

**SOFTWARE PARA LA CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA
DE UN YACIMIENTO PETROLERO**

**DIANA MARCELA PACHÓN CAÑAS
MILTON MAURICIO GALVÁN MORENO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA
2008**

**SOFTWARE PARA LA CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA
DE UN YACIMIENTO PETROLERO**

**DIANA MARCELA PACHÓN CAÑAS
MILTON MAURICIO GALVÁN MORENO**

Trabajo de grado presentado para optar al título de
Ingeniero de Sistemas

Director.

JULIO CÉSAR PÉREZ ANGÚLO
Profesor Escuela de Ingeniería de Petróleos

Codirector.

ALFONSO MENDOZA CASTELLANOS
Profesor Escuela de Ingeniería de Sistemas

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA
2008**

*Dedico este trabajo primeramente a Dios y al Señor Jesús, porque
me hicieron una nueva persona enseñándome a pensar en grande.*

*Con amor para mis padres Argemiro y Zully,
y mis hermanas Cindy y Vanessa: Si se puede!
Con mucho aprecio a mis líderes Wilson y Enith:*

*Ellos habitarán las ciudades asoladas
Con gran cariño para mi ministerio en la MCA,
han sido mi gran motivación e inspiración.*

Los amo a todos

MILTON MAURICIO

*Al Dios todo poderoso, al Señor Jesús quienes son la razón de mi vida,
A mis padres Jorge y Martha por su ayuda incondicional,
A mis hermanos Juan David y Jorge Andrés por ser una motivación para mi,
A mis líderes Wilson y Enith,
A todos mis amigos*

DIANA MARCELA

Agradecimientos

Dirigimos nuestros más sinceros agradecimientos a los directores de proyecto: Julio César Pérez Angulo y Alfonso Mendoza Castellanos. Gracias por su dirección, profesionalismo y paciencia en el desarrollo de esta gran idea.

Gracias al grupo de ingenieros del CIGP: Manuel Carbarcas, Diego Saray y Adriana Méndez. Sin su comprensión, seguimiento, y esfuerzo no se hubiese podido realizar este proyecto.

También queremos agradecer a las siguientes personas que de alguna u otra forma aportaron ideas y nuevos conceptos al proyecto: Ana Milena Montañez, Jorge Pérez, Cristian Jiménez y Fanor Díaz. Gracias por su apoyo.

A nuestros líderes Wilson y Enith en la MCI de Bucaramanga. Gracias por sus concejos y sus oraciones.

