Exploración de Recursos Geotérmicos. Perspectiva desde la Geomática

J. Camilo Matiz-León Grupo Investigación Geotérmica Servicio Geológico Colombiano – SGC

> 07 de abril de 2021 CECACIER







Contenido



- 1. Que es la Geotermia
- 2. Generalidades de la Geomática
- 3. Integración Geomática Geotermia
 - 3.1. IDE (Estándar SIG GDB)
 - 3.2 Sensoramiento Remoto
 - 3.3 Estadística Espacial
- 4. Aplicaciones Futuras
- 5. Conclusiones







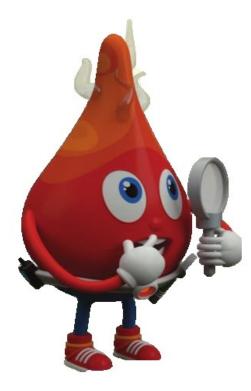
1. Que es la Geotermia?

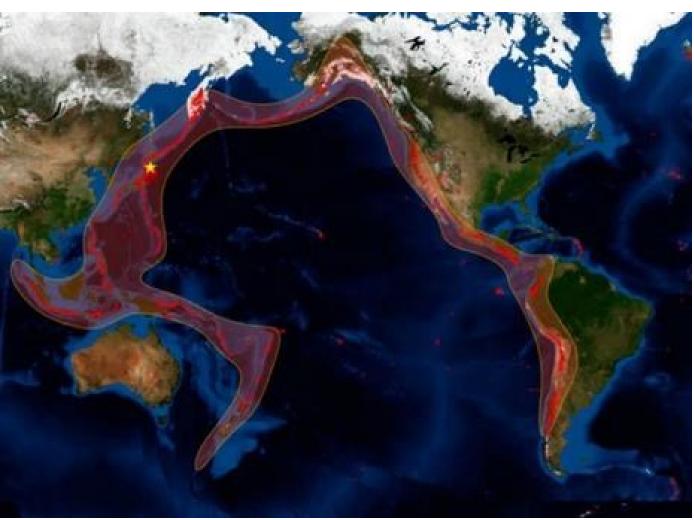




¿En dónde se expresa?

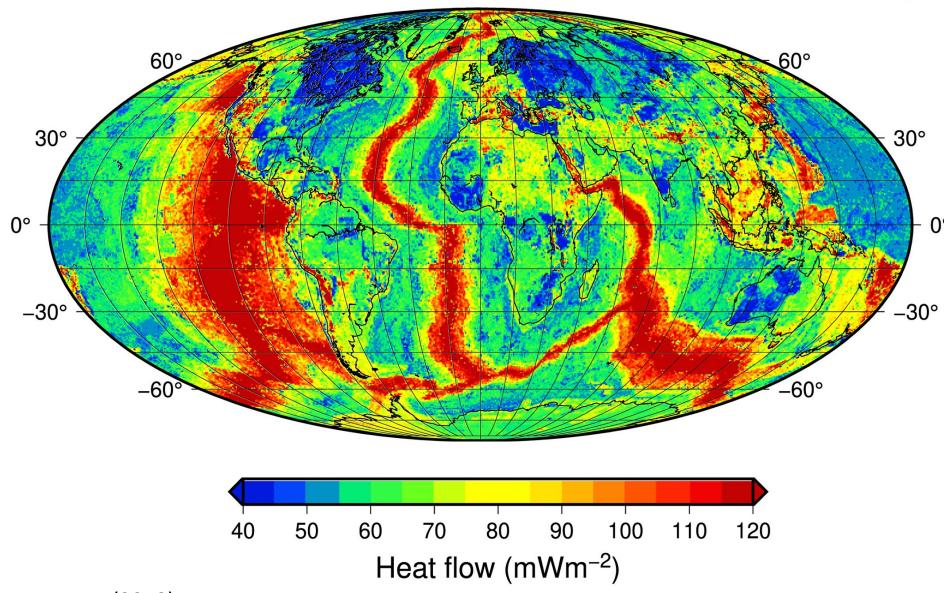






Calor cuantificable!

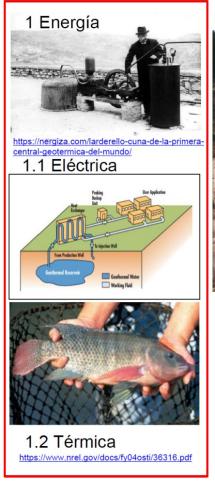


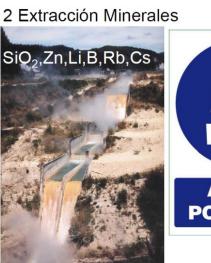


Lucazeau (2019)

Oportunidades del Recurso





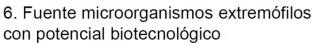














Manifestaciones superficiales únicas









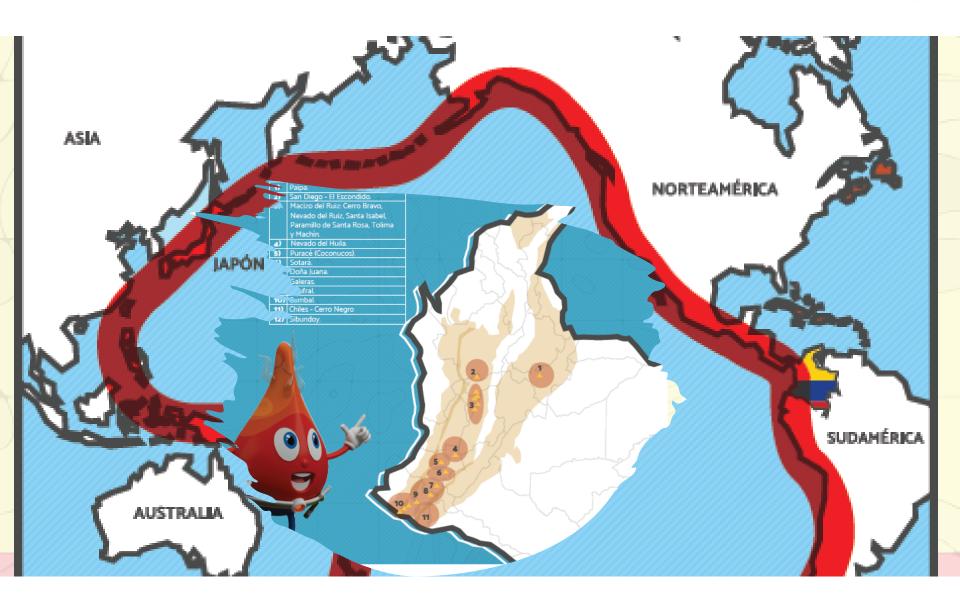


¿Cómo se expresa?



¿Colombia - en dónde se expresa?





Tipos de Sistemas



RECURSOS GEOTÉRMICOS

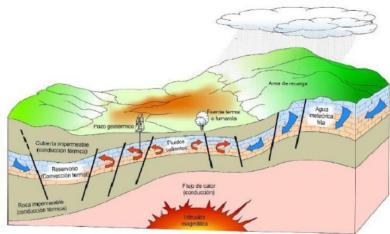
Mecanismos de transferencia de calor

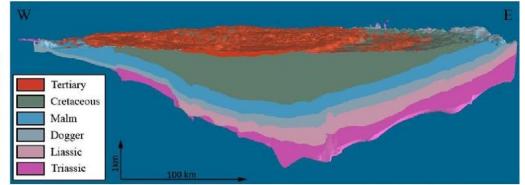
- *Convección
- *Conducción
- *Radiación

Sistemas convectivos

https://sp.depositphotos.com/299472878/stock-illustration-heat-transfer-methods-on-example.html

Sistemas conductivos





https://www.semanticscholar.org/paper/Deep-Temperatures-in-the-Paris-Basin-from-Flow-Bont%C3%A9-Wees/9355175cece6d5edf966ad80dbeeb11d701e715b/figure/4

http://www.url.edu.gt/PortalURL/Archivos/44/Archivos/CGA_GEOTERMIA.pdf

Con circulación de fluidos:

- *Sistemas geotérmicos hidrotermales
- *Sistemas de factura

Sin circulación de fluidos:

- *Sistemas saturados en agua: Cuencas sedimentarias
- *Sistemas no saturados: Roca seca caliente

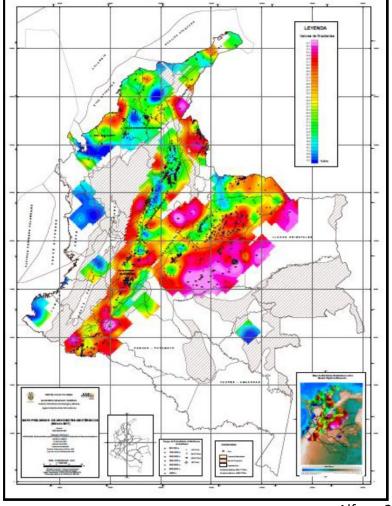
Evidencia en Colombia



Sistemas convectivos: Con circulación de fluidos



Sistemas conductivos: Sin circulación de fluidos





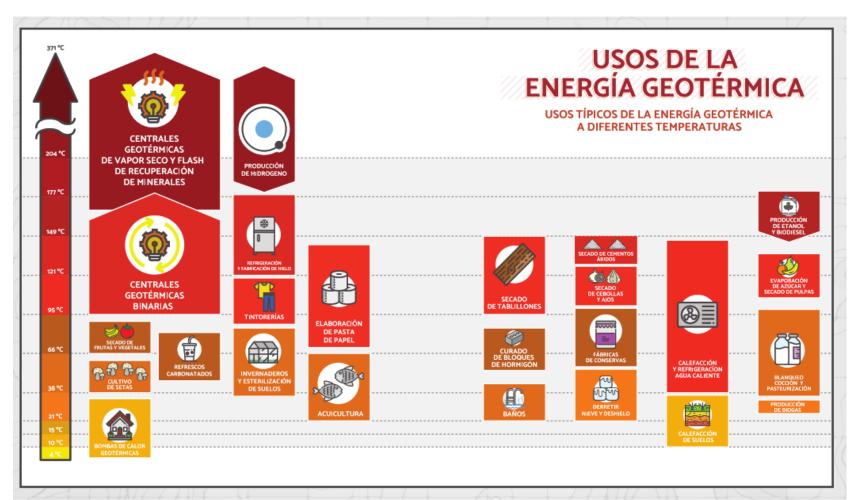


Diagrama de utilización de los recursos geotérmicos en el mundo a partir de la temperatura del fluido termal (agua, vapor y gases). Diagrama Lindal (Gudmundsson, Freeston y Lienau, 1985). Modificado de Geothermal Education Office (2005).

