

SIG: Una herramienta eficaz para la integración, gestión y análisis de información de instalaciones superficiales en campos geotérmicos

Juan Ignacio Martínez Estrella y Adriana Paredes Soberanes

Instituto de Investigaciones Eléctricas, Reforma 113, Col. Palmira, 62490, Cuernavaca, Mor. Correo: jime@iie.org.mx

Resumen

En este trabajo se describen los aspectos más importantes a considerar para la implementación de un Sistema de Información Geográfica (SIG) aplicado a instalaciones superficiales en campos de producción de vapor geotérmico. En particular, se analiza el uso de los SIG como una herramienta práctica y eficaz para la integración, gestión, visualización y análisis de información asociada a pozos, ductos, plataformas, producción, mantenimiento, etc., dentro de una misma plataforma informática y marco geográfico. La utilización de este tipo de sistemas promueve la homologación y organización eficiente de la información que generan las distintas áreas del campo para agilizar su compartición y facilitar su consulta, coadyuvando de esta forma a la toma de decisiones. Considerando que el desarrollo de aplicaciones SIG específicas puede requerir un modelo de información riguroso, con base en el análisis efectuado y en la experiencia obtenida a través del desarrollo de algunos proyectos relacionados con sistemas de recolección y transporte de vapor en campos geotérmicos mexicanos, se propone de forma preliminar un modelo conceptual de base de datos para la implementación de estos sistemas.

Palabras clave: Sistema de Información, base de datos geográfica, campo geotérmico, infraestructura geotérmica, instalaciones superficiales.

GIS: An effective tool for integration, management and analysis of information from superficial geothermal facilities

Abstract

This paper describes some of the most important aspects taken into account for the implementation of a Geographic Information System (GIS) applied to surface facilities in geothermal steam fields. Particularly, we analyze the use of GIS as a practical and effective tool for the integration, management, visualization, and analysis of information related to wells, pipelines, platforms, production, maintenance, etc., within the same platform and geographical framework. The use of GIS promotes the alignment and efficient organization of the information generated by the different areas of the geothermal field in order to expedite its sharing in an efficient and effective manner contributing in this way to the decision-making processes. Taking into account that the development of some specific GIS applications may require rigorous information models, based on the analysis made and the experience gained by our staff through the development of diverse studies related to geothermal steam gathering and transportation systems in Mexican geothermal fields, a basic conceptual data model for the implementation of these systems is preliminarily proposed.

Keywords: Information System, geographical database, geothermal steamfield, geothermal infrastructure, surface facilities.

1. Introducción

Un Sistema de Información es un concepto genérico que tiene diferentes significados según el campo del conocimiento al que se aplique. No obstante, de manera general se puede definir como un conjunto de elementos orientados al tratamiento y administración de datos e información generados para cubrir una determinada necesidad u objetivo, organizados y listos para su uso posterior. El sistema debe cumplir las siguientes funciones: a) convertir los datos en información, b) facilitar la consulta y agilizar el análisis, y c) apoyar la toma de decisiones.

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es un sistema computarizado que permite la captura, mantenimiento, análisis, integración y despliegue de cualquier dato relacionado a una referencia espacial (localización geográfica) o a un mapa. En un SIG, la creación de mapas va más allá de una simple presentación cartográfica estética y estática. Constituye más bien una *ventana* interactiva a un conjunto determinado (capas) de información geográfica y a sus atributos o datos descriptivos, los cuales comúnmente son almacenados y organizados como tablas dentro de una base de datos. Se utiliza como interfaz entre múltiples fuentes de información, a través de la cual se puede responder a cuestionamientos habituales y generales, y generar valiosos modelos de análisis espacial, con las capas de información que se despliegan sobre el mapa.

En el contexto de los recursos energéticos del subsuelo, como la geotermia o los hidrocarburos, los SIG constituyen una herramienta tecnológica con un enorme potencial de utilización, debido a que la mayor parte de los elementos físicos, datos y decisiones relacionados con la exploración, explotación, recolección, transporte y manejo de estos recursos, involucran invariablemente un componente geográfico.

Einarsson y Hauksdóttir (2010) proponen el concepto de *información geotérmica* para referirse a toda la información que describe un recurso geotérmico: su estado natural, exploración y utilización, y establecen que tener en cuenta todos los aspectos de la utilización de un recurso geotérmico sirve como la base para evaluar su aprovechamiento sostenible. A partir de ello se desprende la necesidad de contar con un *marco o estructura común* para la información geotérmica. Ellos sostienen que prácticamente toda la información geotérmica tiene un componente espacial, por lo tanto, *un enfoque de información geográfica a toda la información geotérmica está más que justificado*.

En el ámbito de la geotermia, tanto a nivel nacional como internacional, el uso de los SIG se ha dirigido hasta ahora casi exclusivamente hacia las geociencias y durante las etapas de prospección, exploración, y en menor medida en el desarrollo de campos geotérmicos, donde han sido empleados para la integración de bases de datos espaciales, el mapeo automatizado, la generación de modelos basados en el conocimiento, la identificación de zonas con potencial geotérmico, y la selección de sitios para pozos y plantas generadoras (Prol-Ledesma, 2000; Martínez-Estrella et al., 2005; Lara-Cuervo, 2006; Noorollahi et al., 2007; Olivar, 2007; Yousefi and Ehara, 2008; García-Estrada et al., 2008; Carranza et al., 2008; Ordaz-Méndez et al., 2011), entre otras aplicaciones.

En contraste, la utilización de la tecnología SIG en la industria petrolera y del gas se ha extendido más allá de las fases de exploración y desarrollo de campos, siendo aplicada también en aspectos relacionados al manejo, transporte, distribución y comercialización de estos recursos, incluyendo la gestión de la enorme infraestructura asociada a estos procesos. Así, en colaboración con diversas comunidades de investigación en ciencias de la información geográfica, esta industria ha logrado desarrollar una cantidad importante de conceptos, metodologías, modelos de bases de datos y soluciones informáticas, destinadas a hacer más eficientes sus procesos de gestión de información y desarrollo de negocios.

Dadas las evidentes similitudes de la industria geotérmica con la del petróleo, resulta procedente considerar el aprovechamiento del conocimiento y la experiencia lograda en esta última, para aplicarla en este caso a la gestión de la infraestructura superficial en campos geotérmicos.