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|--------------------------------------------|-------------|
| GLOSARIO | 15 |
| INTRODUCCIÓN | 17 |
| 1. ASPECTOS GENERALES | 18 |
| 1.1 OBJETIVOS | 18 |
| 1.1.1 Objetivo general | 18 |
| 1.1.2 Objetivos específicos | 18 |
| 1.2 JUSTIFICACIÓN | 19 |
| 1.2.1 Definición del problema | 19 |
| 1.3 IMPACTO | 20 |
| 1.4 VIABILIDAD | 21 |
| 2. MARCO TEORICO | 22 |
| 2.1 YACIMIENTOS | 22 |
| 2.1.1 TIPOS DE YACIMIENTO | 22 |
| 2.2. PETRÓLEO | 24 |
| 2.2.1 Origen del Petróleo | 24 |
| 2.2.2 Crudo Pesado | 24 |
| 2.3 CARACTERIZACIÓN DE YACIMIENTOS | 25 |
| 2.3.1 Modelado de yacimientos | 25 |
| 2.3.2 Heterogeneidad y Anisotropía | 26 |
| 2.4 MODELO DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA | 27 |
| 2.4.1 Impedancia | 27 |
| 2.4.2 Fundamentos del AMIE | 28 |
| 2.4.3 Ley de Archie | 30 |
| 2.5 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA | 32 |
| 2.5.1 Datos Espaciales | 32 |
| 2.5.2 Algoritmo de búsqueda multicriterio. | 32 |
| 3. MARCO METODOLÓGICO | 32 |
| 3.1 MODELO DE DESARROLLO | 34 |
| 3.2 VALIDACIÓN DEL AMIE | 36 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN (BASES DE RECH) | 38 |
| 4.1. MODELAMIENTO GEOMETRICO IMPLEMENTADO | 38 |
| 4.1.1 Tipos de enmallados soportados por el simulador STARS | 39 |
| 4.1.2 Análisis de enmallados soportados por STARS | 45 |
| 4.1.3 Algoritmos implementados por STARS para generar una malla tipo *CORNER | 46 |
| 4.1.4 Análisis de los algoritmos N° 1 y N° 2 | 59 |
| 4.2 GENERADOR DEL YACIMIENTO | 60 |
| 4.3 ESTRUCTURA DE LA INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO | 62 |
| 4.4 REPOSITORIO DE EQUIVLENTES | 63 |
| 4.5 ANALISIS DEL SISTEMA | 64 |
| 5. TECNOLOGIAS USADAS EN RECH | 68 |
| 5.1 MODELO CLIENTE / SERVIDOR | 68 |
| 5.2 JAVA | 69 |
| 5.3 JAVA3D | 72 |
| 5.4 OPENGL | 72 |
| 5.5 BASES DE DATOS | 73 |
| 5.6 DATOS DE INTERES | 76 |
| 6. CASO DE ESTUDIO: TELLO | 78 |
| 6.1 CREACION DE UN PROYECTO (CARGA DE ARCHIVO) | 79 |
| 6.2 CONSISTENCIA DEL YACIMIENTO | 83 |
| 6.3 CARACTERIZACION DEL YACIMIENTO (APLICACIÓN DEL AMIE) | 86 |
| 6.4 PATRONES DE BUSQUEDA | 89 |
| 6.5 VISUALIZAR EL YACIMIENTO Y LOS RESULTADOS DEL AMIE | 93 |
| 7. BIBLIOGRAFIA | 101 |
| 7.1 SIMULACION DE YACIMIENTOS | 101 |
| 7.2 ARTICULOS | 101 |
| 7.3 TECNICOS | 102 |
| 7.4 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 102 |
| 7.5 SITIOS WEB | 102 |
| 8. ANEXOS | 105 |