Usos Directos



1 Acuicultura











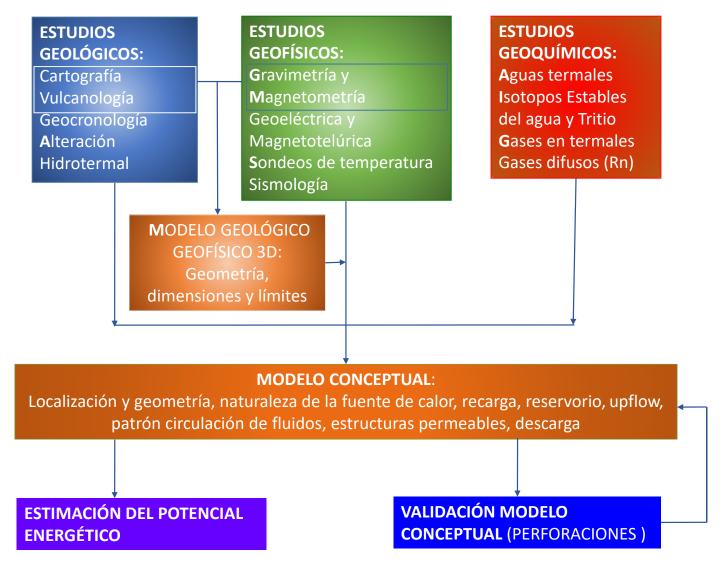


https://imgbin.com/png/9r26LZZv/geothermalheat-pump-central-heating-geothermalheating-geothermal-energy-png

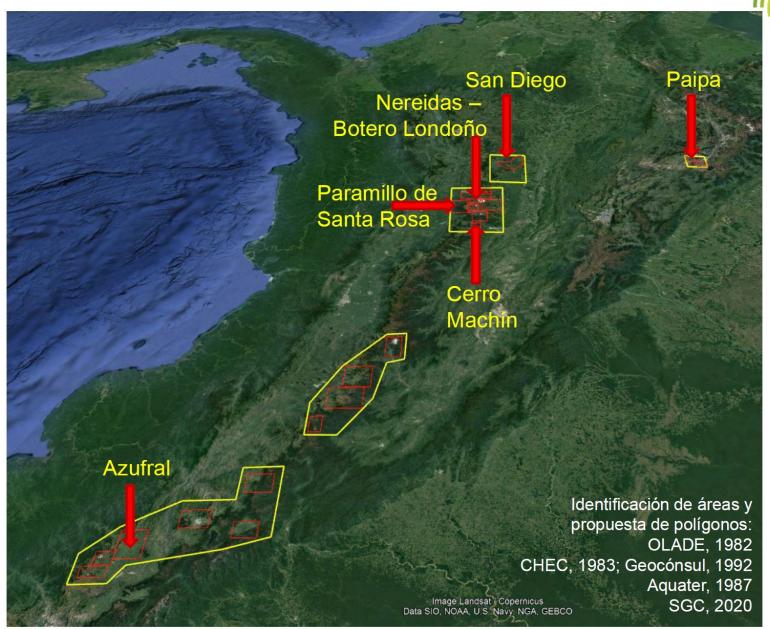
Y de frío... Único proyecto instalado en Colombia

Metodología de Exploración SGC

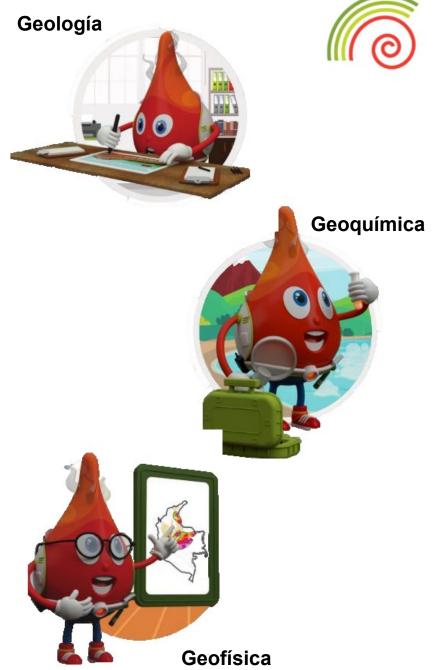


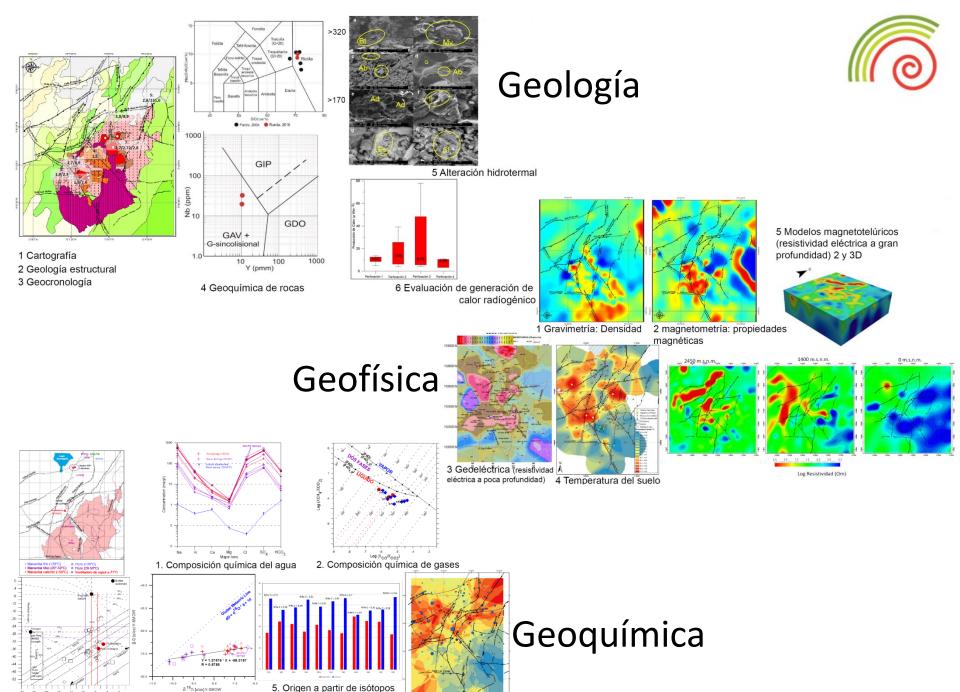


Áreas de Investigación









6. Radón en aire del suelo

3. Composición isótopo ¹³C

CO₂ y CH₄

de Helio 3He/4He

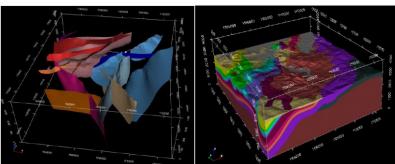
4. Composición isótopos

estables del agua

Modelamiento 3D

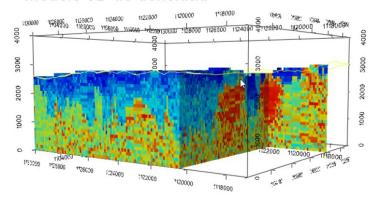


Modelo Geológico 3D



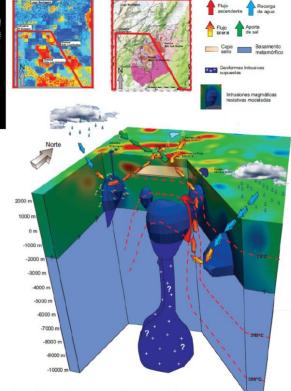
Fallas y geología modeladas

Modelo 3D de densidad



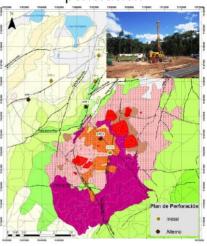
Modelo conceptual descriptivo:

- 1. Fuente de calor, 2. Reservorio,
- 3.Sello, 4.Recarga y 5. Descarga



Hipótesis sobre conformación y funcionamiento del sistema hidrotermal

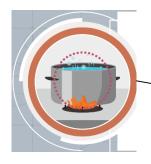
A partir del modelo: Identificación de blancos de perforación

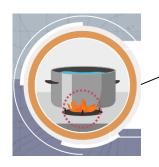


Modelos Conceptuales

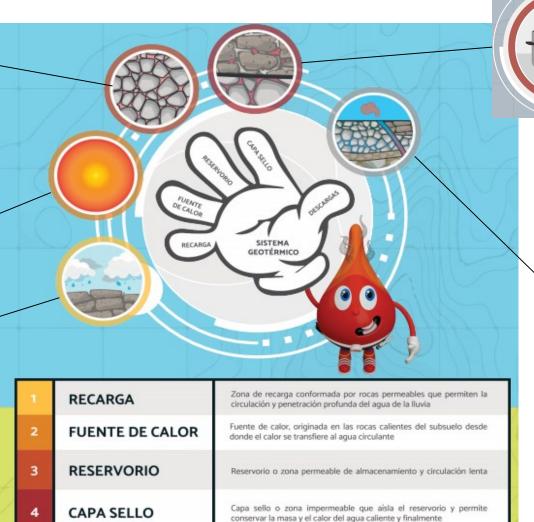
DESCARGA











La zona de descarga o área permeable de la superficie en donde el

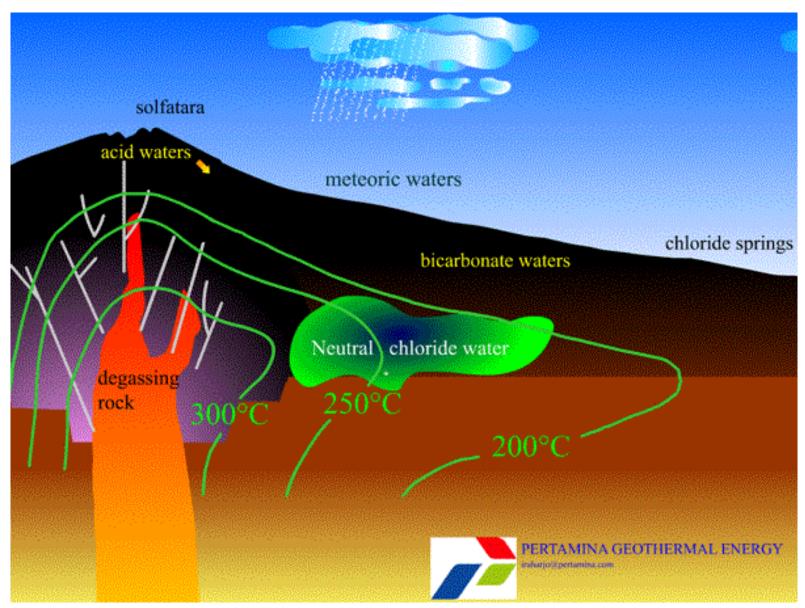
agua caliente que escapa del reservorio regresa a la superficie en fase