El presente trabajo propone el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como una herramienta eficaz para la integración, gestión, visualización, compartición y análisis de información asociada a las instalaciones superficiales en campos de producción de vapor geotérmico actualmente en operación y futuros. Como sustento, se describen de manera general las principales funciones de un SIG, las ventajas y desventajas de su implementación para la gestión de instalaciones superficiales en campos geotérmicos, y con base en la experiencia obtenida a través del desarrollo de proyectos relacionados con la operación de sistemas de transporte de vapor geotérmico en México, se discute brevemente la situación actual de la información existente en campo geotérmicos en operación. Finalmente se establecen las bases para el desarrollo de un modelo de datos básico adecuado a las características y situación actual de la información en los campos geotérmicos mexicanos.

2. Un SIG para instalaciones geotérmicas: capacidades, ventajas y desventajas

En un trabajo titulado *“Tablero de Situación. La Tecnología de los Sistemas de Información Geográfica en el Contexto de la Explotación Petrolera en la Región Marina Suroeste”*, presentado en el Congreso Mexicano del Petróleo (Hernández-Carrera et al., 2013), se menciona que la experiencia en la utilización de soluciones de Inteligencia de Negocios para el desarrollo de aplicaciones de soporte a la toma de decisiones en diversas organizaciones, indica que una problemática constante es que, en mayor o menor grado, *“la información no representa una herramienta eficaz para la toma de decisiones en los diferentes niveles de la organización”*. Dicha problemática se adjudica, entre otros factores, a la calidad (y formato) de los datos, la inadecuada estructuración de la información, el ineficiente flujo de información a través de las diversas áreas y la ausencia de una interfaz práctica para visualizar la información.

El uso de un sistema de información basado en SIG puede impactar de manera positiva en una organización ya que constituye un medio centralizado para el acceso rápido y fácil a información útil y valiosa de la empresa, para atender una o varias necesidades específicas. El empleo de un SIG contribuye a uniformizar la información que generan las distintas áreas y para facilitar su distribución entre ellas de una forma rápida y organizada, de tal modo que tengan acceso a la información requerida para soportar la toma de decisiones.

Un SIG puede implementarse como una herramienta de fácil utilización que a través de una interfaz gráfica, en forma de un mapa electrónico interactivo, permita acceder y analizar la información ya existente dentro de una organización. Su implementación adecuada puede auxiliar al personal operativo a evitar: a) pasar una mayor cantidad de tiempo recolectando y preparando información que analizándola, b) trabajar tiempo extra para procesar documentos o reportes, c) elaborar muchas presentaciones sin saber con exactitud los impactos reales que estas tienen en la organización, y d) “sentir frustración” al no poder encontrar la información que se requiere y que se está seguro de contar con ella (Hernández-Carrera et al., 2013).

En el caso del manejo de la infraestructura geotérmica, un SIG posibilita integrar dentro de un mismo entorno y marco geográfico los datos geométricos y alfanuméricos relacionados con las instalaciones geotérmicas superficiales como pozos, ductos, plataformas, obras o edificaciones asociadas, datos de producción, mantenimiento, etc., junto con su entorno geográfico y geológico, y permite visualizar los

datos y transformarlos en información a través de una interfaz gráfica representada en forma de un mapa.

Un SIG es una solución tecnológica que ofrece algunas capacidades únicas que actualmente no ofrecen otras herramientas utilizadas de manera extensiva en el ámbito geotérmico, en particular en la gestión de instalaciones superficiales (por ejemplo, AutoCAD). Entre dichas capacidades se pueden mencionar las siguientes:

- Análisis de datos espaciales. Las aplicaciones SIG normalmente cuentan con herramientas de *geoprocesamiento* que engloban a las funciones que permiten realizar tareas de análisis y gestión sobre distintos conjuntos de datos geográficos, como por ejemplo: superposiciones de capas, áreas de influencia (buffers), transformaciones de coordenadas, creación de topologías, obtención de curvas de nivel a partir de modelos digitales del terreno, etc.
- El análisis de los datos en un SIG requiere que la información sea íntegra y completa. Los paquetes SIG cuentan con avanzadas herramientas de *limpieza* que permiten verificar y corregir cualquier geometría o atributo inválido.
- Una aplicación SIG posibilita consultas avanzadas sobre la geometría y/o los datos alfanuméricos (atributos) almacenados en una o más bases de datos. Esto permite un análisis más profundo de la información para la toma de decisiones.
- Un SIG contempla la necesidad de trabajo en un entorno multiusuario, en el que prevalezca el acceso a la información *en tiempo real* (actual, confiable).

Aunado a las características mencionadas, la evolución de los SIG en los últimos años, ha permitido su alineamiento al mundo de las *Tecnologías de la Información* (TI). Actualmente los SIG cuentan con estándares, protocolos de comunicación abiertos, disponibilidad de servicios vía web y dispositivos móviles, etc., que posibilitan la correcta integración y gestión de datos, así como la captura y manejo de datos en campo. Entre algunos de los servicios que se considera pueden ser de gran utilización para un campo geotérmico se destacan:

- Publicación en un Servicio de Mapas. Estos servicios habilitan la visualización de datos y acceso a funcionalidades de análisis y consulta de servidores SIG a través de un portal en Internet o Intranet (o en la *nube*). Para este fin, es necesario desde un inicio crear entidades en formatos geoespaciales y almacenarlas en un repositorio de datos bajo un formato SIG. Los servicios pueden ser de fácil acceso, adecuados a las necesidades de los usuarios habituales y sin la necesidad de ser un experto en el manejo de software SIG para acceder a la información.
- SIG móviles. Se usan para la colección de datos en campo a través de dispositivos móviles (PDAs, teléfonos inteligentes, tabletas, etc.). La adopción generalizada de estos dispositivos de localización GPS integrados en el software SIG, permite utilizarlos para la captura y manejo de datos en campo en tiempo real.

No obstante las grandes ventajas que la tecnología SIG puede brindar en términos de capacidad, visualización e interacción con otras tecnologías para apoyar la gestión de la información concerniente a las instalaciones geotérmicas superficiales, decidir migrar a un sistema de información basado en SIG no es una tarea fácil ni sencilla; es más bien un proceso complejo que implica un cambio de paradigma y puede representar un esfuerzo muy grande en términos de tiempo y costo. Por tanto, se debe evaluar minuciosamente su utilidad en términos de costo-beneficio.

