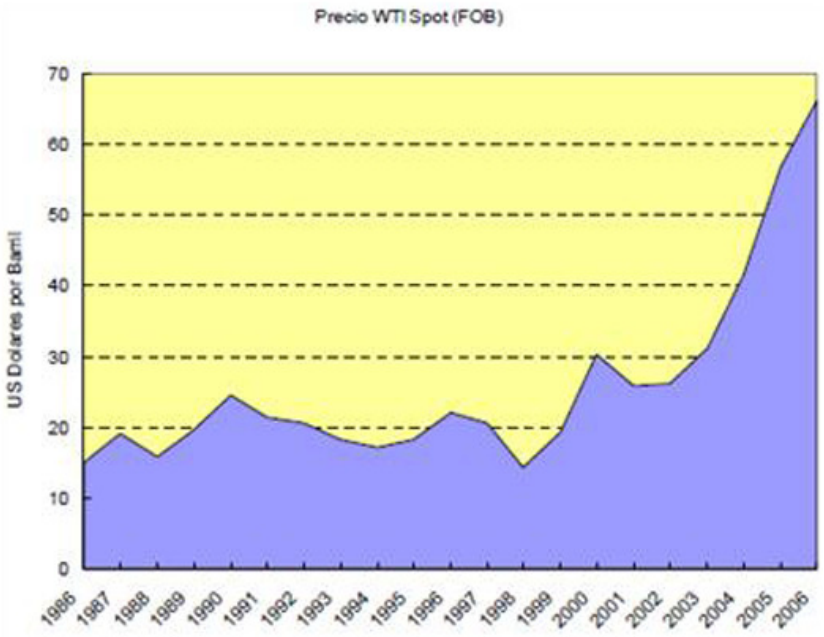

Fig. 55. Variación del precio internacional del petróleo (West Jec, 2008).

Valor de la energía geotérmica como fuente energética amigable al medioambiente

La conversión de la energía geotérmica en electricidad no involucra procesos de combustión, por lo que no emite contaminantes como SO_x, NO_x, partículas de carbón etc., y además su explotación emite pequeñas cantidades de CO_2. La energía geotérmica es amigable al medioambiente y su explotación contribuye al desarrollo de los países sin favorecer el cambio climático (Fig. 56).

Valor de la energía geotérmica en el desarrollo local

El agua caliente de las fuentes termales, o aquella que se genera como subproducto de la utilización de esta energía para generar electricidad, se puede utilizar como fuente calorífica en la agricultura, acuacultura o en diversas industrias locales. Esto último de manera especial en las zonas frías como aquellas del altiplano andino, y en el caso de las zonas frías y templadas se puede utilizar para secar cereales y maderas. El vapor resultante del proceso de generación de electricidad puede ser empleado para el suministro de agua a la agricultura, ganadería o para consumo humano después de extraerle calor en algún proceso industrial. Por lo tanto, la energía geotérmica puede integrar el desarrollo energético y fomentar el desarrollo local.

NECESIDAD DE DESARROLLAR LA ENERGÍA GEOTÉRMICA EN PERÚ

El Perú cuenta con recursos energéticos fósiles (petróleo y gas natural), abundantes recursos hídricos y geotérmicos, entre otros. Las reservas estimada de petróleo son 930 millones de barriles y la producción anual es 42 millones de barriles (al año 2006), que representan 22 años más de autosuficiencia manteniendo el actual 60 % de cobertura de la demanda interna con el petróleo nacional. La reserva estimada de gas natural es 87 billones de pies cúbicos y la producción anual es 300,000 millones de pies cúbicos (al año 2004), lo que representa 290 años de autosuficiencia. La capacidad instalada en el país para el año 2005 fue de 5221 MW. La distribución por fuentes de energía fue 3119 MW (59,7 %) hidráulica, 2101 MW (40,2 %) térmica, 1 MW (0 %) eólico. La generación térmica se basó en diesel, gas natural, carbón. etc., y la capacidad instalada de las plantas a base de gas natural fue de 960 MW (18,4 %). La generación total de electricidad del año 2005 fue 23811 GWh, mientras que la generación hidráulica fue 17,567 GWh (73,8 %), la térmica fue 6243 GWh (26,2 %) y la eólica 1 GWh (0 %). La generación térmica con gas natural genera 4100 GWh de electricidad y ocupa 17,2 % de la generación total de electricidad. En el Plan Referencial de Electricidad 2006-2015 se estima que el gas natural ocupará 35 % de la generación de electricidad cuando se haya instalado en el año 2015 la planta térmica a base de gas natural con capacidad de 2010 MW (Cuadro 8, Figs. 57 y 58), (MINEM, 2006).

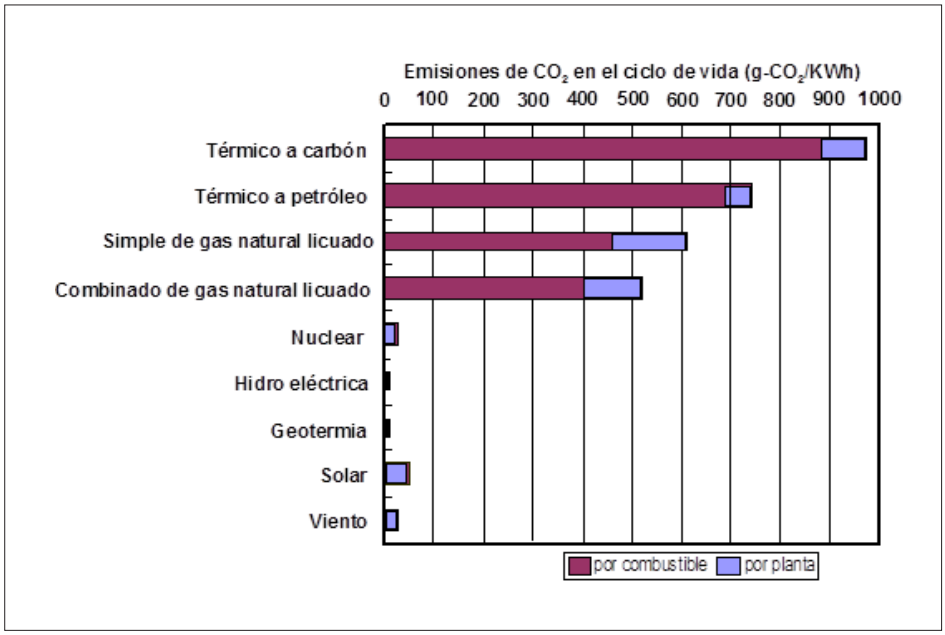

Fig. 56. Emisiones de CO_2 en el ciclo de vida de las fuentes de electricidad.

(**Fuente:** Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan; CRIEPI Review 45, noviembre del 2001).

Cuadro 8

Plan de Expansión de la Generación 2006-2015, escenario base

	Tipo	MW	(%)	GWh	(%)		Comentarios
Existente	Hidro	3 119	59,7	17 567	73,8	1	Valores de MW y GWh derivados del Reporte Anual 2005 p.2, p.5
	Térmico	2 101	40,2	6 243	26,2	2	"
	Gas Natural	960	18,4	4,1	17,2	3	Valores de MW y GWh derivados del Reporte Anual 2005 p.46
	Carbon	141	2,7	831	3,5	4	"
	Diesel y Residuos	1 000	19,2	1 312	5,5	5	"
	Viento	1	0	1	0	6	Valores de MW y GWh derivados del Reporte Anual 2005 p.2, p.5
	Total	5 221	100	23 811	100	7	"
Adiciones en el caso base (2006 - 2015)	Hidro	1 153	42,5			8	Los GWh fueron calculados del Plan de Desarrollo 2006-2015 p.2
	Térmico	1 561	57,5			9	"
	Gas Natural	201				10	"
	Carbon					11	"
	Diesel y Residuos	-449				12	Ajustados entre 7 y 21
	Viento					13	
	Total	2 714	100			14	Ajustados entre 7 y 21
Plan en el caso base (2015)	Hidro	4 272	53,8	27 121	62	15	Los GWh fueron estimados del Plan de Desarrollo 2006-2015 p.2
	Térmico	3 662	46,1	16 622	38	16	"
	Gas Natural	2 970	37,4	15 310	35	17	"
	Carbon	141	1,8	803	1,8	18	"
	Diesel y Residuos	551	6,9	509	1,2	19	"
	Viento	1	0	1	0	20	"
	Total	7 935	100	43 744	100	21	7,935 MW=6.199MW x 1.28 (margen de reserva)

Fuente: MINEM, 2006)