Grupo Investigación Exploración de Recursos Geotérmicos – SGC, 2019

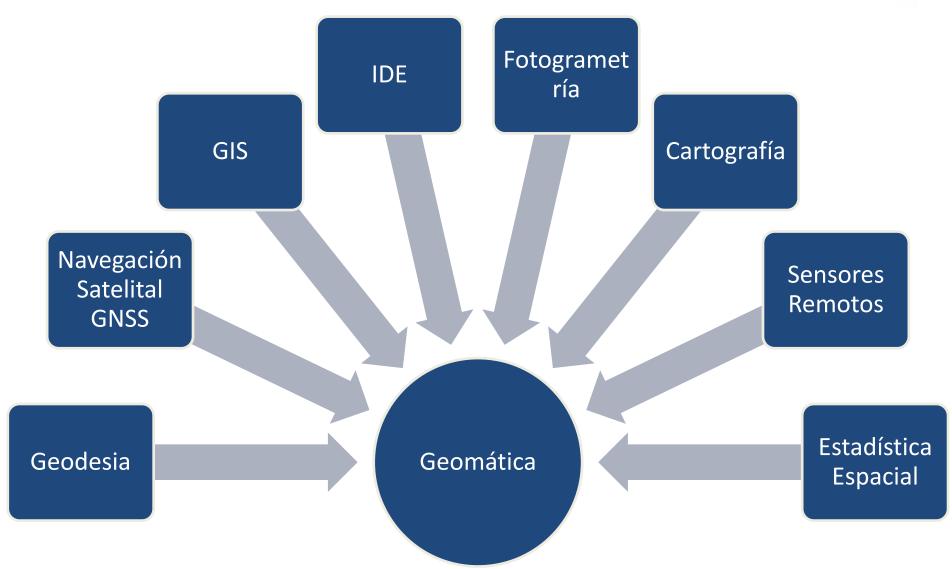
Modelos Conceptuales





2. Generalidades de la Geomática





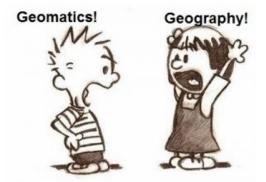
CATASTRO TOPOGRAFÍA CATASTROTOPOGRAFIA DRONES SIGCATASTRO SATELITE BIG GPS GEODESIA **BIG DATA GPS** BIG DATA DRONES TOPOGRAFIA SATÉLITE GEODESIA TOPOGRAFÍA CARTOGRAFÍA SIG TELEDETECCIÓN DRONES CATASTRO DRONES FOTOGRAMETRÍA

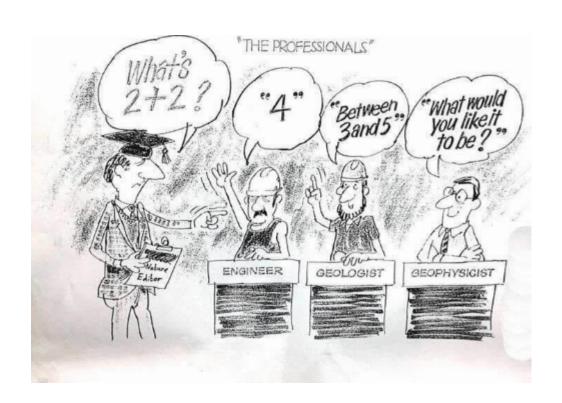


Raster **Vector** ESRI, 2020

Discusión







3. Integración Geomática – Geotermia



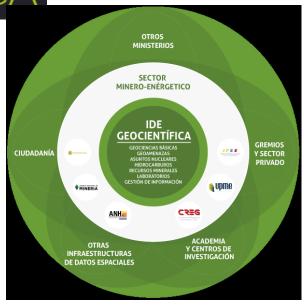


Infraestructura de Datos Espaciales



















Estándares

Políticas

Datos

Tecnología

Fortalecimiento Institucional



Estándar de Información Geotérmica

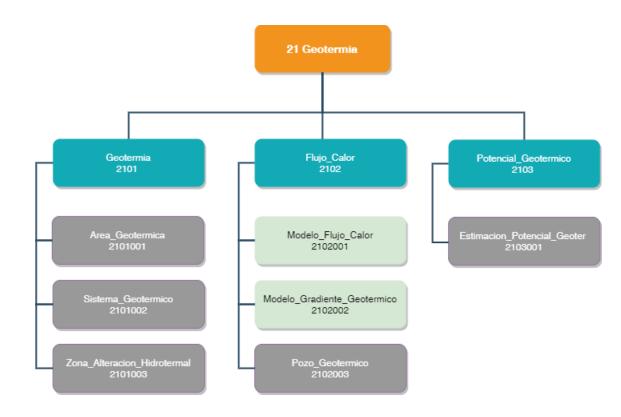


Estándares



ESTÁNDAR GEOGRÁFICO PARA INFORMACIÓN GEOTÉRMICA

Bogotá D.C., diciembre de 2020

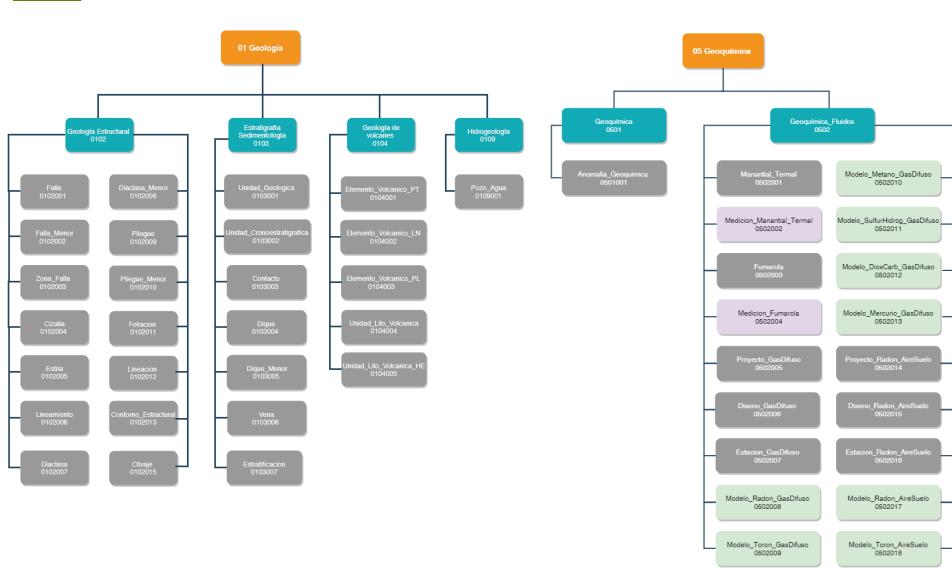






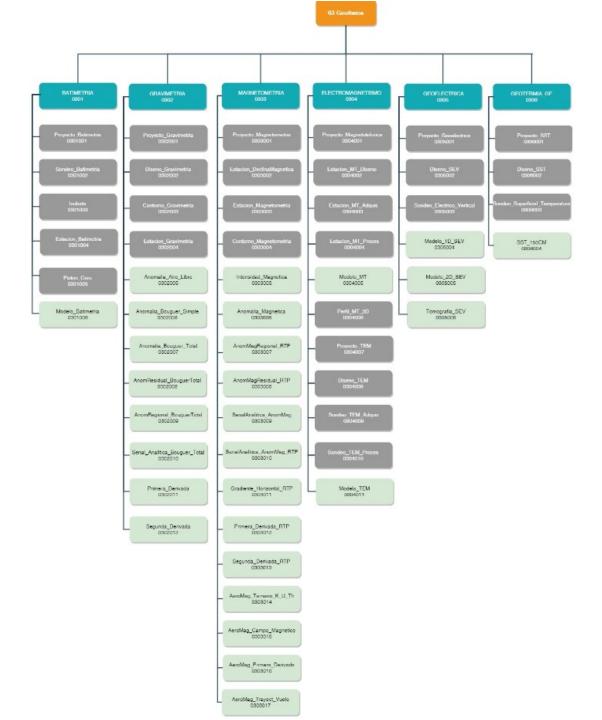








Fetándares







Estándares

Simbología Vector



Código del símbolo (*)	Nombre del Símbolo	Tipo (*)	Muestra Gráfica (*)	Propiedades (*)	Descripción (*)	Escala (*)	Recomendaciones de uso
CS0304001	Identificador Área Estudio Magnetotelúrica	Polígono		RGB relleno: transparente Tramado: no RGB contorno: 115,76,0 Estilo contorno: continuo Grosor contorno: 0,2 mm	Representa el cubrimiento del proyecto de magnetotelúrica	25K	
CS0304002	Identificador Estación Diseño Magnetotelúrica	Punto	MT	RGB: 255,0,0 Tamaño: 6 mm	Representa la ubicación de las estaciones diseñadas para magnetotelúrica	25K	
CS0304003041	Estación Adquisición Magnetotelúrica	Punto		RGB: 0,112,255 Tamaño: 6 mm	Representa la ubicación de las estaciones de adquisición para magnetotelúrica	25K	
CS0304003042	Estación Adquisición Audiomagnetotelúrica	Punto		RGB: 255,0,0 Tamaño: 6 mm	Representa la ubicación de las estaciones de adquisición para audiomagnetotelú rica	25K	
CS0304003043	Estación Adquisición Magnetotelúrica y Audiomagnetotelúrica	Punto		RGB: 255,0,0 – 0,112,255 Tamaño: 8 mm	Representa la ubicación de las estaciones de adquisición para magnetotelúrica y audiomagnetotelú rica	25K	
CS0304004	Identificador Estación Magnetotelúrica Procesamiento	Punto	МГ	RGB: 255,0,0 Tamaño: 8 mm	Representa la ubicación de las estaciones de procesamiento para magnetotelúrica	25K	Las letras M y T deben estar en RGB = 0,0,0
CS0304006	Identificador Perfil Modelo 3D MT	Línea		RGB: 0,0,0 Grosor: 0,6 mm	Localización de los perfiles o secciones del modelo MT 3D	25K	
CS0304007	Identificador Área Sondeos Transitorios Electromagnéticos	Polígono		RGB relleno: transparente Tramado: no RGB contorno: 156,70,53 Estilo contorno: continuo Grosor contorno: 0,2 mm	Representa el cubrimiento del proyecto de sondeos transitorios electromagnético s	25K	
CS0304008	Identificador Diseño Sondeo Transitorio Electromagnético	Punto	•	RGB: 255,85,0 Tamaño: 6 mm	Representa la ubicación de los sondeos transitorios electromagnético s diseñados	25K	
CS0304009	Identificador Sondeo Transitorio Electromagnético de adquisición	Punto	V	RGB: 223,115,255 Tamaño: 6 mm	Representa la ubicación de los sondeos transitorios electromagnético s adquiridos	25K	
CS0304010	Identificador Sondeo Transitorio Electromagnético de procesamiento	Punto	V	RGB: 85,255,0 Tamaño: 6 mm	Representa la ubicación de los sondeos transitorios electromagnético s procesados	25K	