| | |
|-------------------------------------------|-----|
| ANEXO A. MODELO ENTIDAD / RELACIÓN | 105 |
| ANEXO B. DICCIONARIO DE DATOS | 106 |
| ANEXO C. DIAGRAMAS DE CLASES | 112 |
| ANEXO D. INSTALACIÓN DE POSTGRES | 120 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Figura 1. Un yacimiento homogéneo y otro heterogéneo en su geometría. | 22 |
| Figura 2. Usos del petróleo en la humanidad. | 24 |
| Figura 3. Matriz de celdas que representan la geometría de un yacimiento en el espacio 3D. | 26 |
| Figura 4. Distribución de Impedancia de un yacimiento (Zonas rojas poseen impedancias bajas) | 29 |
| Figura 5. Proceso de caracterización eléctrica aplicando el AMIE | 30 |
| Figura 6. Capas de datos involucradas en un SIG | 32 |
| Figura 7. Algoritmo de búsqueda multicriterio usado en la selección de zonas óptimas. | 33 |
| Figura 8. Fases y flujos trabajo del RUP | 35 |
| Figura 9. Archivo de un yacimiento generado por STARS. | 38 |
| Figura 10. Enmallado tipo *CART soportado por el simulador STARS de dimensiones (2x3x4). | 39 |
| Figura 11. Enmallado tipo *VARI soportado por el simulador STARS de dimensiones (6x4x2). | 40 |
| Figura 12. Enmallado tipo *RADIAL soportado por el simulador STARS de dimensiones (1x7x3) | 42 |
| Figura 13. Orientación y contorno de las celdas usado por STARS. | 43 |
| Figura 14. Vista de planta y tridimensional de un enmallado tipo *CORNER. | 44 |
| Figura 15. Enmallado de puntos de esquina de (4x2x1). Enmallado tipo *CORNER soportado por el simulador STARS. | 45 |
| Figura 16. Generación de valores *COORD | 49 |
| Figura 17. Generación de valores *ZCORN. Malla generada usando el algoritmo N ^o 1. | 53 |
| Figura 18. Capa k=1 de un enmallado tipo *CORNER. | 53 |
| Figura 19. Capa k=2 de un enmallado tipo *CORNER. | 54 |
| Figura 20. Esqueleto de la malla (4x2x1). | 56 |
| Figura 21. Bloque de valores x de las partes superior e inferior de la capa k=1. | 56 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 22. Bloque de valores y de las partes superior e inferior de la capa $k=1$. | 57 |
| Figura 23. Bloque de valores z de las partes superior e inferior de la capa $k=1$. | 57 |
| Figura 24. Generación de valores *ZCORN. Malla generada usando el algoritmo $N^{\circ}2$. | 59 |
| Figura 25. Proceso de extracción, conversión y creación de una malla en el software | 60 |
| Figura 26. Diagrama de actividades para la extracción, conversión, creación y almacenamiento de una malla en la base de datos. | 61 |
| Figura 27. Esquema de los contenedores de la interfaz gráfica de usuario principal | 62 |
| Figura 28. Esquema de los contenedores de la interfaz gráfica de usuario del visualizador | 62 |
| Figura 29. Esquema relacional de la base de datos de la aplicación. | 63 |
| Figura 30. Diagrama de Casos de Uso de RECH. | 65 |
| Figura 31. Arquitectura Hardware de RECH. | 69 |
| Figura 32. Plataforma Java SE 5 implementada en RECH. | 70 |
| Figura 33. Aplicaciones desarrolladas en Java3D (Visualización de tejidos y científica). | 72 |
| Figura 34. Ventana principal de RECH | 78 |
| Figura 35. Barra de herramientas de RECH | 79 |
| Figura 36. Asistente para la carga de archivos y creación de un yacimiento de estudio. | 80 |
| Figura 37. Ventana de resultados del asistente para creación del proyecto. | 80 |
| Figura 38. Árbol del proyecto en RECH. Representa el contenido del yacimiento de forma jerárquica | 81 |
| Figura 39. Escritorio de RECH usado para mostrar información por malla, capas, zonas o equivalentes. | 82 |
| Figura 40. Ventana de propiedades petrofísicas del yacimiento. | 83 |
| Figura 41. Distribución de Saturación de Aceite inconsistente (desde el punto de vista de RECH). | 84 |
| Figura 42. Cuadro de diálogo para verificar la consistencia del yacimiento. | 85 |
| Figura 43. Ventana de Propiedades Petrofísicas después de promediar propiedades | 85 |
| Figura 44. Ventana de configuración de parámetros del AMIE y la Ley de Archie. | 86 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 45. Cuadro de diálogo para aplicar el AMIE al yacimiento usando los actuales parámetros del modelo. | 87 |
| Figura 46. Proceso de caracterización completado. | 87 |
| Figura 47. Equivalente Eléctrico agregado al nodo del MIE en el árbol del proyecto | 88 |
| Figura 48. Detalle del Equivalente Eléctrico calculado para el yacimiento | 88 |
| Figura 49. Botón para aplicar algoritmo de búsqueda multicriterio | 90 |
| Figura 50. Detalle del Equivalente Eléctrico calculado para el yacimiento. | 90 |
| Figura 51. Significado de las variables de entrada del algoritmo de búsqueda multicriterio | 91 |
| Figura 52. Detalle de una Zona Óptima en el equivalente calculado. | 92 |
| Figura 53. Botón para activar el módulo de visualización. | 93 |
| Figura 54. Ventana del módulo de visualización de RECH. | 94 |
| Figura 55. Distribución de porosidad de TELLO en la escala [0.0162271, 0.48358]. | 95 |
| Figura 56. Distribución de presión de TELLO en la escala [3343, 4175] psia. | 96 |
| Figura 57. Distribución de Impedancia del equivalente-1 de TELLO en la escala [0, 250] Ohmios/ULM. | 97 |
| Figura 58. Distribución de Impedancia del equivalente-1 de TELLO en la escala [0, 186] Ohmios/ULM. | 98 |
| Figura 59. Distribución de Impedancia de la zona-50, perteneciente al patrón de búsqueda patrón-1, del equivalente-1 de TELLO en la escala [2.3184, 242.3892] Ohmios/ULM. | 99 |
| Figura 60. Zona 50 vista en forma detallada | 100 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|------------------------------------------------------|-------------|
| Tabla 1. Datos (x, y, z) para generar líneas. | 48 |
| Tabla 2. Puntos de esquina por celda. | 50 |
| Tabla 3. Tiempos de respuesta | 64 |