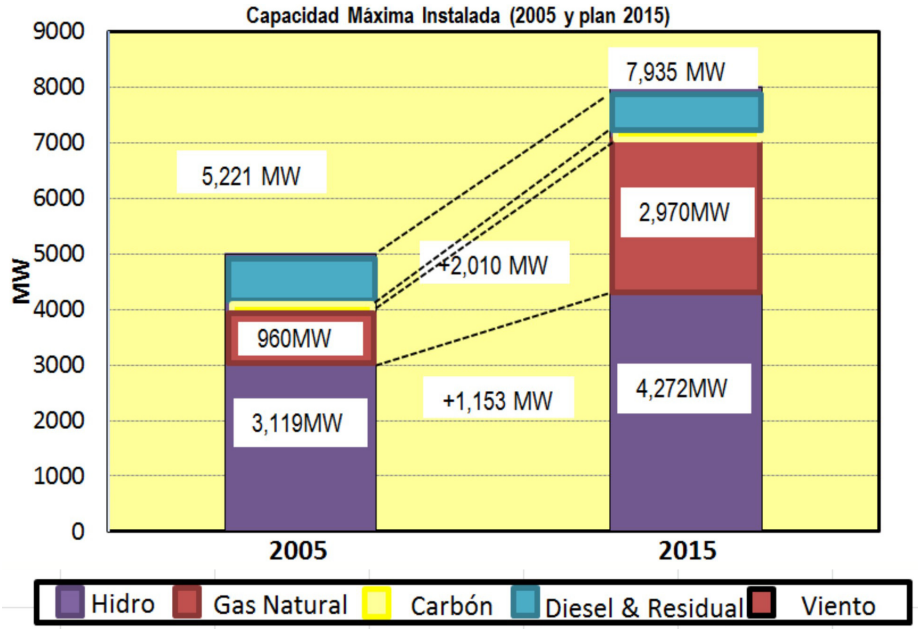

Fig. 57. Mezcla de la generación de electricidad en el año 2015, escenario base.

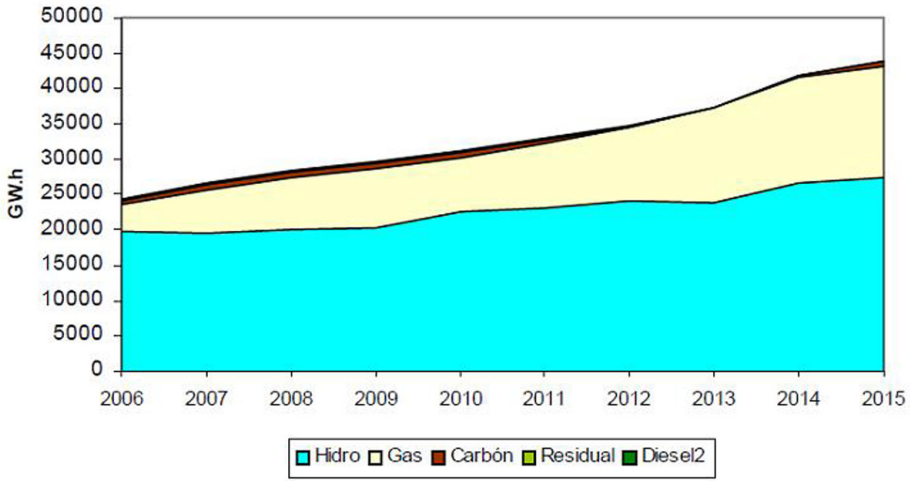

Fig. 58. Estructura de la generación de electricidad en el año 2015, escenario base.

La necesidad de desarrollar la energía geotérmica en Perú deriva en primer lugar de la necesidad de elevar la autosuficiencia de energía. El país tiene abundantes recursos energéticos. Sin embargo, mientras la producción doméstica de energía va disminuyendo por la reducción de la producción de petróleo, la importación de la energía está aumentando por el incremento de la demanda interna. Por esta razón, la tasa de autosuficiencia de energía, que excedía el 100 % en el año 1990, tiende a disminuir consecuentemente estos años. El año 2004 era menos de 70 % y la tendencia a la dependencia de la energía importada es cada vez más evidente (Cuadro 9, Fig. 59).

Para asegurar un abastecimiento estable de energía, es indispensable elevar la tasa de autosuficiencia de energía. Sin embargo, en caso del petróleo doméstico, se estima que solo será posible la extracción durante 22 años más si se mantiene la tasa de producción actual. En caso del gas natural, el consumo es todavía bajo pero se prevé un incremento de su uso como el combustible para generación de electricidad y también por el incremento de la

Cuadro 9

Abastecimiento de Energía y tasa de autosuficiencia

(Unidad: ´000 TOE)

Suministro de energía	1990	1995	2000	2004
Producción (a)	8 422	8 081	7 655	8 266
(Desglose Carbón)	55	98	8	15
Petróleo	6 929	6 123	5 578	4 698
Gas	537	675	679	867
Electricidad (*1)	901	1 185	1 390	2 686
Importaciones	1 669	4 386	5 703	6 744
Exportaciones	2 312	2 587	2 246	2 933
Almacenamiento	-310	-990	-799	-87
Total de suministro de energía primaria	7 469	8 890	10 313	11 990
Independencia energética (a)(b)	112,80%	90,90%	74,20%	68,90%

(Nota)*1: Electricidad es calculada como energía primaria base.
(http://unstats.un.org./unsd/energy/)
(http://www.iea.org/stats/defs.asp)

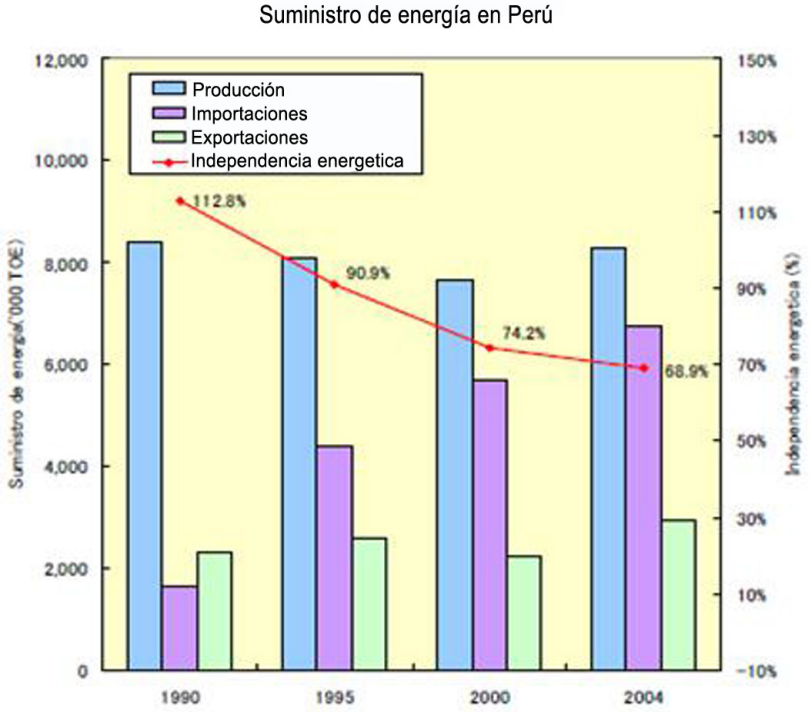

Fig. 59 Abastecimiento de energía y tasa de autosuficiencia.

(http://unstats.un.org./unsd/energy/)
(http://www.iea.org/stats/defs.asp)

demanda una vez que entre en operación la planta de gas licuado para exportación. Tomando en cuenta estos factores se estima una autosuficiencia de solo 27 años (Cuadro 10). En esta situación, es urgente el desarrollo de energía doméstica y renovable para aumentar la tasa de autosuficiencia de energía.

Otra justificación para que Perú emprenda el desarrollo de sus recursos geotérmicos es el beneficio que este generaría al Estado al poder destinar el gas natural que está utilizando actualmente para la generación de la electricidad a otras aplicaciones como la exportación o el ahorro de combustible para aumentar el periodo de autosuficiencia.

Si se construyese una planta geotérmica para sustituir el uso de gas natural para la generación de electricidad, la operación económica de la planta térmica dependería mucho del costo de combustible anualmente, aunque el costo de inversión fuera pequeño.

La planta geotérmica, para la cual el costo inicial es mucho mayor, no requiere de combustible, por lo que los costos de operación y mantenimiento son mucho menores. Es decir, en el caso de la geotermia, su elevado costo de inversión incluye el prepago de combustible, pero este no depende de las variaciones del precio internacional en el mercado. Como se muestra en la Fig. 60, aunque en la fase de inversión inicial haya diferencias a favor del a planta térmica, en el caso de la geotermia se puede ahorrar el costo del combustible en cada año de operación. Aún más, si el gas natural no se quema para la generación de electricidad, puede repercutir en la estrategia de independencia energética al ahorrarlo o impactar positivamente la balanza comercial y la economía nacional al exportarlo al precio internacional del mercado (West Jec, 2008).