Simbología Raster



Estándares

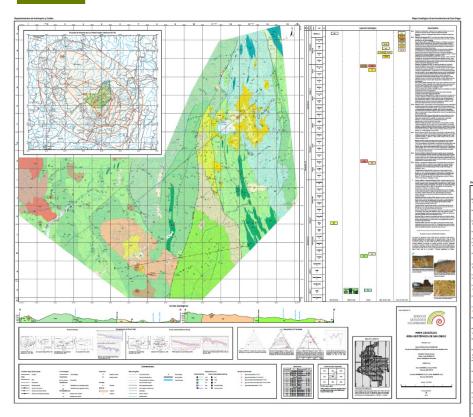
Código (Identificador)	Nombre de la imagen	Descripción de la Imagen	Tipo de Imagen	Información adicional	Representación
CS0303005	Intensidad Magnética	Representa el modelo de intensidad magnética	Continua	El usuario que procesa y representa la información, debe tener en cuenta las consideraciones generales de cada área de trabajo y los criterios aplicados a cada modelamiento	Esquema de colores: Espectro invertido – full brillante (Rainbow) Método de Clasificación: Puntos de quiebre naturales (Jenks) Numero de Clases para una óptima representación: 50
CS0303006	Anomalía Magnética	Representa el modelo de anomalía magnética	Continua	El usuario que procesa y representa la información, debe tener en cuenta las consideraciones generales de cada área de trabajo y los criterios aplicados a cada modelamiento	Esquema de colores: Espectro invertido – full brillante (Rainbow) Método de Clasificación: Puntos de quiebre naturales (Jenks) Numero de Clases para una óptima representación: 50
CS0303007	Anomalía Magnética Regional Reducida Polo	Representa el modelo de anomalía magnética regional reducida al Polo	Continua	El usuario que procesa y representa la información, debe tener en cuenta las consideraciones generales de cada área de trabajo y los criterios aplicados a cada modelamiento	Esquema de colores: Espectro invertido – full brillante (Rainbow) Método de Clasificación: Puntos de quiebre naturales (Jenks) Numero de Clases para una óptima representación: 50
CS0303008	Anomalía Magnética Residual Reducida Polo	Representa el modelo de anomalía magnética residual reducida al Polo	Continua	El usuario que procesa y representa la información, debe tener en cuenta las consideraciones generales de cada área de trabajo y los criterios aplicados a cada modelamiento	Esquema de colores: Espectro invertido – full brillante (Rainbow) Método de Clasificación: Puntos de quiebre naturales (Jenks) Numero de Clases para una óptima representación: 50
CS0303009	Señal Analítica Anomalía Magnética	Representa el modelo de la señal analítica de la anomalía magnética	Continua	El usuario que procesa y representa la información, debe tener en cuenta las consideraciones generales de cada área de trabajo y los criterios aplicados a cada modelamiento	Esquema de colores: Espectro invertido – full brillante (Rainbow) Método de Clasificación: Puntos de quiebre naturales (Jenks) Numero de Clases para una óptima representación: 50

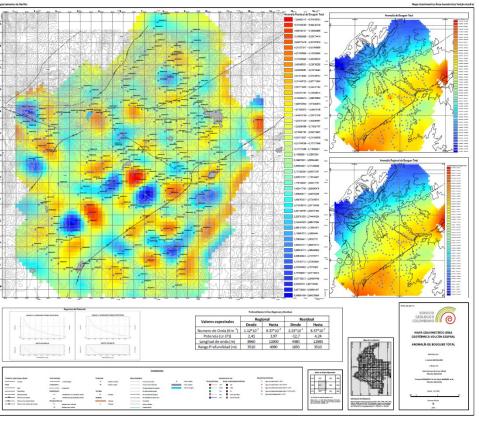


Salidas Gráficas



Estándares







Geoservicios - WMS



Datos

Amenaza Sísmica Nacional

http://srvags.sgc.gov.co/arcgis/services/Amenaza_Sismica/Amenaza_Sismica_Nacional/MapServer/WMSServer?

BIP Banco de Información Petrolera

http://srvags.sqc.gov.co/arcgis/services/EPIS/EPIS V2/MapServer/WMSServer?

Mapa de Amenaza Sísmica Nacional PGA225

http://srvags.sgc.gov.co/arcgis/services/Amenaza_Sismica/Mapa_Amenaza_Sismica_Nacional_PGA225/MapServer/WMSServer?

Mapa Amenaza Sísmica Nacional PGA475

http://srvags.sgc.gov.co/arcgis/services/Amenaza_Sismica/Mapa_Amenaza_Sismica_Nacional_PGA475/MapServer/WMSServer?

Mapa Amenaza Sísmica Nacional PGA75

http://srvags.sgc.gov.co/arcgis/services/Amenaza_Sismica/Mapa_Amenaza_Sismica_Nacional_PGA75/MapServer/WMSServer?

Mapa Amenaza Sísmica Nacional PGA975

http://srvags.sgc.gov.co/arcgis/services/Amenaza_Sismica/Mapa_Amenaza_Sismica_Nacional_PGA975/MapServer/WMS Server?

Amenaza Volcánica

http://srvags.sgc.gov.co/arcgis/services/Amenaza_Volcanica/Amenaza_Volcanica/MapServer/WMSServer?

Anomalías Geoquímicas y Potencial Geoquímico

http://srvags.sgc.gov.co/arcgis/services/Anomalias_Geoquimica/Anomalias_Geoquimicas_y_Potencial_Geoquimico/MapSrver/WMSServer?

Depósitos_Minerales

http://srvags.sgc.gov.co/arcgis/services/Anomalias_Geoquimica/Depositos_Minerales/MapServer/WMSServer?

Mapa inventario muestra litoteca

http://srvags.sgc.gov.co/arcgis/services/Mapa_Inventario_Muestra_Litoteca/Mapa_Inventario_Muestra_Litoteca/MapServer/WMSServer?

Áreas Hidrográficas Geoquímicas;

http://srvags.sgc.gov.co/arcgis/services/AREAS_HIDRO_GEOQ/AREAS_HIDROGRAFICAS_GEOQUIMICAS/MapServer/WMSServer?

> Atlas Geológico 2015 Mapa Base

http://srvags.sgc.gov.co/arcgis/services/Atlas_Geologico_2015/Atlas_Geologico_2015_Mapa_Base/MapServer/WMSServe r?

> Atlas Geológico Colombiano 2015

http://srvags.sgc.gov.co/arcgis/services/Atlas_Geologico_2015/Atlas_Geologico_Colombiano_2015/MapServer/WMSServer/

Atlas Geológico Colombia

http://srvags.sgc.gov.co/arogis/services/Atlas_Geologico_Colombiano/Atlas_Geologico_Colombia/MapServer/WMSServer?

Atlas Geoquímico de Colombia V2016

http://srvags.sgc.gov.co/arcgis/services/Atlas_Geoquimico_V2016/Atlas_Geoquimico_de_Colombia_V2016/MapServer/W



Aplicaciones



Tecnología



El Inventario

¿Para qué?