La decisión de adoptar nuevos esquemas de gestión de la información, o bien de conservar los esquemas actuales de creación, resguardo y compartición de información utilizando las metodologías tradicionales, estará siempre sujeta a las necesidades y visión estratégica de la empresa operadora del campo geotérmico.

3. Ejemplos de utilización de SIG en instalaciones geotérmicas superficiales

La realización de algunos proyectos previos relacionados con el modelado hidráulico, simulación de flujo y optimización de sistemas de producción y transporte de vapor en distintos campos geotérmicos en operación en México entre los años 2005-2013 (García-Gutiérrez et al., 2006; 2009a; 2009b; 2013) brindaron la oportunidad de obtener un panorama general sobre la magnitud del (enorme) volumen de información existente relacionada con la infraestructura geotérmica en campos mexicanos, así como la manera en que actualmente esta información se almacena y gestiona en cada uno de los campos.

Para cada uno de los proyectos referidos se integraron sendas bases de datos sobre los componentes principales de las redes de transporte de vapor que sirvieron para los objetivos particulares de cada estudio. Sin embargo, en dos de dichos proyectos, cuyo objetivo fue evaluar la eficiencia energética de los sistemas de producción y transporte de fluidos en los campos geotérmicos de Cerro Prieto y Los Humeros, respectivamente (García-Gutiérrez et al., 2009a; 2013), se incluyó el análisis e interpretación de las principales fuentes de pérdida de energía, así como una estimación cuantitativa de la pérdida de calor desde el interior de las tuberías que componen la red de vaporductos hacia el medio ambiente, en función de la condición o grado de daño que el aislamiento térmico de las tuberías guardaba al momento de la evaluación. Para ello fue necesario integrar inventarios detallados del estado del aislante térmico de los ductos para cada caso de estudio.

Dada la gran cantidad de datos a manejar, se propuso el empleo de un software SIG comercial con el fin de facilitar el manejo, despliegue y análisis de la información de cada inventario del aislamiento térmico, así como de las características de las tuberías (diámetro, tipo de aislamiento, etc.) y otros componentes asociados (válvulas) de las redes de ductos (Martínez-Estrella et al., 2010). La figura 1 muestra a modo de ejemplo un mapa correspondiente al estado del aislamiento térmico de las tuberías de la red de ductos de alta presión del campo geotérmico de Cerro Prieto (CGCP). Mapas similares, tanto para la condición del aislamiento térmico como para los diámetros de tubería, fueron creados para la red de baja presión del CGCP y la red de ductos del campo de Los Humeros (García-Gutiérrez et al. et al., 2013).

Estos mapas electrónicos no solo presentan los resultados del inventario como un simple dibujo estático, sino que constituyen diagramas dinámicos e interactivos, que permiten seleccionar y consultar los atributos de los elementos gráficos incluidos (Figura 2) solo mediante un click del mouse.

La decisión de implementar esta solución, permitió también ensayar con algunos conceptos y metodologías SIG, como el empleo del Sistema de Referenciación Lineal y la Segmentación Dinámica, para localizar componentes y eventos en elementos geográficos de naturaleza lineal como lo son los ductos. Esto es relevante ya que constituye un concepto básico para la implementación de un eventual modelo de datos para la infraestructura geotérmica superficial como se verá más adelante.

4. Información sobre infraestructura geotérmica: situación actual

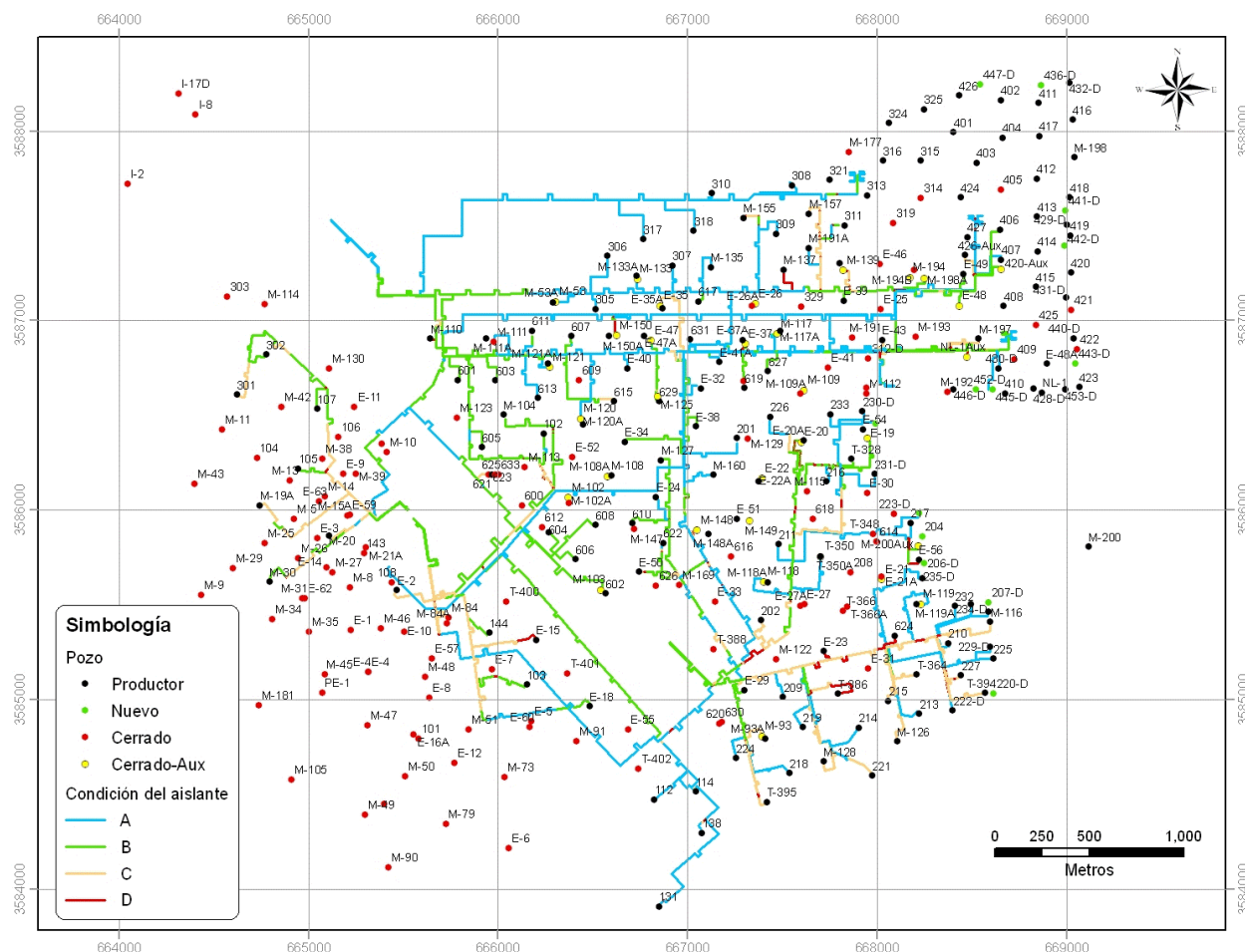


Figura 1. Mapa del estado del aislamiento térmico de la red de ductos de alta presión del campo de Cerro Prieto (2009) generado con una aplicación SIG comercial.