Cuadro 10

Posible periodo de autosuficiencia de petróleo y de gas natural domésticos

	Reservas probadas (R)	Producción (2004) (P)	Producción proyectada (2015) (P´)	Autosuficiencia años (R)/ (P) o (P´)
Carbón	930 millones de barriles	42 millones de barriles/año		22,1 Años
Gas Natural	8,7 trillones de p.c	30 billones p.c/año	324 billones p.c/año	26,9 Años
Electricidad			116 billones p.c/año (*1)	
LNG			208 billones p.c./año (*2)	

(Nota) *1: Basado en 9.0 millón m3/día en el caso base del Plan de desarrollo Eléctrico (2006-2015)
*2: Estimado para una producción de 4.45 millones LNG. (4.45 millón ton x 1.33 m3/kg)

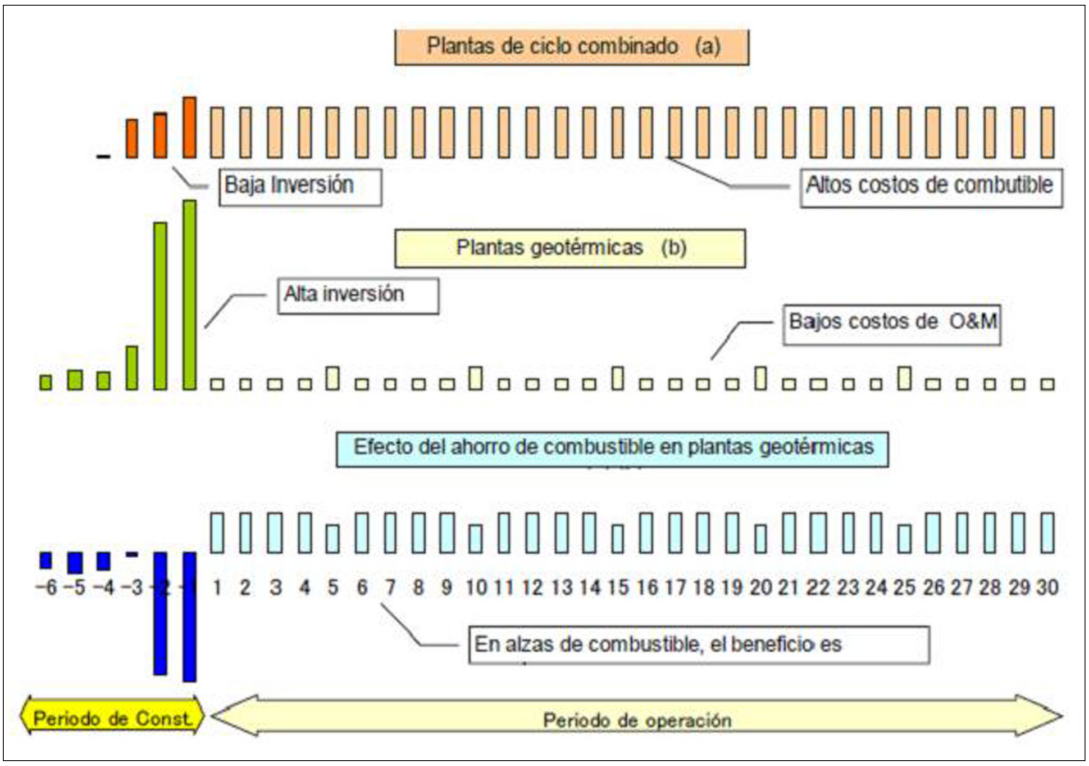

Fig. 60 Comparación de la generación térmica y geotérmica (esquema general), (West Jec, 2008).

CAPÍTULO VIII
CONCLUSIONES

- El Campo Geotérmico Calientes, ubicado en el valle del mismo nombre, se encuentra circundado por numerosos centros volcánicos de edad Pleistocénica y estructuras tectónicas principalmente con dirección NE-SO. En la parte oeste del valle se localiza el complejo volcánico Yucamane- Calientes-Yucamane Chico, constituido principalmente por flujos de lava, domos de lava y algunos remanentes de flujos piroclásticos; de todos estos volcanes Yucamane presentan la actividad más reciente, mientras que los volcanes Calientes y Yucamane Chico, localizados hacia la parte norte, posiblemente presentaron actividad antes del Pleistoceno.
- El mapeo geológico ha permitido identificar el afloramiento predominante de rocas volcánicas neógenas, las cuales se presentan altamente fracturadas; sobre estas rocas hay depósitos cuaternarios, especialmente rellenando las zonas de quebradas afluentes al valle.
- El análisis estructural del valle Calientes ha permitido determinar que se encuentra controlado estructuralmente por dos lineamientos, el primero de rumbo NE–SO, desde la parte norte del valle hasta el sector de Ancochaque, desde aquí hasta el sector sur del valle, el rumbo cambia de N-S. Asimismo en la zona de Ancochaque también se puede identificar lineamientos estructurales secundarios de rumbo NO-SE, y en la intersección de estos lineamientos aparecen en superficie las manifestaciones geotermales en dirección NE.
- En el valle Calientes se puede observar depósitos grandes de sínter, formados por la precipitación de carbonatos y sílica, característicos de los campos geotermales, asimismo se observa zonas de alteración hidrotermal, como los cerros López Extraña o Yucamane Chico entre otros, que evidencian la actividad geotermal en la zona. En la parte del sur del volcán Yucamane, hay pequeños afloramientos de arenisca de cuarzo de la formación Hualhuani, del grupo Yura, y de la misma manera en la parte sur del Campo Geotermal Calientes hay afloramientos de calizas de Gramadal.
- En el estudio se aplicó el método de MT que ha permitido tener una visión geotermal del campo Calientes, y también ha ayudado a definir las posibles zonas de perforación.
- En Calientes se han encontrado zonas de bajas resistividades a poca profundidad que podrían estar relacionadas a la presencia de minerales arcillosos de baja temperatura tales como la esmectita y zeolita que actuarían como capa impermeable. También se ha obtenido valores altos de resistividad a profundidades de 500 hasta 1500 m que podrían estar asociados a la circulación de fluidos geotérmicos y probablemente también estén presentes productos de alteración, tales como arcillas y cloritas de alta temperatura.
- A profundidades mayores a 2000 y 2500 m, la distribución uniforme de la resistividad (mayor a 30 ohm-m) podría sugerir una zona de alta temperatura. La interacción de la zona más profunda desde donde proviene la fuente de alta temperatura y el fluido geotérmico más superficial (200 a 300 m), podrían estar controladas por las discontinuidades (probablemente fallas) Rc1 y Rc2 que se extenderían desde la superficie hasta 2000 m de profundidad aproximadamente.
- El estudio hidrogeológico ha permitido diferenciar diversas unidades acuíferas, donde los acuíferos más importantes son los porosos no consolidados ubicados en los depósitos cuaternarios, con caudales máximos de surgencia que sobrepasan 20 L/s.
- El resultado de los estudios geoquímicos de las aguas termales asociadas al Campo Geotermal Calientes se clasifican en cloruradas alcalinas Cl-Na, provenientes de reservorios clorurados profundos.
- La relación entre isótopos estables ^{18}O y äD indica que las aguas termales se originan de una mezcla entre agua meteórica y magmática.
- La elevada proporción atómica de B/Cl muestra que el reservorio geotermal se desarrolla en rocas sedimentarias marinas pertenecientes a un basamento del Mesozoico.
- Con la geotermometría química en fase líquida se estimó la temperatura del recurso geotérmico de la Zona de Calientes. La temperatura a profundidad es superior a 200 °C (entre 240 y 280 °C) a 2000 m de profundidad aproximadamente.
- El origen del fluido geotermal se atribuye a la interacción entre un cuerpo magmático profundo y el agua meteórica,

adquiriendo temperaturas elevadas debido al aporte de calor generado por el cuerpo magmático y muchas veces recibe un aporte de fluidos magmáticos. para luego ascender a la superficie como consecuencia de altas temperaturas a través de zonas de alta permeabilidad (zonas de fallas).

- Es importante continuar con el desarrollo del Campo Geotérmico Calientes, realizando mayores estudios de detalle que permitan establecer la prefactibilidad y comprobar la existencia del recurso, para lo cual se deben realizar las primeras perforaciones geotérmicas.

BIBLIOGRAFÍA

Arnórsson, S., ed. (2000) - *Isotopic and chemical techniques in geothermal exploration, development and use: sampling methods, data handling, interpretation*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 351 p.

Arnórsson, S.; Bjarnason, J.O.; Giroud, N.; Gunnarsson, I. & Stefánsson, A. (2006) - Sampling and analysis of geothermal fluids. *Geofluids*, 6(3): 203-216.