Objetivo

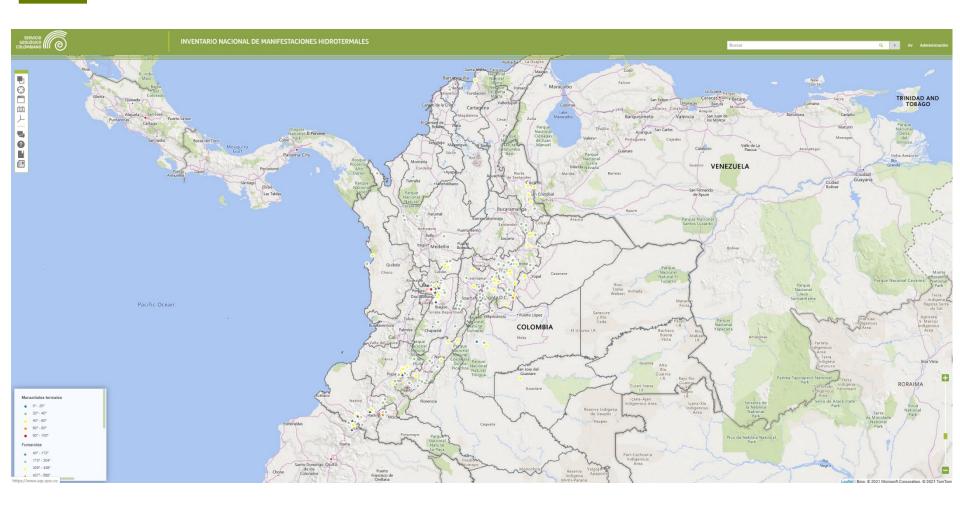
Ir a la aplicación 🕨





INMH





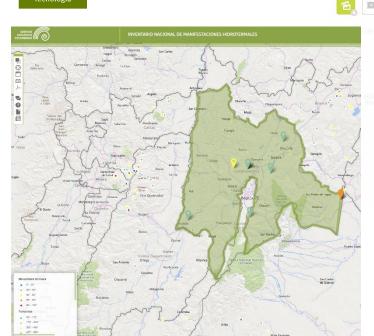
http://hidrotermales.sgc.gov.co/

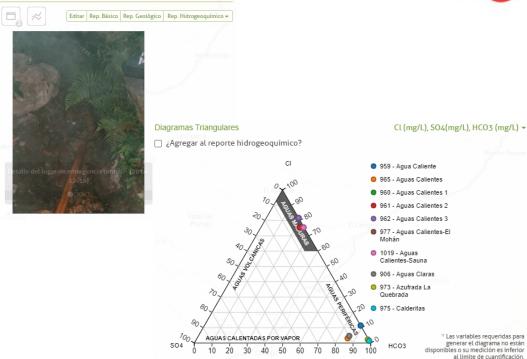


INMH

Detalles manantial Agua Caliente

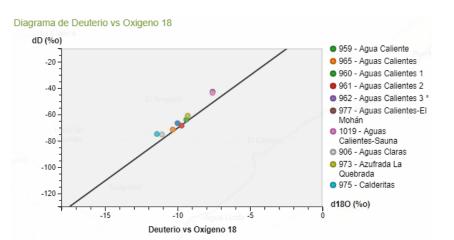






@ □ ×

http://hidrotermales.sgc.gov.co/





HCO3

Na





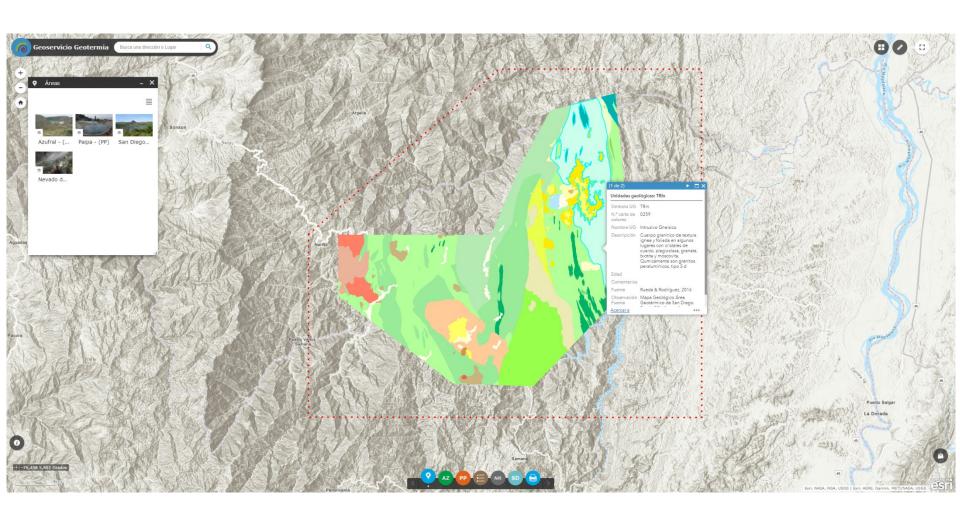








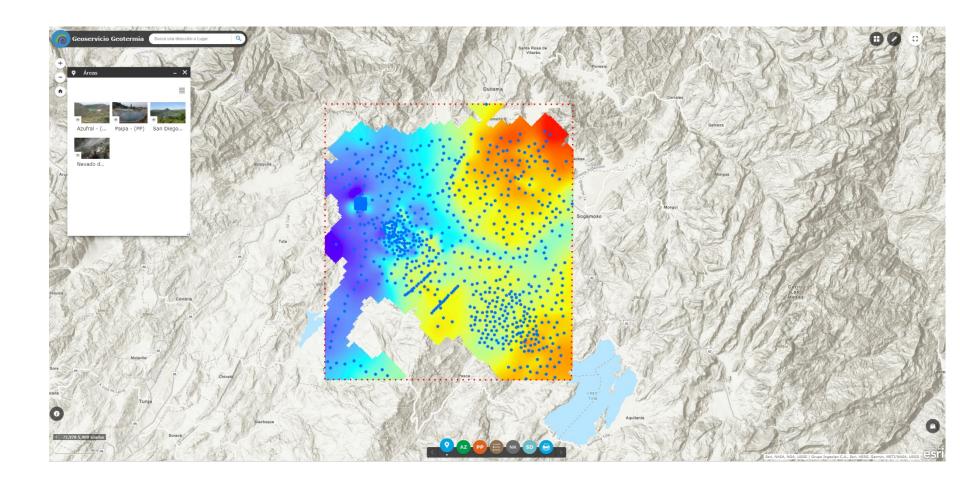








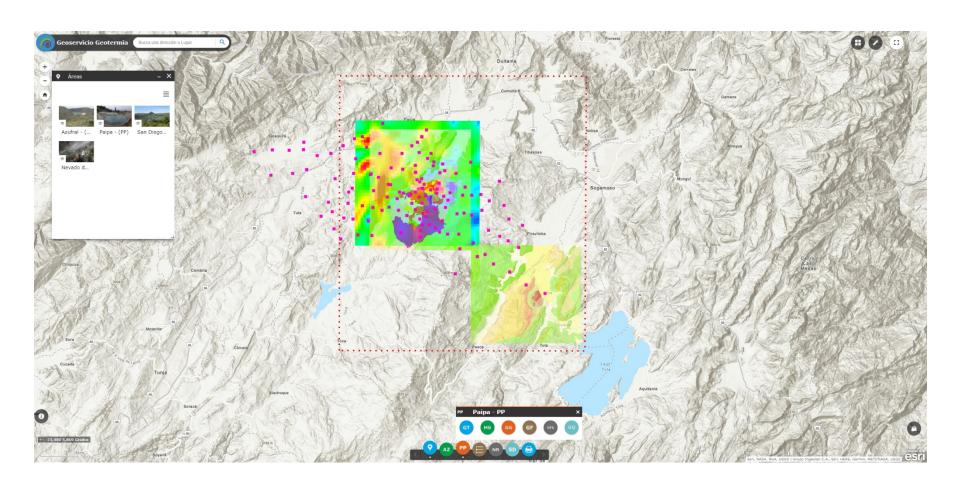






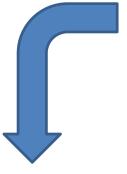
Geoportal de Información Geotérmica



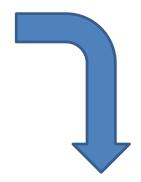


Sensoramiento Remoto







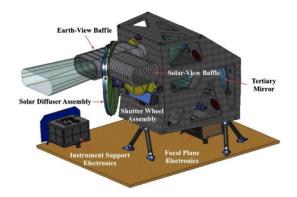


LANDSAT 8

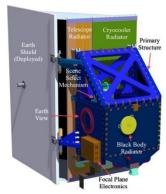


Materiales





USGS, 2016



Métodos - Sensores Remotos



Radiancia Espectral

NASA, 2009

$$ND_{Rad} = \left(\frac{Lmax_{\lambda} - Lmin_{\lambda}}{QCal_{max} - QCal_{min}}\right) * (QCal - QCal_{min}) + Lmin_{\lambda}$$

Corrección Atmosférica

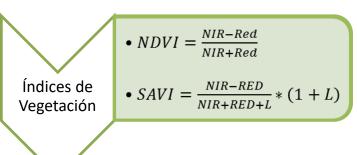
Parámetros de Corrección Atmosférica (perfiles multitemporales de altitud, presión, temperatura y humedad relativa) – Barsi et al., 2003 Función de Planck (objetos con radiancia espectral) - Coll et al., 2010

$$ND_CA_{Rad} = \frac{ND_{Rad} - L \uparrow}{\varepsilon * \tau} - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} L \downarrow$$

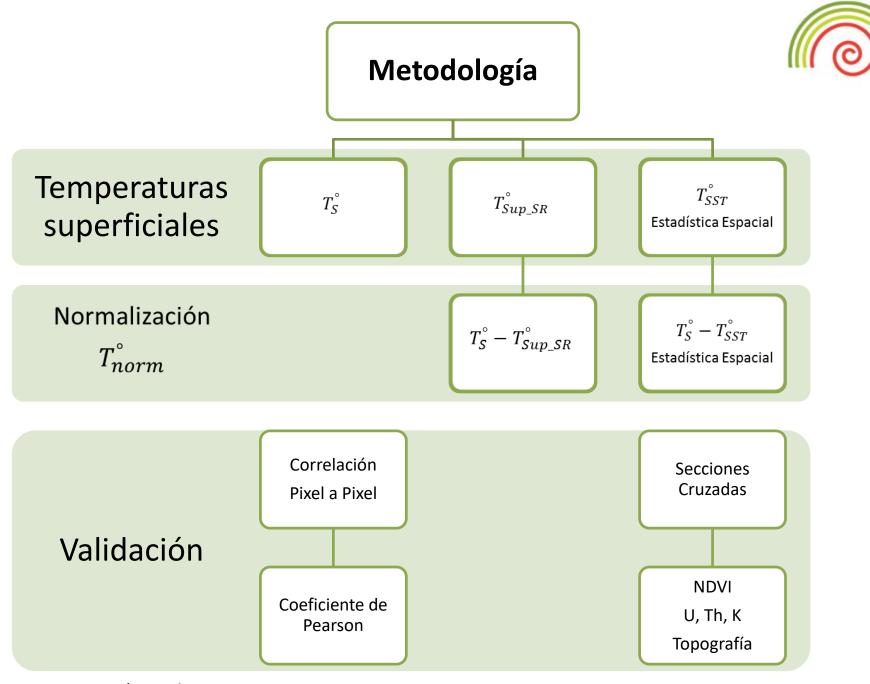
Radiancia Espectral a °C

NASA, 2009

$$T_{Sup}^{\circ} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{ND_CT_{Rad}} + 1\right)} - 273.15^{\circ}C$$