GLOSARIO

- **Adyacente:** Propiedad que hace relación con los objetos que son vecinos a otros objetos. Este tipo de vecindad se da en las caras laterales, superior e inferior de una celda.
- **AMIE:** Algoritmo del Modelo de Impedancia Eléctrica.
- **Celda:** Abstracción que representa un bloque que tiene 8 puntos con el formato (x_c, y_c, z_c) , y que pertenece a una formación con algún un tipo de representación geométrica en el espacio tridimensional.
- **Colineales:** Puntos que se encuentran en la misma línea de acuerdo a un sistema de referencia espacial.
- **Formación:** Abstracción que representa un terreno tridimensional y que está formado por las zonas adyacentes superior e inferior y la zona productora.
- **Heterogéneo (a):** Característica inherente que representa que cualquier objeto posee propiedades que son diferente a cualquiera de sus objetos adyacentes.
- **Homogéneo (a):** Característica inherente que representa que cualquier objeto posee las mismas propiedades que sus objetos adyacentes.
- **Malla:** Abstracción que representa el esqueleto en el cual descansa la estructura de una formación. Es una rejilla con 3 grados de libertad (eje x , y y z) que almacena para cada celda sus propiedades térmicas, eléctricas, petrofísicas y su ubicación espacial.
- **ni:** Número de celdas especificadas en le dirección i (eje x).
- **nj:** Número de celdas especificadas en le dirección j (eje y).
- **nk:** Número de celdas especificadas en le dirección k (eje z).
- **STARS:** Simulador de procesos avanzados y aplicaciones térmicas para yacimientos del grupo CMG (Computer Modelling Group).
- ***CART:** Palabra clave utilizada por el simulador STARS para generar un enmallado cartesiano a una formación.

- ***COORD:** Palabra clave utilizada por el simulador STARS para generar un enmallado tipo CORNER creando pares (x, y) pertenecientes a cada línea vertical que atraviesa la malla. Estos pares (superior e inferior por cada línea) definen las líneas en las cuales se fijaran las esquinas de las celdas pertenecientes a la formación.
- ***CORNER:** Palabra clave utilizada por el simulador STARS para generar un enmallado en el cual cada celda de la formación en estudio posee 8 puntos con el formato (x, y, z) .
- ***CORNERS:** Palabra clave utilizada por el simulador STARS para generar un enmallado tipo CORNER en el cual se definen los 8 puntos de cada una de las celdas de la malla.
- ***DOWN:** Palabra clave utilizada por el simulador STARS para definir la orientación de las capas (eje z) en orden descendente.
- ***GRID:** Palabra clave utilizada por el simulador STARS para crear una malla. Esta palabra necesita de alguno de los siguientes tipos de enmallado: CART, VARI, RADIAL o CORNER.
- ***KDIR:** Palabra clave utilizada por el simulador STARS para definir la orientación de las capas de la formación de estudio. Puede tener los valores *UP (por defecto) o *DOWN.
- ***RADIAL:** Palabra clave utilizada por el simulador STARS para generar un enmallado cilíndrico-radial a una formación de estudio.
- ***UP:** Palabra clave utilizada por el simulador STARS para definir la orientación de las capas (eje z) en orden ascendente.
- ***VARI:** Palabra clave utilizada por el simulador STARS para generar un enmallado con profundidad variable/espesor variable a una formación.
- ***ZCORN:** Palabra clave utilizada por el simulador STARS para generar las profundidades z pertenecientes a cada bloque de una malla tipo CORNER. Estas profundidades pertenecen a cada una de las cuatro esquinas superiores e inferiores de cada celda de la formación.

RESUMEN

TITULO: SOFTWARE PARA LA CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE UN YACIMIENTO PETROLERO*.

AUTORES: DIANA MARCELA PACHÓN CAÑAS.**
MILTON MAURICIO GALVAN MORENO.**

PALABRAS CLAVES

CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA, IMPEDANCIA, RESISTIVIDAD EN DC, EQUIVALENTE ELÉCTRICO, YACIMIENTOS, POROSIDAD, SATURACIÓN DE AGUA, SATURACIÓN DE ACEITE, PRESIÓN, ROCA, STARS, CMG, ZONA ÓPTIMA.