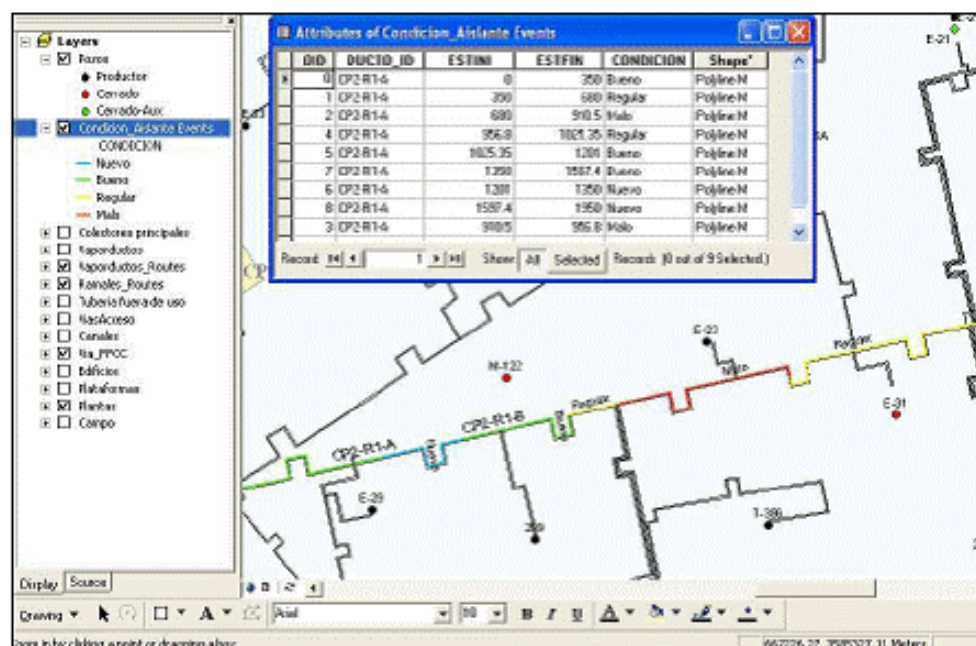


Figura 2. Ventana de atributos relacionados al estado del aislamiento en ductos del CGCP

A partir de la realización de los proyectos ya referidos sobre sistemas de producción y transporte de vapor en distintos campos geotérmicos, en los cuales fue necesario recabar y revisar un volumen considerable de información, se detectaron algunas problemáticas inherentes a la disponibilidad, precisión y actualidad de los datos requeridos entonces para cada uno de esos extensos estudios. A continuación se hace un breve resumen de dichas problemáticas y un análisis de la situación actual que guarda la información existente sobre las instalaciones superficiales en campos de producción de vapor geotérmico en México.

4.1 Almacenamiento y disponibilidad de la información

Al iniciar cualquier estudio de investigación o proyecto de ingeniería es común preguntarse dónde y cómo se encuentra toda la información que se requiere para llevar a cabo el trabajo encomendado. Durante la realización de proyectos como los que se han mencionado anteriormente es necesario reunir e integrar una gran cantidad de información de distintas características y proveniente de distintas fuentes o áreas del campo (Figura 3).



Figura 3. Información típica requerida para un estudio de modelado hidráulico de una red de ductos de vapor geotérmico.

Dado el gran volumen y la distinta naturaleza de la información requerida para proyectos como los referidos, la labor de búsqueda, localización e integración de la información típicamente absorbe entre el 50-70% del tiempo total del proyecto (García-Gutiérrez, comunicación personal). En algunos casos, una proporción importante de ese tiempo se destina únicamente a identificar dónde se encuentra exactamente determinada información.

En parte, ello se debe a que es muy común que esta información esté almacenada mayormente en forma de archivos personales aislados, o dentro de una colección de archivos con poca relación entre sí. En

otros casos, la información puede estar integrada en carpetas pertenecientes a un determinado proyecto, pero sin la identificación o clasificación debida. En el peor de los casos, no es posible encontrar parte de la información requerida.

Aunado a lo anterior, una vez que se logra reunir toda la información requerida, existe el inconveniente de que esta se encuentra disponible en varios formatos: gráficos, tablas, textos, dibujos, informes, etc., desde archivos electrónicos hasta papel. Adicionalmente, puede ser que una parte de esta información se encuentre incompleta, no actualizada, y con diferencias o imprecisiones con respecto a sus características o su localización actual en campo.

En el caso de los estudios citados, todo ello obligó a realizar algunos levantamientos en campo para obtener o actualizar la información, con la consecuente inversión extra de tiempo y esfuerzo, y sin garantizar del todo la precisión de los datos. No obstante que la naturaleza y el grado requerido de precisión de los estudios permitieron, por decirlo de algún modo, “tolerar” las deficiencias detectadas, esto podría no ser aceptable o posible para otros posibles proyectos o aplicaciones.

4.2 Formatos de la información

Tradicionalmente, se considera que la información relacionada con la infraestructura geotérmica (instalaciones superficiales) forma parte de un contexto más bien ingenieril, y es indudable que una proporción muy importante de la información gráfica relacionada con el diseño y construcción de la infraestructura geotérmica ha sido generada mediante programas de Diseño Asistido por Computadora (CAD, por sus siglas en inglés) como AutoCAD®, MicroStation®, etc.