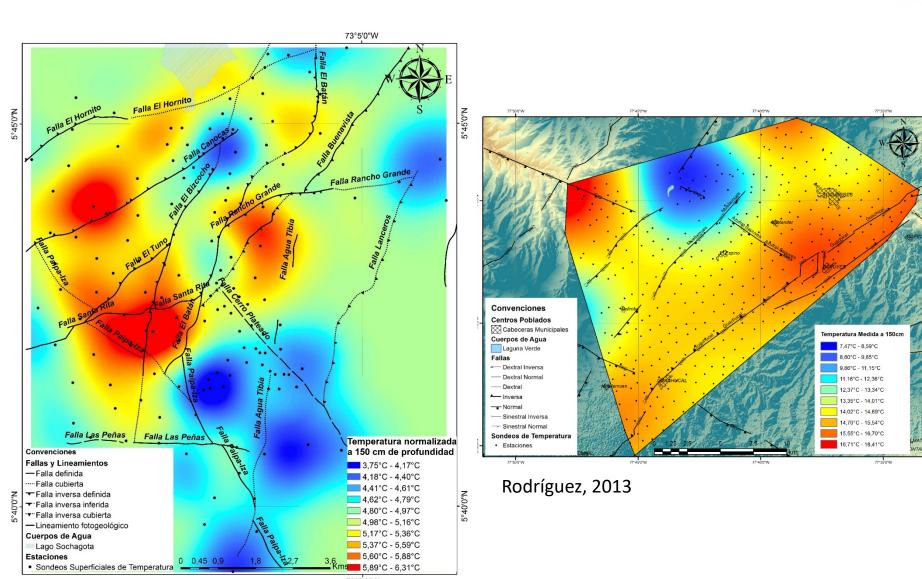
Matiz-León et al., 2019



Matiz-León et al., 2019

SST



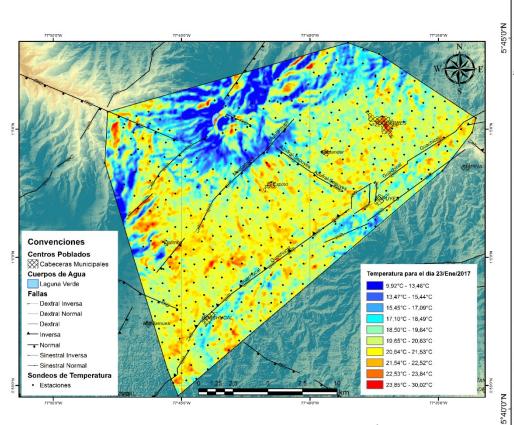


5,89°C - 6,31°C

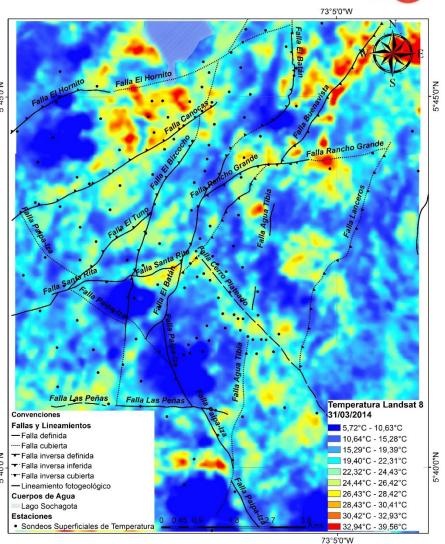
73°5'0"W







Matiz-León et al., 2019



Validación

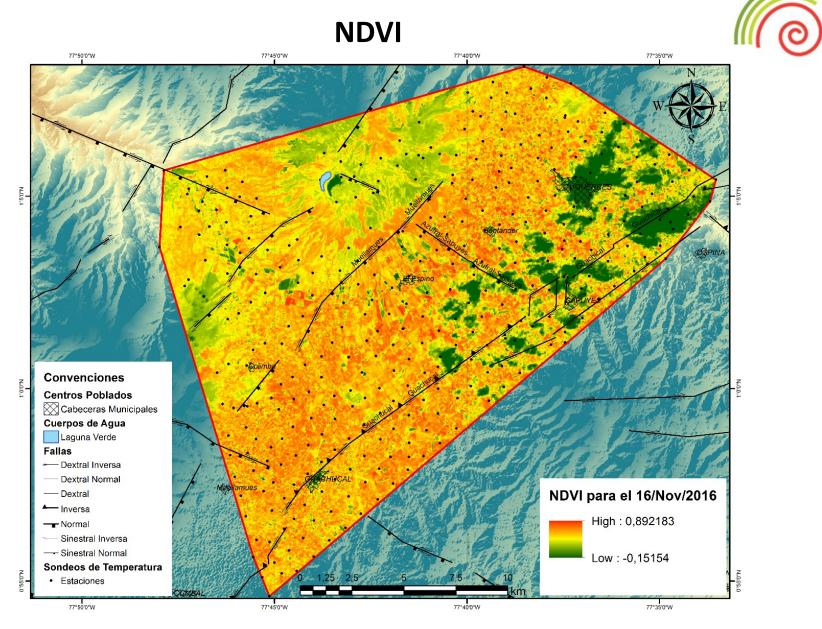


Correlación pixel a Pixel - Coeficiente de Pearson

•
$$\rho_{X,Y} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}$$
, $donde - 1 \le \rho_{X,Y} \le 1$

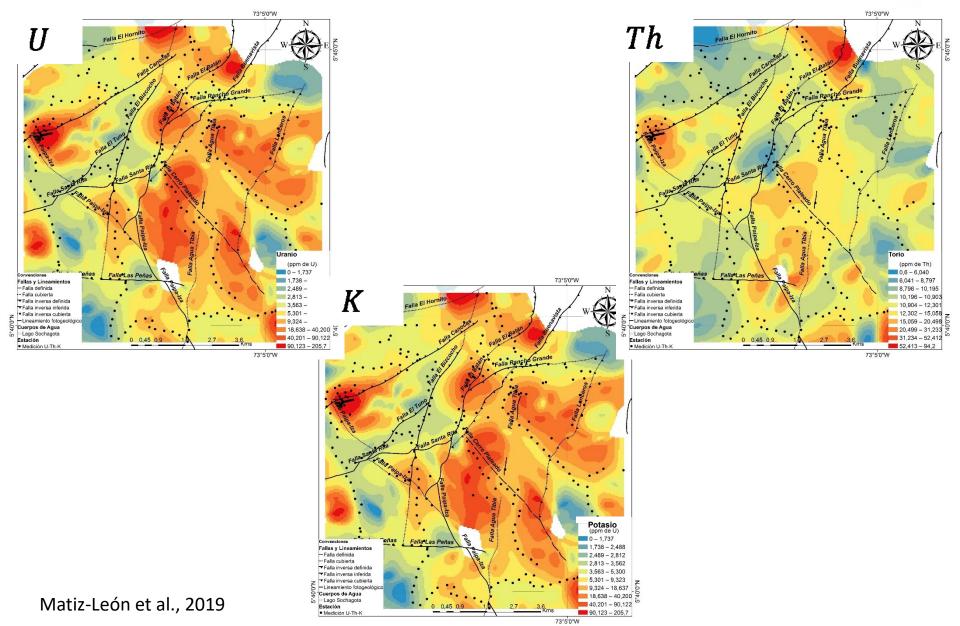
Variables	Pearson Coefficient	Variables	Pearson Coefficient
Temperature calculated based on heights vs temperature calculated by RS for 15/Sep/2015	0.2104	Temperature measured in surface vs temperature calculated by RS for 15/Sep/2015	0.2746
Temperature calculated based on heights vs temperature calculated by RS for 20/Nov/2016	0.1928	Temperature measured in surface vs temperature calculated by RS for 20/Nov/2016	0.0547
Temperature calculated based on heights vs temperature calculated by RS for 23/Ene/2017	0.4388	Temperature measured in surface vs temperature calculated by RS for 23/Ene/2017	0.3627

Matiz-León et al., 2019



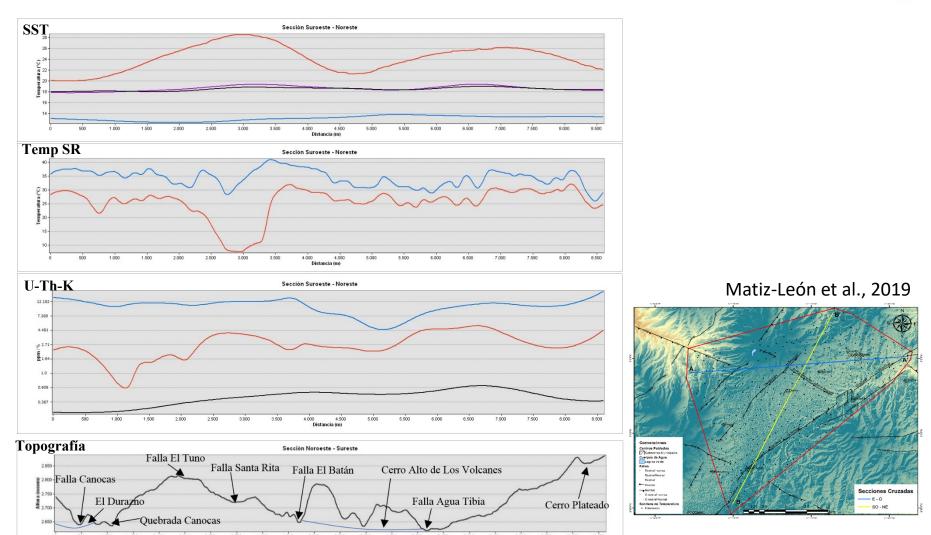
Anomalías radioactivas – ¿Fuentes de calor?





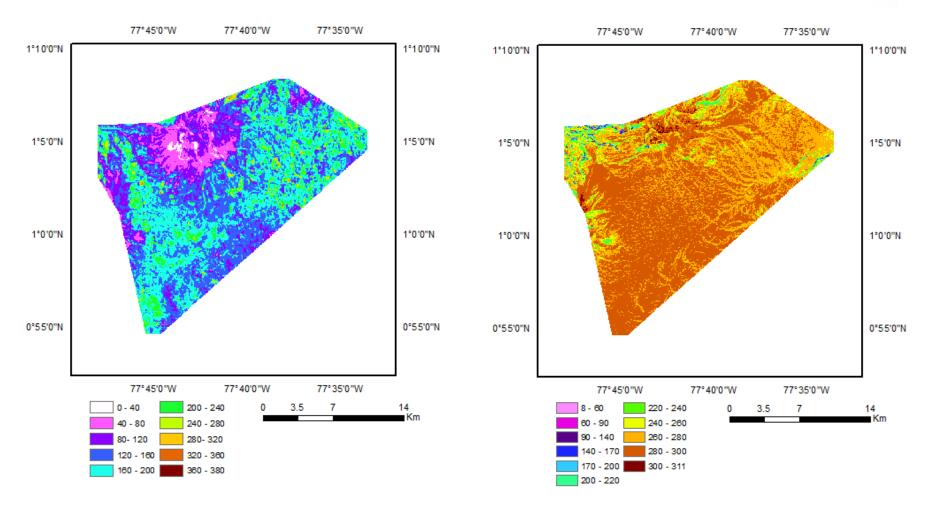
Análisis de Secciones Cruzadas



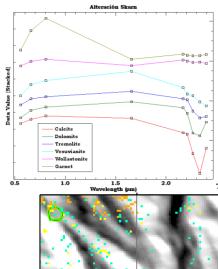


Flujo de Calor - TIR



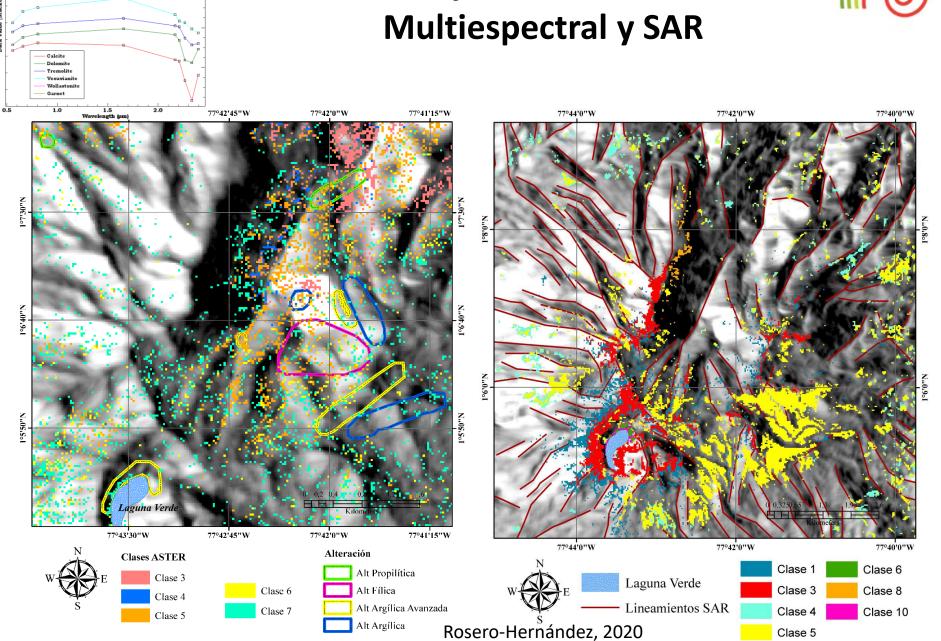


Higuera-Albadan, 2018



ZAH y Lineamientos – Multiespectral y SAR

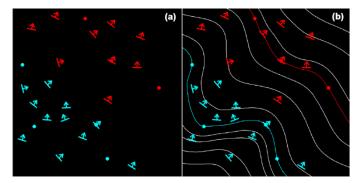






Estadística Espacial

$$T^*(p) - T^*(p_0) = \sum_{\alpha=1}^{M} \mu_{\alpha}(T(p_{\alpha}) - T(p'_{\alpha})) + \sum_{\beta=1}^{N} \nu_{\beta} \frac{\partial T}{\partial u_{\beta}}(p_{\beta})$$