Baquero, J.C. (2007) – *Hidrogeología minera y ambiental*, separata de curso. Lima: Red Alfa DESIR, 266 p.

Benjamin, T.; Charles, R. & Vidale, R. (1983) - Thermodynamic parameters and experimental data for the Na-K-Ca geothermomether. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 15 (1-3): 167-186.

Bogomolov, G.V. (1967) - *Hydrogéologie et notions de géologie d´ingénieur*. Moscou: Ed. de la Paix, 279 p.

Central Research Institute of Electric Power Industry (2001) – Clarification and control of global warming. *Japan CRIEPI Review* (en línea), 45: 65-66. (consulta: enero 2008). Disponible en: <http://criepi.denken.or.jp/jp/pub/review/No45/>

Cortecci, G.; Boschetti, T.; Mussi, M.; Lameli, C.H.; Mucchino, C. & Barbieri, M. (2005) - New chemical and original isotopic data on waters from El Tatio geothermal field, northern Chile. *Geochemical Journal*, 39(6): 547-571.

Cossío, A. & Vargas, L. (1979) - Perspectivas de desarrollo de la energía geotérmica. En: *Primer Simposium Nacional: La Energía y sus Perspectivas*. Lima: Ministerio de Energía y Minas, t. 2, p. 384-435.

Craig, H.; Boato, G &White, D.E. (1956) - *Isotopic geochemistry of thermal waters. Chapter 5 of Nuclear processes in geologic settings*, proceedings of the 2d conference, Pennsylvania State University, September 8-10, 1955. [s.l.]: National Research Council, Publication, 400, p. 29-38.

Craig, H. (1961) - Isotopic variations in meteoric waters. Science, 133(3465): 1702-1703.

Craig, H. (1963) - The isotopic geochemistry of water and carbon in geothermal areas. En: Tongiorgi, E., ed. *Nuclear geology in geothermal areas, Proceedings of the First Spoleto Conference.* Pisa: Consiglio Nazionale delle Ricerche, Laboratorio di Geologia Nucleare, p. 17-53.

D'Amore, F. & Arnórsson, S. (2000) - Geothermometry. En: Arnórsson, S., ed. *Isotopic and chemical techniques in geothermal exploration, development and use: sampling methods, data handling, interpretation*. Vienna: International Atomic Energy Agency, p. 152-199.

Fournier, R.O. (1979) - A revised equation for the Na/K geothermometer. *Geothermal Resources Council Transactions*, (3): 221-224.

Fournier, R.O. (1991) – Water geothermometers applied to geothermal energy. En: D'Amore, F., comp. *Applications of geochemistry in geothermal reservoir development*. Rome: United Nations Institute for Training and Research / United Nations Development Programme, p. 37-69.

France, L.J. (1985) - *Geochronology, stratigraphy, and petrochemistry of the Upper Tertiary volcanic arc, southernmost Peru, Central Andes*. Master Thesis, Queen's University, Kingston, 182 p.

Fytikas, M.; Kavouridis T.; Leonis, C. & Marini, L. (1989) - Geochemical exploration of the three most significant geothermal areas of Lesbos Island, Greece. *Geothermics*, 18(3): 465-475.

Giggenbach, W.F. (1988) - Geothermal solute equilibria; derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(12): 2749-2765.

Giggenbach, W.F.; Gonfiantini, R.; Jangi, B.L. & Truesdell, A.H. (1983) - Isotopic and chemical composition of Parbati valley geothermal discharges, North-West Himalaya, India. *Geothermics*, 12(2-3): 199-222.

Hitchon, B. & Friedman, I. (1969) - Geochemistry and origin of formation waters in the western Canada sedimentary basin. I. Stable isotopes of hydrogen and oxygen. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 33(11): 1321-1349.

Marini, L. (2000) - *Geochemical techniques for the exploration and explotation of geothermal energy*. Genova: Dipartamento per lo Studio del Territorio e delle sue Risorse, Università degli Studi di Genova, 82 p.

Meinzer, O.E. (1923) - Outline of ground-water hydrology, with definitions» U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, 494, 71 p. También disponible en: <http://pubs.er.usgs.gov/publication/wsp494>

Nicholson, K. (1993) - *Geothermal fluids: Chemistry and exploration techniques*. Berlin: Springer-Verlag, 268 p.

Nieva, D. & Nieva, R. (1987) - Developments in geothermal energy in Mexico-part twelve: a cationic geothermometer for prospecting of geothermal resources. *Heat Recovery Systems and CHP*, 7(3): 243-258.

Pang, Z. (2000) - Isotope geochemistry of geothermal waters in northern north China basin: Implications on deep fluid migration. En World Geothermal Congress, 2, Kyushu-Tohoku, 2000. *Proceedings*. Kyushu: Japanese Organising Committee, p. 1559-1563.

Perú. Ministerio de Energía y Minas (2006) – *Plan referencial de electricidad 2006–2015*. Lima: MEM, Dirección General de Electricidad, 275 p.

Rivera, M. & Mariño, J. (2004) - Volcán Yucamane (sur del Perú): geología, petrología y evaluación preliminar de las amenazas volcánicas. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, (98): 67-84.

Santoyo, E. & Verma, S.P. (1993) - Evaluación de errores en el uso de los geotermómetros de SiO2 y Na/K para la determinación de temperaturas en sistemas geotérmicos. *Geofísica Internacional*, 32(2): 287-298.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (2008) – Información del tiempo, clima y agua: datos históricos 1964-2006 (en línea). Lima: SENAMHI. (consulta: enero 2008). Disponible en: <http://www.senamhi.gob.pe>

Shigeno, H.; Takahashi, M & Noda, T. (1993) - Reservoir environment of the Onuma geothermal power plant, northeast Japan, estimated by forward analysis of long-term artificial tracer concentration change, using single-box-model simulator. En: Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, 18, California, 1993. *Proceedings*. California: Stanford University, p. 135-140. También disponible en: <http://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/1993/Shigeno.pdf>

Steinmuller, K, (2001) - Modern hot springs in the southern volcanic Cordillera of Peru and their relationship to Neogene epithermal precious-metal deposits. *Journal of South American Earth Sciences*, 14(4): 377-385.

Truesdell, A.H. (1991) - Effects of physical processes on geothermal fluids. En: D'Amore, F., comp. *Applications of geochemistry in geothermal reservoir development*. Rome: United Nations Institute for Training and Research / United Nations Development Programme, p. 71-92.

Verma, S.P. (2002) - Optimisation of the exploration and evaluation of geothermal resources. En: Chandrasekharam, D. & Bundschuh, J. eds. *Geothermal energy resources for development countries*. Rotterdam: Balkema, p. 195-223.

West Japan Engineering Consultants (2008) - *Importancia de la energía geotérmica en el Perú, justificaciones y políticas para su promoción y desarrollo*, informe inédito. Fukuoka: West Japan Engineering Consultants, 31 p.