El uso del CAD introdujo de forma exitosa los modelos virtuales a la ingeniería. Su mayor objetivo es representar, con base en la computación gráfica, los objetos con el mayor nivel de detalle y precisión como un conjunto de vectores (líneas, puntos y polígonos) organizados en diversas capas. Siendo originalmente utilizados para representación 2D, y más tarde para crear modelos 3D usando geometrías primitivas (cubos, cilindros, tubos, esferas, conos), el desarrollo del CAD ha dado paso en los últimos años a la creación de nuevas y potentes herramientas gráficas algunas de las cuales han sido aplicadas al modelado 3D en el diseño de instalaciones geotérmicas, como los describe Sinclair (2015).

Durante muchos años las herramientas CAD han sido una tecnología crítica para el diseño de las instalaciones geotérmicas, y se han realizado importantes inversiones tanto en datos (dibujos) como en aprendizaje del software. No obstante, este formato presenta algunas limitaciones:

- Tradicionalmente es un formato monousuario: solo puede ser empleado por un único usuario en un determinado tiempo, bloqueándolo para el resto de la organización. Este “comportamiento” puede inducir retrasos en la producción o, peor aún, generar datos duplicados o desactualizados.
- Los CAD difícilmente trabajan con entidades geométricas complejas como polígonos con islas, o puntos/polígonos múltiples.
- No cuentan con capacidad para la automatización de los estilos (creación directa de mapas temáticos) lo cual obliga a un tedioso trabajo manual de aplicación de estilo entidad a entidad,
- Las aplicaciones CAD solo permiten consultas básicas a nivel de geometría; si bien pueden en cierto modo vincular datos alfanuméricos a la geometría, ofrecen poca facilidad para la asociación de datos y la gestión de los atributos.

- Aunque cuentan con utilerías para manejar los contextos de referencia espacial y topología, sus capacidades para la visualización y manejo de conjuntos de datos complejos se encuentran muy lejos de las que ofrece, por ejemplo, un paquete SIG.
- Existe una gran diferencia en términos del volumen y la diversidad de información, así como en la naturaleza especializada de los métodos de análisis (geoprocesamiento), que puede manejar un SIG.

Aunque un SIG requiere de un buen nivel de computación gráfica, como la que todos los CAD ofrecen, el manejo de la información geográfica requiere una estructura distinta de la base de datos, mayor volumen de almacenamiento y tecnología de soporte lógico (software) que supera las capacidades funcionales gráficas procuradas por los CAD. Es claro que las soluciones CAD resultan más adecuadas y efectivas para aplicaciones de ingeniería exclusivamente.

Por otra parte, otro volumen importante de datos e información correspondiente a las instalaciones geotérmicas superficiales se encuentra almacenados en forma de tablas, ya sea como bases de datos personales o grupales (típicamente, en hojas de MS Excel), o bien dentro de sistemas de información departamentales o institucionales que almacenan y administran grandes volúmenes de datos en una forma estructurada y centralizada (p. ej. SumVapor, SIMAG), utilizando auténticos Sistemas Manejadores de Bases de Datos Relacionales (SMBDR).

Finalmente, como ya se comentó, todavía existe una cantidad de información relevante en papel. Aunque muchos documentos ya han sido digitalizados y se encuentran disponibles en formato PDF, se desconoce a ciencia cierta si se tiene implementado, a cualquier nivel, algún Sistema de Gestión de Documentos que gestione múltiples formatos de documento (imagen escaneada, archivos de texto, archivos de dibujo, diagramas de ingeniería, etc.) en forma organizada y transparente.

De manera general, se detectó que no se tiene provisto en la actualidad ningún sistema de almacenamiento centralizado de datos sobre la infraestructura superficial de los sistemas de producción y transporte de vapor en campos geotérmicos, y por lo tanto, con frecuencia resulta difícil saber dónde localizar, así como compartir los datos e información de los diferentes departamentos.

Cabe aclarar que lo anterior no tiene como propósito cuestionar o descalificar el valor, utilidad o calidad de la información histórica y actual generada en los campos, sino más bien busca establecer un marco de reflexión para evaluar la implementación de nuevas formas de mejorar los procesos de integración, almacenamiento, gestión y utilización de toda la información relacionada con los componentes físicos y datos de operación de un campo geotérmico en explotación, la cual representa sin duda un activo muy valioso. En pocas palabras, otorgar mayor valor y utilidad a la información.

El objetivo final es, ante todo, buscar una retroalimentación de los administradores y operadores del campo que permita establecer las bases para desarrollar un marco de referencia común para el almacenamiento y la gestión de información geotérmica aplicable a los distintos campos mexicanos, mediante una herramienta tecnológica actual y eficiente, como lo puede ser un SIG, que resulte útil a todas las áreas involucradas en la operación de un campo. El uso de un SIG no persigue desechar la información existente, ni las tecnologías usadas actualmente, sino más bien facilitar su integración a través de novedosos esquemas de trabajo.

5. Modelo de datos SIG para instalaciones geotérmicas superficiales

Un modelo de datos constituye un modelo de la realidad, el cual sintetiza ocurrencias e interacciones complejas entre entidades y las relaciones entre ellas. Representa la estructura de datos lógica que resulta de un proceso de diseño de base de datos.

Aunque el desarrollo de una aplicación SIG específica para instalaciones geotérmicas superficiales podría requerir de un modelo de datos riguroso para su óptimo funcionamiento y satisfacer las necesidades para las cuales ha sido concebida, existen elementos y datos comunes en todos los campos geotérmicos que hacen lógico establecer algunos elementos generales para un modelo básico de base de datos aplicable a todos los casos.

5.1 Base de Datos Geográfica

La esencia de un SIG está constituida por una base de datos geográfica (BDG). Esta es una colección de datos acerca de objetos localizados en una determinada área de interés en la superficie de la tierra, organizados en una forma tal que puede servir eficientemente a una o varias aplicaciones. Una BDG requiere de un conjunto de procedimientos que permitan hacer un mantenimiento de ella tanto desde el punto de vista de su documentación como de su administración. La eficiencia está determinada por los diferentes tipos de datos almacenados en diferentes estructuras.

En una BDG típica, los elementos gráficos se guardan en archivos y se manejan con el software SIG, mientras que los atributos no gráficos son guardados en tablas y manipulados por medio de un sistema manejador de bases de datos relacional (SMBDR). No obstante, hoy en día los modernos SMBDR (como Oracle, Postgre, MySql y MS-SQL) son capaces de almacenar tanto la información tabulada como la información geométrica y topológica necesaria cuando de datos geográficos se trata.