Calcagno et al., 2008

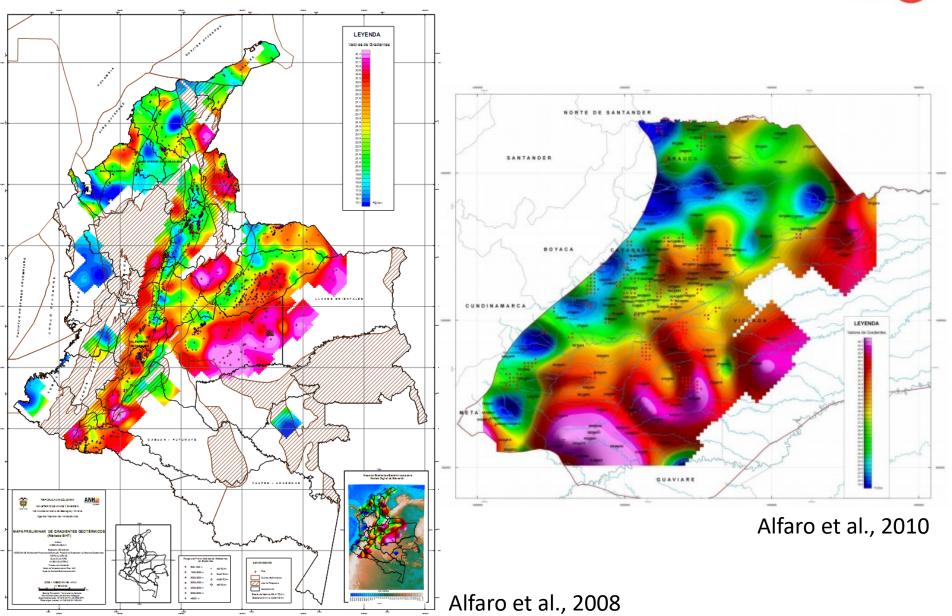
Guillen et al., 2008

Cokriging

Principio del método de interpolación del campo potencial 2D: puntos de dos formaciones y curvas de isovalores de los contactos de las formaciones modeladas