ANEXO 1
INVENTARIO DE MANIFESTACIONES GEOTERMALES

Anexo 01
Inventario de Manifestaciones Geotermales

Punto	Código	Coordenadas			Parám. fisicoquímicos			Q (L/s)	Fecha	Hora	Observaciones
		Norte	Este	Altura	T (ºC)	pH	CE (mS/cm)				
1	FG-001	8 109 498	380 254	4 425	56,3	7,58	5	----	08/06/2007	11:05	Grupo de siete fuentes de vapor muy cercanas y perpendiculares al eje del río.
2	FG-002	8 107 401	377 730	4 352	53,1	8,89	0,01	----	10/06/2007	13:37	Fuente de vapor.
3	FT-001	8 109 578	380 222	4 420	87,1	7,86	5,46	0,46	08/06/2007	10:23	Fuente próxima a la anterior de diámetro aproximado de 0,60 m. No emite olor, el agua surge a través de una estructura de dirección N 295º.
4	FT-002	8 109 572	380 224	4 421	76,5	7,45	5,46	----	08/06/2007	10:16	Fuente ubicada en la margen izquierda del río Calientes. Presenta ligero burbujeo y vapor, no despide olor. Diámetro de 2 m. aproximadamente. Presencia de sínter. Sin descarga.
5	FT-003	8 109 565	380 212	4 413	86,5	7,98	5,4	0,8	08/06/2007	10:56	Fuente con vapor y burbujeo ligero. No emite olor.
6	FT-004	8 109 549	380 219	4 417	87,7	8,48	5,7	4	08/06/2007	10:38	Fuente ubicada en la margen izquierda del río Calientes. Presenta bastante burbujeo (el agua llega a elevarse hasta un metro sobre el espejo de agua), emite olor ligeramente fuerte a azufre. Presencia de sínter. Diámetro de 2 m. aproximadamente.
7	FT-005	8 109 545	380 188	4 416	83,9	6,93	5,36	0,6	08/06/2007	11:58	Fuente ubicada en la margen derecha del río Calientes. Presencia de sínter blanquecino y óxidos amarillentos, algunas algas.
8	FT-006	8 109 517	380 154	4 424	80,5	8,23	5,55	0,5	08/06/2007	11:44	Fuente ubicada en la margen derecha del río Calientes. Se observa bastante burbujeo, presencia de sínter y algunas algas.
9	FT-007	8 109 292	380 045	4 415	69,7	7,01	5,02	----	08/06/2007	11:36	Fuente con dos surgencias, (alineadas con el punto 7). Presencia de sínter. Tiene un diámetro aproximado de 6 m.
10	FT-008	8 109 259	380 049	4 417	84,4	6,65	6,33	----	08/06/2007	11:29	Fuente con ligero burbujeo, tiene un diámetro aproximado de 4 m.
11	FT-009	8 108 787	379 474	4 380	76,1	7,28	5	0,15	08/06/2007	12:19	Fuente ubicada en la margen izquierda del río Calientes. Surge en depósitos aluviales. No emite olor. Presencia de sínter y sedimentos anaranjados (óxidos). Diámetro de 0,30 m.
12	FT-010	8 108 750	379 430	4 392	77,8	7,56	5,93	----	08/06/2007	12:24	Grupo de cuatro fuentes interconectadas, con diámetros aproximados entre 2 y 7 m. Presencia de sínter y algas. Además también se tienen 4 fuentes pequeñas con ligero olor a azufre, el diámetro promedio es de 1 m.
13	FT-011	8 108 680	379 429	4 374	87,1	8.00	3,66	0,6	08/06/2007	12:40	Fuente con dos surgencias, separadas entre sí 3 m. Presencia de sínter, ligero burbujeo.

Punto	Código	Coordenadas			Parám. fisicoquímicos			Q (L/s)	Fecha	Hora	Observaciones
		Norte	Este	Altura	T (ºC)	pH	CE (mS/cm)				
14	FT-012	8 108 565	379 258	4 380	80,3	7,4	4,33	0,25	08/06/2007	14:13	Fuente ubicada en la margen derecha del río Calientes. Presencia de sínter y burbujeo con ligera emanación de vapor.
15	FT-013	8 108 563	379 261	4 380	85,7	8,46	4,36	0,5	08/06/2007	14:09	Fuente ubicada en la margen derecha del río Calientes. Presencia de sínter y burbujeo con ligera emanación de vapor.
16	FT-014	8 108 429	378 988	4 357	76,2	7,63	3,53	3,5	08/06/2007	14:31	Fuente de 3 por 6 m. Presencia de sínter, abundante vapor.
17	FT-015	8 108 419	378 948	4 368	53	7,25	0,48	2,8	08/06/2007	14:42	Fuente de diámetro aproximado de 5 m. Presencia de abundantes algas.
18	FT-016	8 108 388	378 943	4 375	58,4	7,22	0,43	1,7	08/06/2007	14:45	Fuente ubicada en la margen derecha del río Calientes. Presenta sínter, es la única que presenta algo de vegetación alrededor de la fuente.
19	FT-017	8 107 830	378 785	4 365	85,5	7,4	3,69	4	08/06/2007	15:08	Fuente con constante burbujeo y ligera presencia de vapor. Diámetro aproximado de 3 m.
20	FT-018	8 107 787	378 540	4 361	71,2	6,55	3,64	0,81	08/06/2007	15:34	Fuente que surge en el contacto del conglomerado con el sínter.
21	FT-019	8 107 781	378 586	4 361	78,6	6,31	3,7	0,2	08/06/2007	15:21	Fuente de 0,20 m de diámetro aproximado.
22	FT-020	8 107 763	378 519	4 353	56,8	6,95	2,82	1,8	08/06/2007	15:41	Fuente donde se observa la presencia de algas. Tiene un diámetro aproximado de 5 m.
23	FT-021	8 107 746	378 551	4 358	82,8	3,67	6,57	1,2	08/06/2007	15:29	Grupo de pequeñas surgencias en la margen derecha del río Calientes.
24	FT-022	8 107 742	378 515	4 354	72,3	6,54	3,2	----	08/06/2007	15:46	Fuente con forma de sumidero, sínter, ligero burbujeo y diámetro de 2 m. Muy cerca se observa una fuente con diámetro aproximado de 0,80 m la cual no presenta descarga.
25	FT-023	8 107 724	378 526	4 359	87,3	7,74	4,4	----	08/06/2007	15:59	Fuente con presencia de lodo.
26	FT-024	8 107 723	378 504	4 360	75,9	7,84	4,91	1,2	08/06/2007	15:55	Fuente con ligero burbujeo, presencia de vapor y diámetro aproximado de 5 m.
27	FT-025	8 107 695	378 540	4 357	74,4	6,75	4,05	0,4	08/06/2007	16:05	Fuente ubicada en la margen izquierda del río Calientes; surge entre el contacto de sínter y el conglomerado.
28	FT-026	8 107 692	378 533	4 363	85,6	5,57	7,94	0,5	08/06/2007	16:02	Fuente con tres surgencias, se observa sínter y ligero burbujeo en la de mayor diámetro.
29	FT-027	8 107 683	378 535	4 360	81	8,05	5,43	----	08/06/2007	16:15	Fuente ubicada en la margen derecha del río Calientes, ligero vapor y burbujeo.
30	FT-028	8 107 651	378 573	4 364	87	7,46	5,5	----	08/06/2007	16:16	Fuente con ligero vapor y burbujeo.
31	FT-029	8 107 645	378 595	4 363	53,3	8,11	5,5	----	08/06/2007	16:20	Fuente con ligero vapor y burbujeo. Diámetro aproximado de 4 m.
32	FT-030	8 107 645	378 509	4 349	64	7,39	5,03	0,6	09/06/2007	10:07	Fuente que surge en contacto de sínter y el conglomerado.
33	FT-031	8 107 633	378 587	4 362	71,7	7,39	5,27	----	09/06/2007	09:32	Fuente muy profunda, sin descarga, con diámetro aproximado de 2 m.

Punto	Código	Coordenadas			Parám. fisicoquímicos			Q (L/s)	Fecha	Hora	Observaciones
		Norte	Este	Altura	T (ºC)	pH	CE (mS/cm)				
34	FT-032	8 107 595	378 549	4 357	85,1	7,39	4,7	1,14	09/06/2007	09:40	Fuente que no emite olor, presencia de sínter y óxidos. Diámetro aproximado de 2,50 m.
35	FT-033	8 107 580	378 556	4 363	52,6	7,85	5,08	----	09/06/2007	10:40	Fuente con poco sínter, bajo caudal de descarga, poco burbujeo. Tiene 2 por 0,80 m.
36	FT-034	8 107 555	378 419	4 352	86,6	8,37	3,93	----	09/06/2007	10:19	Fuente con bastante burbujeo, fuente reciente por la poca presencia de sínter. Surge en el contacto del conglomerado con un depósito aluvial. Diámetro aproximado de 3,50 m.
37	FT-035	8 107 550	378 434	4 352	81,4	7,39	3,83	2	09/06/2007	10:18	Fuente en cuyas paredes se observan al conglomerado, agua muy transparente, bastante burbujeo y vapor. Tiene aproximadamente 4 por 2 m. y 2,50 m de profundidad.
38	FT-036	8 107 545	378 583	4 352	59,5	6,99	4,53	----	09/06/2007	10:45	Fuente sin descarga, con abundante lodo, ligero burbujeo. A 0,50 m se tiene otra surgencia de la misma fuente; las cuales están en una misma estructura tipo sumidero.
39	FT-037	8 107 435	377 701	4 354	86,2	7,87	5,38	----	10/06/2007	13:41	Fuente controlada por una fractura de dirección N 5º, con una longitud de 2 m. y ancho de 0,20 m. No presenta descarga, ligero burbujeo y presencia de sínter.
40	FT-038	8 107 397	377 753	4 354	86,8	7,7	5.00	----	10/06/2007	13:30	Grupo de tres fuentes interconectadas (forma triangular), con distancias entre ellas de 3 m. aproximadamente y diámetros de 0,80; 0,90 y 2 metros
41	FT-039	8 107 309	378 386	4 350	75,9	7,2	3,82	1	09/06/2007	11:01	Manantial con dos surgencias, sobre depósitos cuaternarios, se observan depósitos de sínter, las fuentes están alineadas por una estructura de dirección N 210º.
42	FT-040	8 107 297	378 312	4 344	64,2	6,74	4,6	0,5	09/06/2007	11:14	Manantial en una fractura de dirección N 360º, sus aguas descargan al río Calientes.
43	FT-041	8 107 285	378 296	4 340	69,6	6,9	4,52	0,25	09/06/2007	11:27	Fuente que surge en los conglomerados. Presencia de sínter.
44	FT-042	8 107 273	377 749	4 344	67,9	7,22	4,99	0,4	10/06/2007	13:24	Grupo de cinco fuentes, con presencia de sínter.
45	FT-043	8 107 252	377 706	4 350	56,7	7,25	5,25	0,25	10/06/2007	13:16	Fuente de 0,20 m. de diámetro, presencia de sínter.
46	FT-044	8 107 244	377 571	4 344	52,9	7,13	2,84	0,25	10/06/2007	14:01	Fuente que aflora en depósitos cuaternarios, presencia de sínter.
47	FT-045	8 107 215	378 218	4 344	84	5,91	5,22	----	09/06/2007	12:12	Tres fuentes interconectadas por una fractura de dirección N 150º, el diámetro aproximado es de 0,70 m. con depósitos de sínter.
48	FT-046	8 107 199	378 263	4 348	86	8,23	5,62	----	09/06/2007	11:55	Fuente de 1,30 m. de diámetro sin descarga, burbujeo permanente y sínter.
49	FT-047	8 107 194	378 242	4 350	81	8,11	5,78	----	09/06/2007	12:00	Fuente de 0,20 m. de diámetro, presenta poco sínter.
50	FT-048	8 107 193	377 733	4 343	84,3	6,64	4,88	----	10/06/2007	13:08	Fuente sin descarga, 0,15 m. de diámetro, bastante burbujeo.