La integración de la información y el arreglo ordenado de la misma en una base de datos relacional constituye así un medio muy atractivo para contar con una alternativa de consulta y análisis visual en proyectos multidisciplinarios de una manera rápida y accesible. Por tanto, el modelo de datos común que se establezca deberá estar basado, inicialmente, en una estructura de tipo relacional.

5.2 Flujo de la información geotérmica

Con base en la metodología seguida por Hernández-Carrera et al. (2013), el flujo de información asociada a la utilización de los recursos geotérmicos, de acuerdo al tipo de operaciones y al proceso de negocio en campos geotérmicos mexicanos, podría agruparse de forma general bajo los siguientes rubros o *indicadores*:

- a) “Geo-Base”: Geología, Geofísica, Geoquímica, Ambiental, Manifestaciones, Geografía (poblados, cuerpos de agua, infraestructura, topografía, MDE, etc.).
- b) Subsuelo y Pozos: Litología, Yacimiento, Campo, Pozo.
- c) Producción de vapor: Pozos, Instalaciones en Plataformas.
- d) Obras estratégicas: Estructuras asociadas a la Producción, Ductos.
- e) Ductos: Recolección (subcolectores), Transporte (Colectores-Ramales), Inactivos.
- f) Instalaciones: Plataformas Satélites, Estaciones de separación, Centrales generadoras.
- g) Mantenimiento: preventivo, correctivo.
- h) Seguridad: Incidentes/Accidentes/Fugas (personal, industrial, logística, ambiental).

Los dos primeros puntos incluyen información relacionada fundamentalmente con las geociencias. En distintas organizaciones y en varios de los campos geotérmicos del país, existen actualmente algunas

bases de datos geotérmicas de tipo *geocientífico* implementadas principalmente como *shapefiles* en el software ArcGIS®. No obstante, dada su orientación más “exploratoria”, la escala, contenido y precisión actual, así como la *estructura* de la información incluida en estas bases de datos, puede que no sea la adecuada para integrarse o acoplarse directamente con aplicaciones más “ingenieriles”, como es el caso del sistema de producción y transporte de fluidos de un campo geotérmico (y viceversa).

Recientemente, algunos autores han dedicado esfuerzos para contribuir al establecimiento de una estructura de datos común para la información geotérmica de tipo geocientífico a nivel mundial, como Setijadji et al. (2005) y Einarsson y Hauksdóttir (2010). Estos autores proponen modelos preliminares de bases de datos geotérmicas con base en la investigación de varios proyectos establecidos de modelos de datos sobre geociencias, y ofrecen ejemplos prácticos de su implementación en campos geotérmicos de Indonesia e Islandia, respectivamente.

Aún cuando el presente trabajo está enfocado a los puntos subsecuentes del listado anterior, es decir, a la información relacionada con los componentes y eventos asociados a la infraestructura superficial geotérmica, la consulta de los trabajos arriba mencionados resultó de indudable utilidad, ya que en dichos modelos de datos se incluyen elementos geotérmicos fundamentales y comunes tanto al aspecto “geocientífico” como al “ingenieril”, por ejemplo los pozos.

5.3 Modelo conceptual de base de datos para la infraestructura geotérmica

Con el fin de establecer un modelo de datos básico para el manejo de información sobre la infraestructura superficial en campos geotérmicos, se realizó una búsqueda y revisión de modelos de datos utilizados en la industria petrolera que pudieran servir de base para identificar los componentes genéricos y comunes en ambas industrias, y después ir delineando una estructura básica para una base de datos funcional.

Uno de los componentes más conspicuos de la infraestructura geotérmica superficial en un campo geotérmico son sin duda, además de los pozos, los ductos que conducen el vapor desde los pozos hacia las plantas de generación. Por ello, resulta más que razonable considerar la adopción de alguno(s) de los modelos de datos diseñados para ductos petroleros y adecuarlo a los geotérmicos.

Entre algunos de estos modelos, se revisaron los siguientes: Public Petroleum Data Model (PPDM), Integrated Spatial Analysis Technology (ISAT), Pipeline Open Data Standard (PODS) y ESRI ArcGIS Pipeline Data Model (APDM). Mientras el primero se centra en la elaboración de normas para integrar bases de datos para la industria petrolera utilizando aplicaciones informáticas geográficas, los modelos ISAT, PODS y APDM, siguiendo conceptos similares, brindan una estructura de soporte básica para implementar bases de datos para ductos petroleros, ya sea dentro de un SMBDR (los dos primeros), o bien, como una *Geodatabase* con el programa ArcGIS de ESRI® (el último).

Los modelos de datos ISAT, PODS y APDM mencionados incluyen un conjunto estándar de objetos y atributos “centrales” o fundamentales para cualquier sistema de ductos y que manejen de manera efectiva el concepto de “cadenamiento” (*stationing*, en inglés), muy utilizado en ingeniería (ductos, carreteras, vías férreas, etc.) para fines de localización (Figura 4), además de un grupo básico de objetos conceptuales mediante los cuales la mayoría, si no es que todos, los componentes de un ducto pueden ser categorizados.

Dado que el propósito del presente trabajo es proponer la implementación de un sistema de información de infraestructura geotérmica basado en un SIG, y tomando en cuenta que tanto el

operador de los campos como otras instituciones relacionadas con la geotermia han desarrollado un cierto grado de conocimiento e incluso algunas bases de datos espaciales con el programa comercial ArcGIS®, el modelo de datos APDM podría perfilarse como un buen punto de partida para establecer un modelo de datos para instalaciones geotérmicas superficiales.