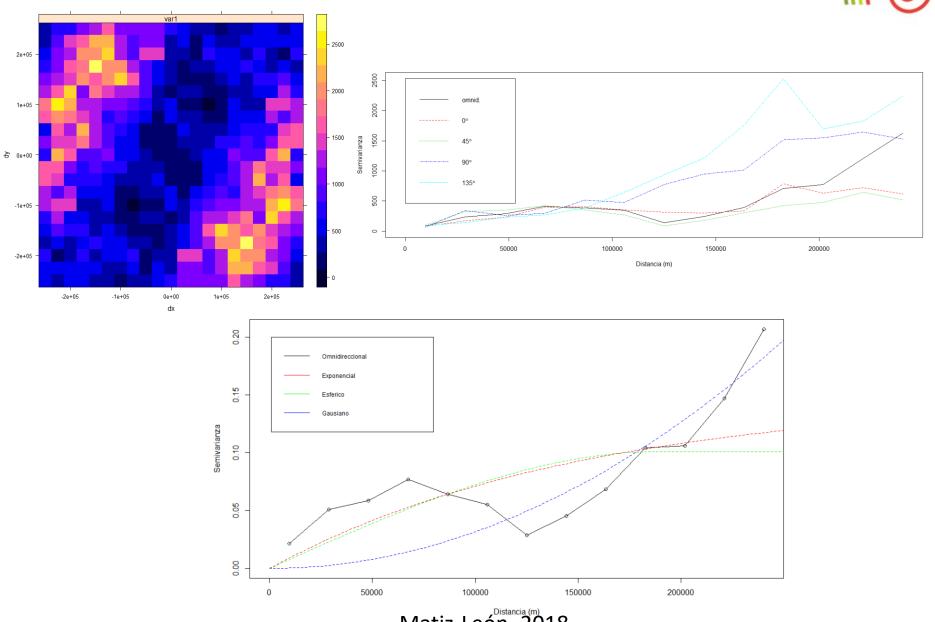
Geoestadística





Anisotropía y Variogramas

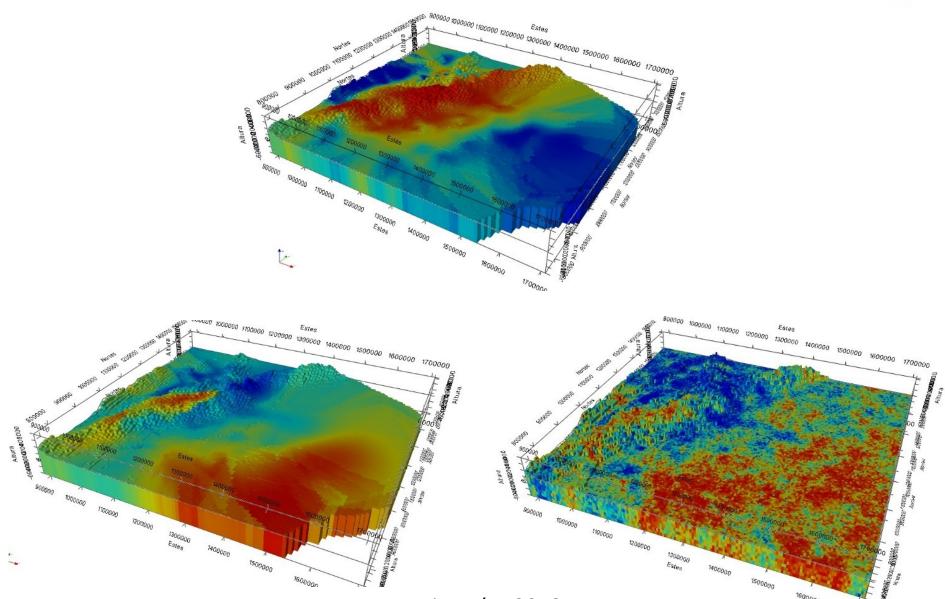




Matiz-León, 2018

Geoestadística 3D

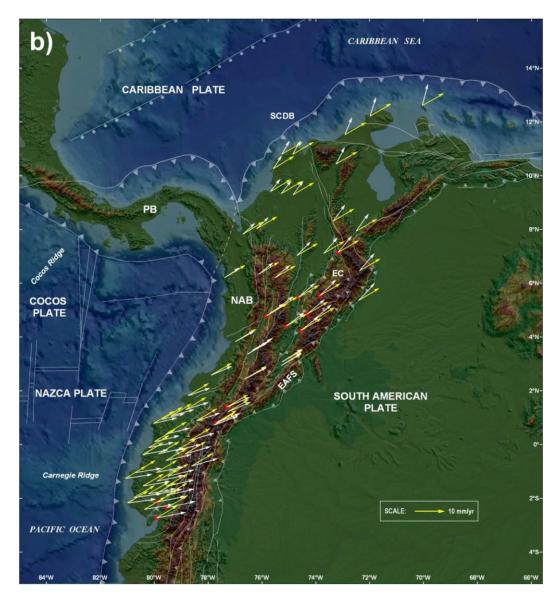




Matiz-León, 2018

Aplicaciones Futuras Tasas de Deformación Geodésica



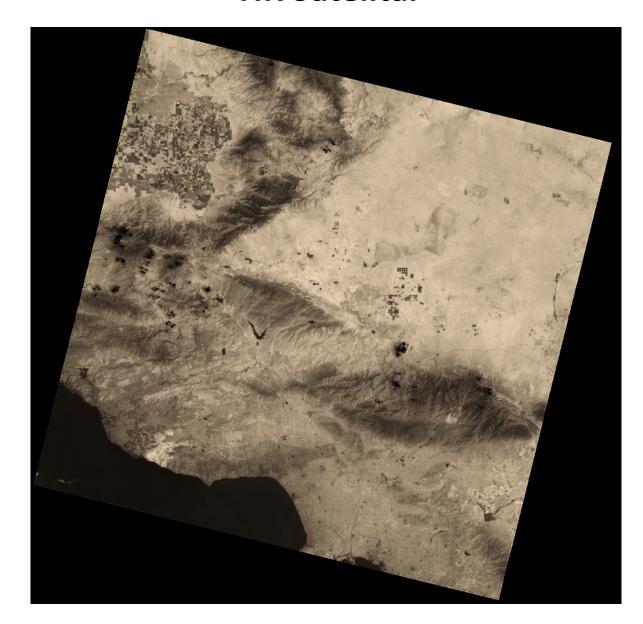




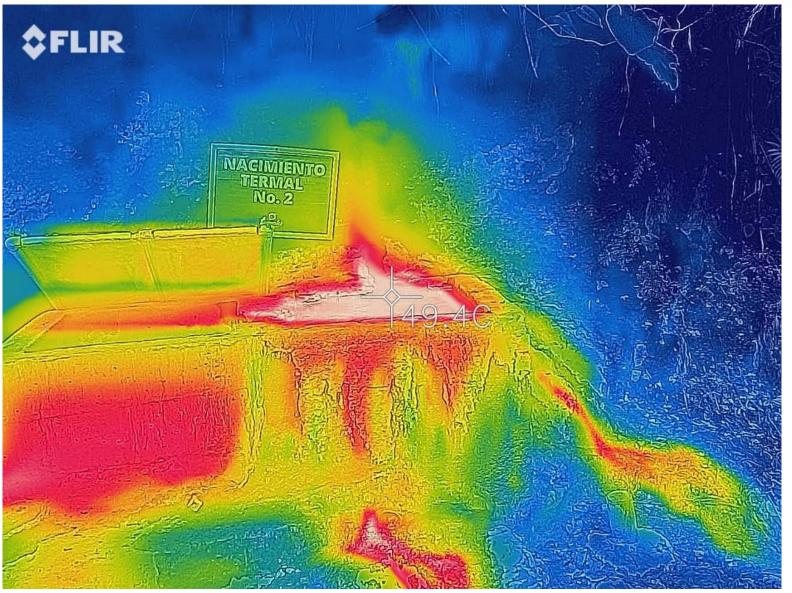
ID	Longitude	Latitude	Vel (E)	Vel (N)	Sig (E)	Sig (N)
ACP1	-79.950	9.371	15.3	-2.4	0.3	0.3
ACP6	-79.408	9.238	15.2	-1.8	0.2	0.2
AHUA	-77.550	-1.060	-4.3	-3.8	0.7	0.4
ALPA	-72.918	11.528	7.0	-1.1	0.9	0.6
AMAL	-79.420	-4.580	-2.3	-5.5	0.5	0.3
ARCA	-70.750	7.080	-6.8	-3.3	0.5	0.5
AUCA	-76.880	-0.640	-5.6	-5.0	0.3	0.2
AYAN	-80.750	-1.980	5.5	0.7	1.0	0.8
BAAP	-73.554	4.072	-7.3	-4.7	0.5	0.2
BACO	-75.692	9.402	11.6	-6.6	0.9	1.0
BAEZ	-77.887	-0.459	-0.8	-3.6	0.3	0.2
BALZ	-79.900	-1.360	3.4	-0.4	1.2	0.9
BAME	-74.565	4.236	-0.6	-0.3	0.7	0.2

Aplicaciones Futuras TIR Satelital



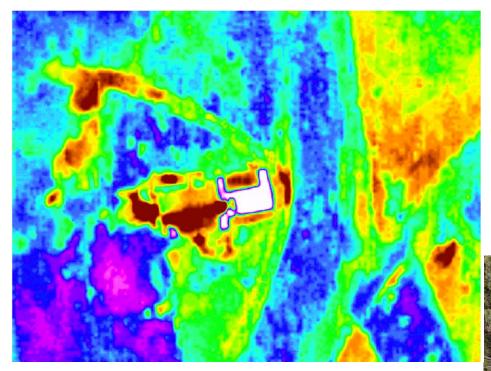






Aplicaciones Futuras TIR UAVs







Aplicaciones Futuras



ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Programs with the ability to learn and reason like humans

MACHINE LEARNING

Algorithms with the ability to learn without being explicitly programmed

DEEP LEARNING

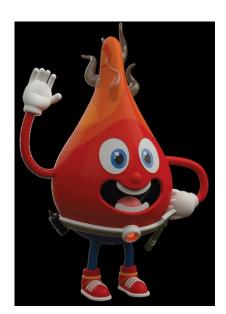
Subset of machine learning in which artificial neural networks adapt and learn from vast amounts of data



4. Conclusiones







Datos Multipropósito

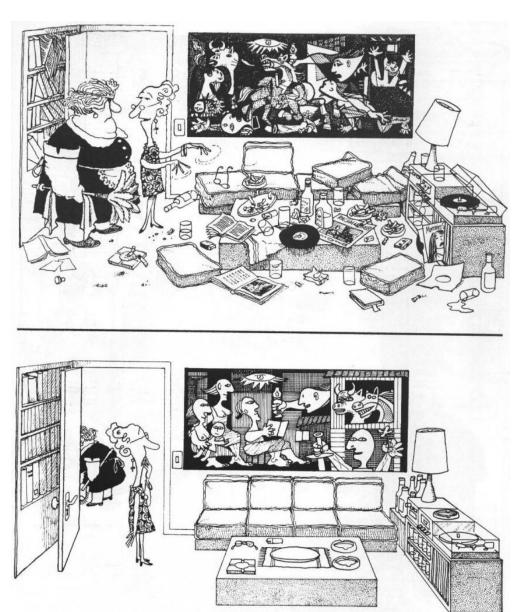




https://agoraafrica.com/the-earths-energy-geothermal-heating-cooling-systems/

Planificación y Organización del Territorio incluyendo la Geotermia





Verdadera Alternativa



Copyright © 2008 Creators Syndicate, Inc.

BIBLIOGRAFÍA



- ALFARO, C. 2002. Geoquímica del sistema Geotérmico de Paipa. Ingeominas. 97 Pág. Bogotá.
- ALFARO, C. 2005. Geoquímica preliminar de gases del sistema geotérmico de Paipa. Ingeominas. 44 Pág. Bogotá.
- ALFARO, C. 2013. Modelo geotérmico integrado del Volcán Azufral. Alteración Hidrotermal, Capítulo 6. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá.
- ALFARO-VALERO, C., MATIZ-LEON, C., RUEDA-GUTIÉRREZ, J., RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ, G., GONZÁLEZ-IDÁRRAGA, C., BELTRÁN-LUQUE, M., RODRÍGUEZ-OSPINA, G. Y MALO, J. 2017. Informe técnico. Actualización del Modelo Conceptual del Área Geotérmica de Paipa. Servicio Geológico Colombiano SGC. 111 Pág. Bogotá D.C.
- BELTRAN, M. 2019. Informe final: gravimetría y magnetometría del área geotérmica del volcán cerro machín. Servicio Geológico Colombiano. 49 Pág. Bogotá. En proceso de oficialización.
- BELTRAN, M. 2016. Interpretación datos gravimétricos y magnetométricos área de Azufral (Nariño). Servicio Geológico Colombiano. 76 Pág. Bogotá.
- CALCAGNO, P., CHILES, J. P., COURRIOUX, G. & GUILLEN, A., 2008. Geological modelling from field data and geological knowledge Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules. Physics of the Earth and Planetary Interiors, Issue 171, pp. 147-157.
- CEPEDA, H., PARDO, N. 2004. Vulcanismo de Paipa. Servicio Geológico Colombiano. 104 Pág. Bogotá.
- FRANCO, J. 2016. Actualización Geoeléctrica en el área geotérmica de Paipa Boyacá. Servicio Geológico Colombiano. Sin oficializar. 94 Pág. Bogotá.
- GRUPO INVESTIGACIÓN Y EXPLORACIÓN DE RECURSOS GEOTÉRMICOS. 2019. Cartilla de difusión. ¿Qué es exploración geotérmica? Servicio Geológico Colombiano SGC. 15 Pág. Bogotá D.C.
- GUILLEN, A., CALCAGNO, P., COURRIOUX, G., JOLY, A., & LEDRU, P. 2008. Geological modelling from field data and geological knowledge. Part II. Modelling validation using gravity and magnetic data inversion. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 171(1–4), 158–169. https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.06.014
- MALO, J. 2020. modelo conceptual descriptivo del sistema geotérmico del volcán Azufral. Capitulo Radón en aire del Suelo, área geotérmica del volcán Azufral. Servicio Geológico Colombiano. 20 Pág. Bogotá. En proceso de oficialización.
- MALO, J., ALFARO, C. 2017. Línea meteórica local, Boyacá Centro Norte. Servicio Geológico Colombiano. 105 Pág. Bogotá.
- MATIZ-LEÓN, J. C. 2014. Propuesta Metodológica para la representación espacial de Modelos Conceptuales de Sistemas Geotérmicos. Bogotá D.C. SGC.
- MATIZ-LEÓN, J. C. 2015. Modelo conceptual geológico geofísico del área geotérmica de Paipa, Boyacá. Bogotá D.C. SGC.

BIBLIOGRAFÍA



- MATIZ-LEÓN, J. C. 2016. Modelo geológico geofísico 3D preliminar del área geotérmica del Volcán Nevado del Ruiz. Bogotá D.C.
 SGC.
- MCINERNEY, P., LANE, R., SEIKEL, R., GUILLEN, A., GIBSON, H. & FITZGERALD, D. 2014. Structural Geology 3D Modelling & Geophysical Modelling in 2D/3D. Forward modelling and Inversion with 3D GeoModeller. Melbourne, Australia.
- RODRÍGUEZ, G. y RUEDA-GUTIÉRREZ, J. 2017. Geología estructural del área geotérmica del volcán Azufral. Servicio Geológico Colombiano. 80 Pág. Bogotá.
- RODRIGUEZ- RODRIGUEZ, G., VALLEJO, E. 2013. Informe Final Sondeos Superficiales de temperatura en el área geotérmica de Paipa (Boyacá). Servicio Geológico Colombiano. 58 Pág. Bogotá.
- RODRIGUEZ-RODRIGUEZ, G. 2015. Determinación de la estructura resistiva del subsuelo a Partir de registros magnetotelúricos para la Caracterización del sistema geotérmico del municipio de Paipa. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Trabajo de grado. 74 Pág. Bogotá.
- RODRIGUEZ- RODRIGUEZ, G. 2018. Modelamiento 1d, 2d y 3d de la estructura resistiva del subsuelo a partir de registros magnetotelúricos para el área geotérmica del volcán Azufral. Servicio Geológico Colombiano. 72 Pág. Bogotá.
- RODRIGUEZ-RODRIGUEZ, G. 2020. Tomografía sísmica del área geotérmica del Volcán Cerro Machín. Servicio Geológico Colombiano. 34 Pág. Bogotá. Sin Oficializar.
- RUEDA, J. 2016. Modelos geológicos 3D del área geotérmica de San Diego Caldas. Bogotá D.C. SGC.
- RUEDA, J. 2017. Cartografía de los cuerpos dómicos del área geotérmica de Paipa. Bogotá D.C.
- RUEDA-GUTIERREZ, J. 2017. Cartografía de los cuerpos dómicos del área geotérmica de Paipa. Servicio Geológico Colombiano. 122
 Pág. Bogotá.
- RUEDA-GUTIÉRREZ, J. Y ALFARO-VALERO, C. 2020. Informe técnico. Prognosis a partir de sondeos de audiomagnetotelúricos (AMT) y transiente electromagnético (TEM) en predios seleccionados para las perforaciones de gradiente geotérmico. Paipa, Boyacá. Servicio Geológico Colombiano SGC. 9 Pág. Bogotá D.C.
- VELANDIA, F. 2003. Informe técnico. Cartografía geológica y estructural sector sur del municipio de Paipa. Servicio Geológico Colombiano. 36 Pág.





jmatiz@sgc.gov.co www.sgc.gov.co