Punto	Código	Coordenadas			Parám. fisicoquímicos			Q (L/s)	Fecha	Hora	Observaciones
		Norte	Este	Altura	T (ºC)	pH	CE (mS/cm)				
51	FT-049	8 107 184	378 006	4 355	84,2	6,04	0,13	0,4	09/06/2007	14:03	Grupo de tres fuentes con bastante burbujeo y vapor, de formación reciente (por la presencia de vegetación cercana a las fuentes), poco sínter. Ubicada en la ladera del cerro en la margen derecha del río calientes.
52	FT-050	8 107 177	378 317	4 348	77,9	7,45	4,61	1	09/06/2007	11:37	Fuente con dos surgencias interconectadas, con diámetros aproximados de 0,50 m. y 2 m. respectivamente, con de burbujeo, sínter y lodo.
53	FT-051	8 107 177	378 243	4 344	87,2	7,78	5,67	----	09/06/2007	12:17	Fuente sin descarga, se observa bastante sínter y burbujeo.
54	FT-052	8 107 171	378 288	4 344	55,5	6,56	5	----	09/06/2007	11:47	Fuente sin descarga, se observan algunas raíces, poco sínter.
55	FT-053	8 107 163	378 036	4 345	86	7,8	5,73	----	09/06/2007	13:52	Fuente de 0,30 m de diámetro, con sínter y burbujeo.
56	FT--054	8 107 162	378 183	4 332	64,6	6,78	6,02	0,5	09/06/2007	13:33	Fuente entre 5 y 8 m. de diámetro con presencia de algas.
57	FT-055	8 107 157	378 059	4 339	74,2	7,37	5,52	----	09/06/2007	13:47	Fuente de 0,80 m. de diámetro, presencia de sínter.
58	FT-056	8 107 140	378 254	4 341	58	6,22	5,55	----	09/06/2007	13:21	Dos manantiales interconectados, no presentan descarga, diámetros de 3 y 5 m.
59	FT-057	8 107 138	378 008	4 347	75,3	7,6	5,67	0,7	09/06/2007	14:12	Fuente sin descarga de 1,50 m. de diámetro.
60	FT-058	8 107 131	378 206	4 337	81,3	7,02	5,99	0,6	09/06/2007	13:28	Fuente con dos manantiales interconectados de diámetro de 2 m. cada uno y con una profundidad aproximada de 5 m., presentan poco sínter.
61	FT-059	8 107 101	377 569	4 346	38,8	6,89	5,24	----	10/06/2007	14:13	Fuente con depósitos de sínter, presenta poco burbujeo, ligero olor a azufre.
62	FT-060	8 107 045	378 315	4 349	52,8	8,48	1,32	0,25	10/06/2007	10:40	Fuente ubicada en la ladera oeste del cerro Cheroveco, asociada a una estructura de dirección N 165º, se observa presencia de sínter.
63	FT-061	8 107 033	378 260	4 338	55	7,72	1,27	3,24	10/06/2007	11:03	Fuente en depósitos cuaternarios, emana bastante vapor, poca presencia de sínter y vegetación en los alrededores.
64	FT-062	8 107 018	378 084	4 344	77,8	7,01	5,8	----	09/06/2007	14:22	Grupo de fuentes alineadas en dirección N 327º con el punto 54. La profundidad llega hasta 5 m.
65	FT-063	8 107 010	378 058	4 338	86,5	6,94	5,42	----	09/06/2007	14:30	Fuente de 3 por 0,80 m., presencia de sínter y poco burbujeo.
66	FT-064	8 106 996	378 058	4 336	82,3	7,04	5,5	----	09/06/2007	14:35	Fuente sin descarga con poco burbujeo, presencia de sínter y controlada por una fractura de dirección N 330º.
67	FT-065	8 106 994	377 984	4 333	88	7,64	5,23	0,8	09/06/2007	14:42	Fuente con abundante sínter, se observa bastante burbujeo.
68	FT-066	8 106 990	378 267	4 359	50,4	7,98	1,24	0,5	10/06/2007	10:57	Fuente ubicada en la ladera oeste del cerro Cheroveco, presencia de sínter.
69	FT-067	8 106 990	377 885	4 337	83	7,22	4,86	0,25	10/06/2007	12:48	Fuente de 0,40 m de diámetro con presencia de sínter.
70	FT-068	8 106 985	378 096	4 331	73,2	7,23	4,35	1,1	10/06/2007	11:55	Fuente de 5 por 3 m. de diámetro, se observa presencia de sínter y poco vapor.
71	FT-069	8 106 980	377 992	4 333	81,2	7,8	5,05	1,5	09/06/2007	14:44	Fuente de 0,75 m de diámetro con presencia de sínter.

Punto	Código	Coordenadas			Parám. fisicoquímicos			Q (L/s)	Fecha	Hora	Observaciones
		Norte	Este	Altura	T (ºC)	pH	CE (mS/cm)				
72	FT-070	8 106 972	378 315	4 371	54,2	8,09	1144	3,58	10/06/2007	09:45	Grupo de siete fuentes ubicadas en la ladera oeste del cero Cherovеco, están alineadas con dirección N 320º. Sin olor ni burbujeo, reciente precipitación de sínter.
73	FT-071	8 106 972	377 901	4 333	80,2	7,5	2,98	----	10/06/2007	12:45	Grupo de tres fuentes alineadas en dirección N 320º, poco sínter.
74	FT-072	8 106 969	378 077	4 335	77,4	7,22	5,51	----	09/06/2007	14:56	Fuente de 2 m. de diámetro, no presenta descarga y se observa poco vapor.
75	FT-073	8 106 966	378 005	4 335	87,4	7,63	5,38	0,7	09/06/2007	14:49	Fuente con abundante sínter, se observa bastante burbujeo, aflora a través de fracturas.
76	FT-074	8 106 966	377 516	4 327	86,3	7,37	4,89	0,5	11/06/2007	15:20	Fuente de 0,10 m. de diámetro aproximado con presencia de sínter.
77	FT-075	8 106 964	377 500	4 332	86,6	8,53	5,3	----	11/06/2007	15:15	Fuente de 0,60 m. de diámetro, sin descarga, emana vapor y se observa burbujeo.
78	FT-076	8 106 952	377 964	4 329	73,8	6,37	4,55	0,6	10/06/2007	12:14	Fuente ubicada en la margen izquierda del río Calientes, surge en el contacto del conglomerado con sínter.
79	FT-077	8 106 943	377 911	4 329	71,2	6,8	4,18	0,5	10/06/2007	12:39	Fuente con sínter, no presenta vapor, ubicada en la margen derecha del río Calientes.
80	FT-078	8 106 931	377 897	4 325	70,3	6,51	4,88	0,8	10/06/2007	12:32	Fuente ubicada en la margen derecha del río Calientes, surge en el contacto entre conglomerados, presencia de sínter y emana vapor.
81	FT-079	8 106 918	377 373	4 325	81,4	8,08	0,05	----	11/06/2007	15:09	Grupo de cinco fuentes sobre depósitos cuaternarios, emana bastante vapor y burbujeo, se observa presencia de vegetación.
82	FT-080	8 106 915	377 354	4 327	84,4	8,35	4,89	----	11/06/2007	14:59	Fuente intermitente tipo geiser. Presencia de sínter y emana vapor.
83	FT-081	8 106 905	377 912	4 330	90,4	7,95	5,41	---	10/06/2007	12:24	Fuente con precipitados de sínter con bastante burbujeo, ligero olor a azufre, esta fuente descarga subterráneamente al río a a través de una fractura de dirección N 10º.
84	FT-082	8 106 899	377 288	4 324	82,7	7,42	5,53	----	11/06/2007	14:57	Fuente controlada por una estructura de dirección N 65°, tiene un diámetro aproximado de 4 m. de diámetro. Presencia de sínter.
85	FT-083	8 106 881	377 866	4 328	67,5	7,43	5,73	----	10/06/2007	16:12	Fuente de 1,5 por 2,5 m., controlada por una fractura con dirección N 350º. No presenta descarga y tiene poca presencia de sínter.
86	FT-084	8 106 875	377 765	4 330	81,2	7,37	5,56	1	10/06/2007	14:25	Fuente de 2,5 por 1,5 m., presencia de vapor.
87	FT-085	8 106 875	377 718	4 325	83,8	7,96	4,79	0,8	10/06/2007	14:44	Fuente de 0,50 m. de diámetro, y profundidad aproximada de 2,5 m., presenta burbujeo, emana poco vapor.
88	FT-086	8 106 863	377 726	4 324	36,4	9,02	5,95	----	10/06/2007	14:30	Fuente ubicada en la margen derecha del río Calientes, con diámetro de 0,80 m. No presenta descarga, color rojizo por óxidos, poca presencia de sínter.