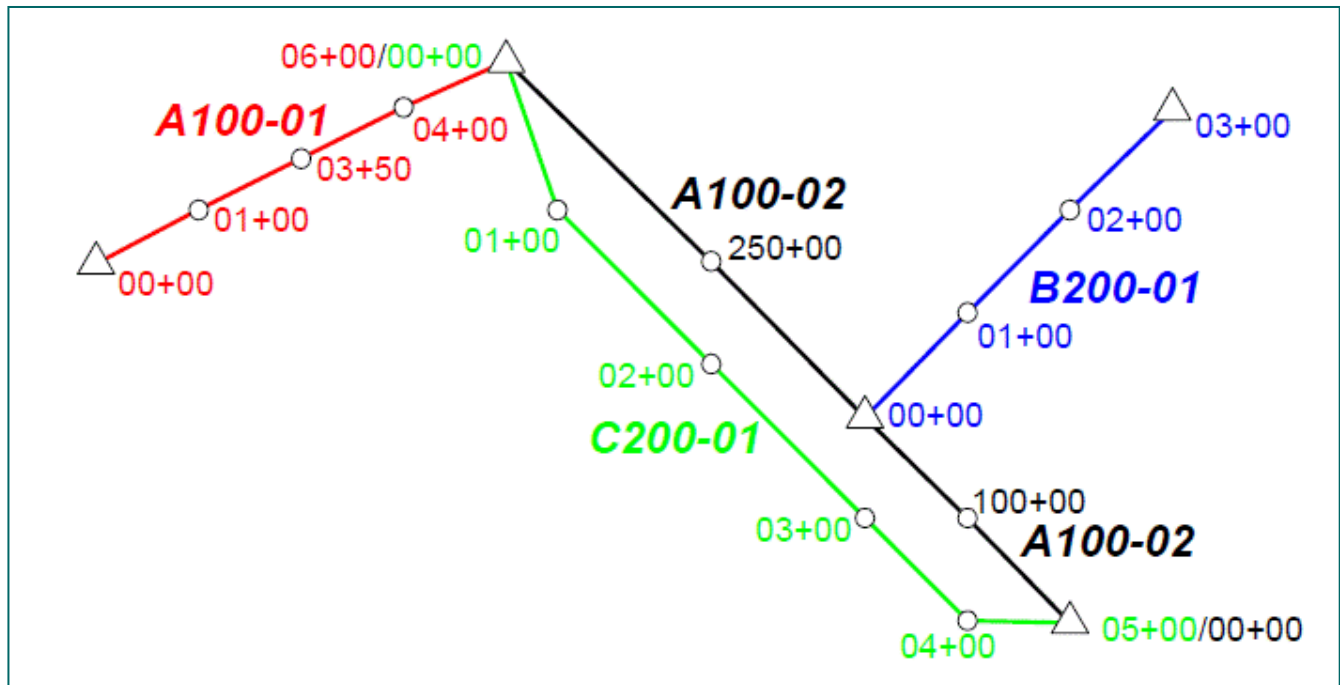


Figura 4. Línea central y “cadenamiento” o stationing (tomada de ESRI, 2010).

En el modelo APDM todos los elementos pueden organizarse dentro de tres categorías o clases:

- Clases abstractas: Son elementos necesarios del modelo; no representan objetos. Definen el marco del modelo de datos y heredan propiedades, relaciones y comportamientos al resto de las clases.
- Clases centrales: Las clases son concretas. A diferencia de las anteriores, aparecen físicamente en la *Geodatabase* de un modelo APDM implementado. Son todos los objetos (gráficos), características y relaciones, junto con sus restricciones (dominios) asociados, necesarios para mantener la consistencia del modelo. Definen a los elementos de la “línea central”, sus atributos y componentes que dan soporte al modelo de datos.

La “línea central” (*centerline*, en inglés) representa una línea digitalizada a través del centro de un elemento geográfico de naturaleza lineal como un ducto, una calle o un río, que a una escala suficientemente grande puede ser representado como un polígono.

- Clases opcionales o adicionales: se incluyen en el documento del modelo APDM como ejemplos de aplicación, aunque su inclusión no es estrictamente necesaria. Proporcionan una plantilla inicial para el desarrollo de aplicaciones específicas, en particular en aquellos casos donde aún no se cuenta con un modelo de datos establecido. Estas clases pueden o no estar directamente asociadas a la línea central (*in-line*, *off-line*).

El modelo agrupa a los elementos de estas clases de la siguiente manera: accesorios/instalaciones y operaciones puntuales (válvulas, codos, reducciones, anomalías, reparaciones, etc.); accesorios/instalaciones y operaciones lineales (segmento de tubería, recubrimientos, aislamientos);

estructuras, edificios, otros sitios; segmentos operacionales y bajo regulación; tablas genéricas (actividades); geo-base (entorno geográfico donde opera la red).

Es claro que muchos de los aspectos considerados en un modelo de datos para un sistema de ductos de transporte de hidrocarburos como el APDM son evidentemente aplicables a la infraestructura geotérmica. Este modelo, y otros de los ya mencionados, proveen una estructura básica y *estandarizada* para la integración con otras bases de datos y para el desarrollo de futuras aplicaciones relacionadas con la operación, así como con materias de importancia actual como la seguridad industrial y ambiental. La documentación del modelo APDM proporciona incluso algunos medios o plantillas para su implementación en una *Geodatabase* con el programa ArcGIS.

Es deseable entonces trabajar en una adecuación del modelo para adaptarlo y eventualmente implementarlo a una base de datos apropiada para el manejo de información sobre la infraestructura geotérmica. Un aspecto muy importante es que esta tarea pueda realizarse con la participación de personal familiarizado tanto con el diseño y operación de los sistemas de suministro y transporte de vapor, como con el conocimiento y manejo de software SIG y de los sistemas de información actualmente existentes en la organización que administra los campos geotérmicos, a fin de obtener un mejor resultado.

6. Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se propone la utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como una herramienta eficiente para integrar, almacenar, gestionar, compartir y visualizar dentro de una misma plataforma computacional y marco geográfico, todo el volumen de información inherente a la infraestructura superficial de un campo de producción de fluidos geotérmicos, con énfasis en el sistema de recolección y transporte de vapor desde los pozos hasta las plantas de generación.

Con base en algunos fundamentos y experiencias se han expuesto y analizado brevemente algunas de las principales razones, las ventajas y posibles desventajas, para considerar y llevar a cabo la implementación de un sistema de información basado en esta solución tecnológica, así como sus posibles impactos e implicaciones.

La utilización de un SIG promueve la homologación y organización eficiente de la información que generan las distintas áreas del campo para agilizar su compartición y facilitar su consulta, coadyuvando de esta forma a la toma de decisiones. Sin embargo, para lograr este objetivo es crítica la definición de las posibles aplicaciones que se desarrollarían alrededor de esta plataforma, con base en la detección de las problemáticas y necesidades actuales y futuras por parte del operador del campo.

Tomando en cuenta que el desarrollo de aplicaciones SIG específicas y efectivamente útiles puede requerir de un modelo de información riguroso, con base en el análisis efectuado y la experiencia obtenida con el desarrollo de proyectos relacionados con sistemas de recolección y transporte de vapor en campos geotérmicos mexicanos, se establece la necesidad de contar con un modelo de datos básico y común para la implementación de estos sistemas que sea aplicable a todos los campos del país.

Dada la similitud entre muchos de los componentes de las infraestructuras petrolera y geotérmica, se investigaron algunos modelos de bases de datos utilizados en la industria petrolera, en particular aquellos relacionados con sistemas de ductos de conducción de fluidos (petróleo y gas). Como resultado, se propone adoptar al modelo de datos ArcGIS Pipeline Data Model (APDM) de ESRI® como una referencia primaria para establecer un modelo de datos básico adecuado a las características

de las instalaciones geotérmicas superficiales de los campos mexicanos en operación, actuales y a futuro.

Finalmente, se expone la necesidad de contar con la colaboración de la comunidad geotérmica directamente involucrada en las actividades de diseño, operación y mantenimiento de las instalaciones superficiales en campos geotérmicos, así como en el desarrollo y administración de bases de datos geotérmicas (geográficas y no-geográficas), para que de manera conjunta se logre integrar una primera versión del modelo de datos geotérmico aquí referido.

Referencias

- Carranza, E.J.M., Wibowo, H., Barritt, S.D. and Sumintadireja, P., 2008. Spatial data analysis and integration for regional-scale geothermal potential mapping, West Java, Indonesia. *Geothermics* 37 (2008), 267–299.
- Einarsson, G.M., and Hauksdóttir, S., 2010. GeoInformation in Geothermal Development. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 25-29 April.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute), 2010. ArcGIS Pipeline Data Model Version 5.0.1 – Reference Guide, An ESRI Technical Paper, November 2010. http://apdm.net/wp-content/uploads/2013/10/20101103_APDM_V5_ReferenceGuide_Final.pdf
- ESRI (Environmental Systems Research Institute), 2014. ArcGIS Pipeline Data Model Version 6.0. <http://apdm.net/downloads/#APDM6>
- García, A., Martínez, J.I., Hernández, A.F., Ceceñas, M., Ovando, R., Salaices, E., Canchola, I., Mora, O., Gutiérrez, S., Miranda, C., Hernández, M. y López, S., 2006. Numerical simulation of the Cerro Prieto steam pipeline network. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 30, 19-23.
- García-Estrada, G.H., López-Hernández, A. y Quijano León, J.L., 2008. Selection of new drill sites using a Geographic Information System (GIS) at Los Azufres, Mexico. *Geotermia*, Vol. 21, No.2, pp. 43-76.
- García Gutiérrez, A., Martínez Estrella, J.I. y Ovando Castelar, R., 2009. Evaluación y optimización de la eficiencia del ciclo geotérmico del Campo Geotérmico de Cerro Prieto: Parte 1 - Sistema de producción y transporte de fluidos geotérmicos. *Informe Final, Clave IIE/11/13743/I 02/F/DC, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Mor.* Inédito.
- García-Gutierrez, A., Martínez-Estrella, J.I., Hernández-Ochoa, A.F., Verma, M.P., Mendoza-Covarrubias, A., and Ruiz-Lemus, A., 2009. Development of a hydraulic model and numerical simulation of the Los Azufres steam pipeline network. *Geothermics*, Vol. 38, 313–325.
- García-Gutierrez, Alfonso; Martinez-Estrella, Juan I.; Ovando-Castelar, Rosember; Vázquez-Sandoval, Abelardo; Rosales-López, César, 2013. Thermal Performance of the Los Humeros Geothermal Field Fluid Transportation Network. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 37.
- Hernández-Carrera, J.A., Torres-Ortiz, R., Soto-Alvarez, E., Cabadas-Ayluardo, L.E., Ortiz-Bautista, F., 2013. Tablero de Situación. La Tecnología de los Sistemas de Información Geográfica en el Contexto de la Explotación Petrolera en la Región Marina Suroeste. *Congreso Mexicano del Petróleo 2013*, Riviera Maya, 5-8 junio.
- ISAT (Integrated Spatial Analysis Technology), version 2.0 (2002). Pipeline Database Model, January 7, 2002 (actualmente PODS).

- Lara-Cuervo, J.G., 2006. Aplicación de métodos de Sistema de Información Geográfica al campo geotérmico Los Humeros y a la zona geotérmica de Las Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz. *Tesis licenciatura, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura-IPN*, México D.F., 364 p. Inédito.
- Martínez-Estrella, I., Torres, R.J. and Iglesias, E.R., 2005. A GIS-based information system for moderate- to low-temperature Mexican geothermal resources. *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turquía, Abril 24-29.
- Martínez Estrella, J.I., García Gutiérrez, A., Ovando Castelar, R., Gutiérrez Lara, C., Canchola Félix, I., Jacobo Galván, P., Miranda Herrera, C. y Mora Pérez, O., 2010. Uso de un Sistema de Información Geográfica para inventariar el estado físico del aislamiento térmico de la red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC. *Memorias del XVIII Congreso Anual de la Asociación Geotérmica Mexicana*, Morelia, Mich., octubre 15, 2010.
- Noorollahi, Y., Itoi, R., Fujii, H. and Tanaka, T., 2007. Geothermal resources exploration and wellsite selection with environmental consideration using GIS in Sabalan geothermal area, Iran. *Proceedings, 32th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, January 22-24, 2007.
- Olivar, R.E.R., 2007. Well Information query tool for Leyte geothermal production field, Philipines. *ESRI User Conference*, paper 1429.
- PODS (Pipeline Open Data Standard) version 6.0, 2013. <http://www.pods.org/4/PODS%20Model/>
- Prol-Ledesma, R.M., 2000. Evaluation of the reconnaissance results in geothermal exploration using GIS. *Geothermics*, Vol. 29, 83-103.
- Setijadji, L.D., Watanabe, K., Wahyuningsih, R. and Wintolo, D., 2005. Towards the Digital Data Model for Geothermal Databases: Technology Trends, Fundamental Concepts, Case Study of Java Island, and Preliminary Data Model. *Proceedings World Geothermal Congress 2005*. Antalya, Turkey, 24-29 April.
- Sinclair, R., 2015. Applications of 3D Modelling in Geothermal Facility Design. *Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015*. In Press.
- PPDM (The Professional Petroleum Data Management Association), 2015. Public Petroleum Data Model version 3.9, Table and Column definitions. <http://www.ppdm.org/>
- Yousefi, H., and Ehara, S., 2008. GIS integration method for geothermal power plant siting in Sabalan area, NW Iran. *Proceedings, 33th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, January 28-30.