Punto	Código	Coordenadas			Parám. fisicoquímicos			Q (L/s)	Fecha	Hora	Observaciones
		Norte	Este	Altura	T (ºC)	pH	CE (mS/cm)				
89	FT-087	8 106 863	377 212	4 322	60,5	7,03	2,7	3	11/06/2007	15:35	Fuente con cuatro surgencias, emana vapor, presencia de sínter. Una de ellas surge sobre material muy deleznable originando la formación de un pequeño curso de agua.
90	FT-088	8 106 840	377 944	4 326	69,5	7,9	5,4	---	10/06/2007	15:51	Fuente con ligero burbujeo. Presencia de sínter.
91	FT-089	8 106 830	377 742	4 326	42,9	8,09	6,15	---	10/06/2007	14:37	Fuente de 0,30 m. de diámetro, con burbujeo, color blanquecino.
92	FT-090	8 106 818	377 882	4 330	76,3	7,22	4,43	0,5	10/06/2007	15:57	Fuente con ligero burbujeo. Presencia de sínter.
93	FT-091	8 106 817	377 792	4 332	75,2	7,79	5,25	---	10/06/2007	16:03	Grupo de fuentes alineadas con dirección N 343º. Sin descarga, presencia de sínter.
94	FT-092	8 106 807	377 956	4 334	56,2	6,64	4,55	---	10/06/2007	15:45	Fuente sin descarga, presencia de sínter.
95	FT-093	8 106 749	377 760	4 336	48,2	7,25	4,82	0,15	10/06/2007	16:18	Fuente con forma de volcán (por acumulación y solidificación de sínter) la base y tope tienen diámetros de 3,5 m. y 2 m. respectivamente con una altura de 1,5 m.
96	FT-094	8 106 734	377 820	4 338	55,5	7,4	4,91	---	10/06/2007	16:28	Fuente que aflora en depósitos cuaternarios de una quebrada afluente al río Calientes, poca presencia de sínter.
97	FT-095	8 106 679	377 289	4 318	67,4	7,25	3,04	1,5	11/06/2007	15:52	Numerosas fuentes forman una especie de aniego termal, abundante depositación de sínter.
98	FT-096	8 106 636	377 659	4 332	67,7	7,53	4,95	1	10/06/2007	17:05	Fuente de 2 por 6 m., condicionada por un lineamiento de dirección N 45º, emana vapor.
99	FT-097	8 106 634	377 693	4 331	44,1	7,16	3,97	---	10/06/2007	17:09	Fuente sin descarga, presencia de sínter.
100	FT-098	8 106 620	377 942	4 358	79,2	7,06	4,81	---	10/06/2007	16:44	Fuente con poca descarga, ligero olor a azufre, presencia de sínter.
101	FT-099	8 106 611	377 892	4 351	41,9	7,27	3,34	0,5	10/06/2007	16:55	Fuente en depósitos cuaternarios, poco sínter, presencia de vegetación.
102	FT-100	8 106 611	377 304	4 310	87,5	8,67	5,47	---	11/06/2007	16:37	Fuente con cuatro surgencias, presencia de sínter, emana vapor y se observa ligero burbujeo.
103	FT-101	8 106 603	377 502	4 317	77,6	7,4	3,8	0,92	07/06/2007	14:31	Fuente ubicada en la margen izquierda del río Calientes de 2 m. de diámetro. Ligero burbujeo, emite vapor, no despide olor fuerte, presencia de sínter.
104	FT-102	8 106 601	377 562	4 330	60,9	7,96	1,63	0,8	11/06/2007	14:35	----
105	FT-103	8 106 598	377 277	4 320	74,4	7,98	5,69	---	11/06/2007	14:38	Grupo de manantiales con diámetros entre los 0,10 y 0,60 m, se observa burbujeo, presencia de sínter. Posible zona de intersección de tres fallas.
106	FT-104	8 106 577	377 257	4 320	79.00	8,53	5,61	---	11/06/2007	14:41	----
107	FT-105	8 106 575	377 226	4 318	77,4	7,22	4,22	---	11/06/2007	14:44	----
108	FT-106	8 106 558	377 458	4 321	85,1	8,13	5,24	0,3	11/06/2007	14:46	Fuente ubicada en la margen izquierda del río Calientes, en la ladera del cerro en la zona de Challepiña. Emana poco vapor, se observa sínter.

Punto	Código	Coordenadas			Parám. fisicoquímicos			Q (L/s)	Fecha	Hora	Observaciones
		Norte	Este	Altura	T (ºC)	pH	CE (mS/cm)				
109	FT-107	8 106 430	377 347	4 317	65,4	6,59	4,92	0,25	11/06/2007	14:48	Fuente en la margen derecha del río Calientes, se observa sínter.
110	FT-108	8 106 418	377 397	4 319	82,4	8,35	5,13	1	11/06/2007	14:50	Fuente de 1 m. de diámetro, se observa burbujeo constante y vapor, presencia de sínter.
111	FT-109	8 106 305	377 411	4 323	74,9	7,08	2,97	2	11/06/2007	14:51	----
112	FT-110	8 106 287	377 453	4 337	56,2	8,14	1,55	2,5	11/06/2007	16:53	Fuente con dos surgencias, se observan algas, presencia de sínter.
113	FT-111	8 106 266	377 443	4 329	40,9	9,02	1,61	1,2	11/06/2007	16:59	Grupo de fuentes alineadas con dirección N 340º. Emanan vapor, presencia de algas. La fuente está captada a manera de reservorio.
114	FT-112	8 105 484	377 359	4 288	65,1	6,98	2,43	2,4	14/06/2007	13:25	Fuente con varias surgencias menores
115	FS-001	8 110 526	380 786	4 461	32	3,35	0,64	---	12/06/2007	----	Río Calientes antes de la confluencia de éste con las fuentes termales
116	FS-002	8 105 689	377 267	4 297	23,5	8,06	3,46	---	12/06/2007	----	Río Calientes antes de la confluencia de éste con las fuentes termales
117	FS-003	8 096 087	377 890	3 848	17,2	9,44	0,01	1,8	15/06/2007	----	
118	FM-001	8 109 856	380 952	4 501	18,7	6,85	0,07	0,15	12/06/2007	----	
119	FM-002	8 107 590	377 308	4 413	14.20	6.66	0.18	----	12/06/2007	----	
120	FM-003	8 096 945	370 207	3 884	11.40	7.43	0.06	0.30	18/06/2007	----	
121	FM-004	8 096 713	375 607	3 770	18.50	9.58	1.12	2.00	14/06/2007	----	
122	FM-005	8 096 639	375 160	3 892	9.90	8.36	0.69	2.60	14/06/2007	----	
123	FM-006	8 096 368	375 404	3 768	18.50	9.36	1.09	2.00	14/06/2007	----	
124	FM-007	8 096 183	377 945	3 965	43.50	7.41	5.90	0.80	15/06/2007	----	
125	FA-001	8 110 979	381 199	4 490	3.50	8.51	0.20	2.80	12/06/2007	----	
126	FA-002	8 110 538	380 605	4 476	16.00	8.35	0.07	0.15	12/06/2007	----	
127	FA-003	8 109 349	380 899	4 482	16.00	8.40	0.06	5.00	12/06/2007	----	
128	FA-004	8 109 069	380 959	4 506	14.00	6.35	0.15	---	12/06/2007	----	
129	FA-005	8 106 846	376 971	4 333	2.60	5.78	0.03	8.00	14/06/2007	----	
130	FA-006	8 105 894	376 029	4 316	11.70	8.25	0.34	25.00	06/12/2007	----	
131	FA-007	8 104 813	377 393	4 281	0.90	8.86	0.09	1.70	14/06/2007	----	
132	FA-008	8 103 788	377 588	4 304	11.00	8.95	0.10	5.00	14/06/2007	----	
133	FA-009	8 103 344	377 483	4 268	10.90	8.45	0.12	4.80	14/06/2007	----	
134	FA-010	8 101 657	376 749	4 243	11.60	9.13	0.52	7.80	14/06/2007	----	

RELACIÓN DE MAPAS E ILUSTRACIONES

Mapas

Mapa N° 1	Morfología	escala: 1:75,000
Mapa N° 2	Geología - Estructural	escala: 1:25,000
Mapa N° 3	Hidrogeología	escala: 1:25,000
Mapa N° 4	Inventario de Fuentes	escala: 1:25,000
Mapa N° 5	Hidrogeoquímico – Isotemperatura	escala: 1:10,000
Mapa N° 6	Hidrogeoquímico – ISOpH	escala: 1:10,000
Mapa N° 7	Hidrogeoquímico –Isoconductividad	escala: 1:10,000

Figuras

Fig. 1	Regiones geotermales del Perú (Cossío y Vargas, 1979).
Fig. 2	Mapa de ubicación del Campo Geotermal Calientes.
Fig. 3	Vista de yareta en el valle Calientes.
Fig. 4	Vista de la parte suroeste de la cadena volcánica en el sector Calientes.
Fig. 5	Vista de las manifestaciones geotermales en el valle Calientes.
Fig. 6	Vistas del valle Calientes. La foto de la izquierda muestra la parte sur del valle en el sector de Challepiña, mientras que la de la derecha es una vista de la parte norte en el sector de Chaullane.
Fig. 7	Variación de la precipitación total anual.
Fig. 8	Variación de la temperatura media anual.
Fig. 9	Variación de la evaporación para un periodo de 8 años.
Fig. 10	Variación de las máximas y mínimas de humedad relativa.
Fig. 11	Variación de heliofonia para un periodo de 23 años.
Fig. 12	Variación de la velocidad del viento.
Fig. 13	Diagrama de rosas donde se observan las diferentes direcciones del viento.
Fig. 14	Aforo del río Calientes (junio del 2007) cerca del sector de Huancane Vinto.
Fig. 15	Lavas andesíticas con fenocristales de plagioclasa, piroxenos, y minerales opacos pertenecientes al volcán Chuchuaura. Aflora en la margen derecha del río Calientes.
Fig. 16	Vista del sector oeste del complejo volcánico López Extraña constituido principalmente de lavas andesíticas. Este volcán presenta importante alteración hidrotermal argílica en la cima.
Fig. 17	Vista del valle Calientes y al fondo el complejo volcánico Yucamane-Calientes-Yucamane Chico (Sector Noroeste).
Fig. 18	Vista del flanco sureste del volcán Yucamane, cuyo cono está constituido principalmente de flujos de lavas.
Fig. 19	Depósitos aluviales y zonas de depositación de sínter visibles dentro del valle Calientes.
Fig. 20	Depósitos aluviales constituidos de bloques subredondeados y subangulosos dentro de una matriz areno-limosa visibles dentro del valle Calientes.

Fig. 21 Vista del sector este del volcán Yucamane Chico, el cual presenta alteración argílica y silicífica.

Fig. 22 Manifestación FT-011, en la cual se observa la precipitación de la sílice y consecuente formación de un depósito de sínter

Fig. 23 Imagen Landsat donde se muestran los principales lineamientos estructurales del Campo Geotermal Calientes.

Fig. 24 Configuración del equipo magnetotelúrico (MT).

Fig. 25 La foto de la izquierda muestra el equipo MT que se utiliza para la recepción de datos en la estación. La foto de la derecha muestra el proceso de instalación de la bobina en su componente vertical (Hz).

Fig. 26 Mapa que muestra la zona de investigación geofísica y los puntos de medición magnetotelúrica (MT).

Fig. 27 Distribución de la resistividad aparente en el Campo Geotérmico Calientes utilizando frecuencias de a) 100 Hz, b) 1 Hz y c) 0.01 Hz.

Fig. 28 Distribución de las resistividades aparentes a profundidades de: a) 100 m b) 200 m c) 500 m d) 750 m y e) 1000 m. Las líneas gruesas en color blanco y amarillo identifican las zonas de baja resistividad (a y b), y el incremento de la resistividad con la profundidad (c, d, e, f).

Fig. 28 Continuación: f) 1500 m g) 2000 m y h). 2500 m. Las líneas gruesas de color amarillo y verde, identifican las zonas de incremento de la resistividad con la profundidad (c, d, e, f) y alta resistividad a profundidades de 2000 y 2500 m.

Fig. 29 Distribución de los tipos de fuentes inventariadas.

Fig. 30 Toma de parámetros fisicoquímicos con equipos portátiles.

Fig. 31 Detalle del aforo, de manifestación geotermal, en dos puntos en la zona de la quebrada Huancane Vinto.

Fig. 32 Vista de bofedal en la quebrada Pantara, sector noreste del valle Calientes.

Fig. 33 Detalle de la surgencia de agua en una manantial ubicado en el sector de Challepiña.

Fig. 34 Manante que origina el aniego en el sector de Quesquere.

Fig. 35 Manifestación geotermal en depósito coluvial.

Fig. 36 Afloramiento de areniscas de la Formación Hualhuani.

Fig. 37 Manifestación geotermal ubicada en ladera de cerro en la margen derecha del río Calientes, frente al sector de Palcoyo.

Fig. 38 Surgencia de agua en andesitas en el sector de Huancane Vinto.

Fig. 39 Imagen satelital con los lineamientos principales y la ubicación de las fuentes muestreadas.

Fig. 40 Diagrama de Langelier.

Fig. 41 Diagrama ternario (Giggenbach, 1998).

Fig. 42 Diagrama de Pipper.

Fig. 43 Diagrama de Schoeller.

Fig. 44 Diagrama Boro vs Cloruro (Shigeno et al., 1993).

Fig. 45 Diagrama ternario (Giggenbach, 1983).

Fig. 46 ä18O vs ä D para las aguas de Calientes.

Fig. 47 ä D vs temperatura.

Fig. 48 ä18O vs temperatura.

Fig. 49 Temperaturas geoquímicas de aguas termales de la zona geotermal de Calientes.

Fig. 50 Andesitas fracturadas en el sector de Huancane Vinto.

Fig. 51 Vista de seis manifestaciones geotermales alineadas por una fractura de rumbo N 45º O.

Fig. 52 Vista de manifestaciones geotermales en el valle Calientes.
Fig. 53 Vista desde el valle Calientes del volcán Yucamane (flanco noreste).
Fig. 54 Factor de utilización de las diferentes fuentes de electricidad en Japón (West Jec, 2008).
Fig. 55 Variación del precio internacional del petróleo (West Jec, 2008).
Fig. 56 Emisiones de CO_2 en el ciclo de vida de las fuentes de electricidad.
Fig. 57 Mezcla de la generación de electricidad en el año 2015, escenario base.
Fig. 58 Estructura de la generación de electricidad en el año 2015, escenario base.
Fig. 59 Abastecimiento de energía y tasa de autosuficiencia.
Fig. 60 Comparación de la generación térmica y geotérmica (esquema general) (West Jec, 2008).

Cuadros

Cuadro 1 Clasificación de aguas según temperatura.
Cuadro 2 Clasificación de aguas según pH.
Cuadro 3 Clasificación de manantiales según su caudal.
Cuadro 4 Parámetros in situ de las muestras tomadas.
Cuadro 5 Resultado de los análisis en laboratorio (Laboratorio de WEST JEC).
Cuadro 6 Resultados de análisis isotópicos.
Cuadro 7 Resultados aplicando geotermómetros.
Cuadro 8 Plan de Expansión de la Generación 2006-2015, escenario base*.
Cuadro 9 Abastecimiento de Energía y tasa de autosuficiencia.
Cuadro 10 Posible periodo de autosuficiencia de petróleo y de gas natural domésticos.

Anexo

Anexo 1 Inventario de manifestaciones geotermales.

INGEMMET

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico
Av. Canadá 1470, San Borja, Lima 41, Perú
Teléfono:051-1-618-9800
Fax:051-1-225-3063 / 051-1-225-4540
http: www.ingemmet.gob.pe
e-mail: informaciongeocientifica@ingemmet.gob.pe