DESCRIPCIÓN

Hoy en día ha salido a flote unas de las necesidades más grandes de la humanidad y que puede repercutir en el futuro del sector energético de las naciones: El agotamiento inminente del petróleo en la búsqueda de nuevas fuentes de energía. Las empresas petroleras, previendo esta situación, han puesto en marcha planes de exploración para encontrar nuevos campos de carácter productivo, ya que los campos que contienen petróleo liviano se están agotando y el petróleo pesado es difícil de extraer con los métodos convencionales de recobro mejorado.

El petróleo pesado se caracteriza por tener un alto grado de viscosidad en los volúmenes porosos de la roca. La extracción de este tipo de crudo requiere bajar el nivel de viscosidad del fluido usando el método de calentamiento eléctrico resistivo. Para poder aplicar este método se requiere conocer con exactitud cuales son las zonas con altos niveles de conductividad y saturaciones de aceite para obtener un alto grado de eficiencia en la aplicación del método.

El presente documento contiene el análisis, diseño y desarrollo del software RECH (Reservoir Electric Characterize) usado en la caracterización eléctrica de yacimientos de petróleo y selección de zonas óptimas bajo el algoritmo del modelo de impedancia eléctrica. Este algoritmo ha sido desarrollado bajo el liderazgo del Centro de Investigación del Gas y del Petróleo (CIGP).

* Proyecto de grado en la modalidad de investigación

** Facultad de ingenierías Físicomecánicas, Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática, Director: Ing. De Petróleos Julio Cesar Pérez Ángulo, Codirector, Ing de Sistemas Alfonso Mendoza Castellanos.

ABSTRACT

TITLE: SOFTWARE FOR THE ELECTRIC CHARACTERIZATION OF AN OIL RESERVOIR*

AUTHORS: DIANA MARCELA PACHÓN CAÑAS**
MILTON MAURICIO GALVAN MORENO**

KEYWORDS:

ELECTRIC CHARACTERIZATION, IMPEDANCE, RESISTIVITY DC, EQUIVALENT ELECTRIC, RESERVOIRS, POROSITY, WATER SATURATION, OIL SATURATION, PRESSURE, ROCK, STARS, CMG, GOOD AREA.

DESCRIPTION

Today in day it has left to it floats some of the humanity's bigger necessities and that it can rebound in the future of the energy sector of the nations: The imminent exhaustion of the petroleum in the search of new energy sources. The oil companies, foreseeing this situation, they have started to find new fields of productive character, since the fields that contain light petroleum are draining and the heavy petroleum is difficult to extract with the conventional methods of improved retrieval.

The heavy petroleum is characterized to have a high degree of viscosity in the porous volumes of the rock. The extraction of this type of raw requires to lower the level of viscosity of the fluid using the method of Resistivity Electric Heating. To be able to apply this method it is required to know with accuracy which are the areas with high levels of conductivity and saturations of oil to obtain a high degree of efficiency in the application of the method.

The present document contains the analysis, design and development of the RECH software (Reservoir Electric Characterize) used in the electric characterization of petroleum reservoirs and selection of good areas under the Impedance Electric Model Algorithm. This algorithm has been developed under the leadership of the Center of Investigation of the Gas and of the Petroleum (CIGP).

* Work of degree

** Faculty of Physical Mechanics Engineering's, Systems and Informatic Engineering, Ing. Julio Cesar Pérez Angulo

INTRODUCCIÓN

En la industria de los hidrocarburos los yacimientos de crudo proporcionan grandes cantidades de datos cuando se hacen mediciones en el campo, y a la hora de manipular y procesar todas estas fuentes de información se hace evidente tener la tecnología adecuada implementada en el software y el hardware. Para obtener grandes beneficios de los resultados de los procesos es indispensable tener una arquitectura sólida en cuanto al diseño del software y un diseño muy flexible en cuanto al rendimiento de los procesos.

Los yacimientos en el mundo real se caracterizan por ser formaciones con una geometría muy irregular, y el software para hidrocarburos emplea técnicas para recolección, administración, producción y explotación de las fuentes de información. Para modelar estos datos se usan algoritmos de enmallados, simulaciones de propiedades petrofísicas, control de producción, optimización, etc. La tecnología adecuada en estos procesos determina en gran proporción el éxito en la perforación de pozos petroleros.

El presente documento contiene información referente al diseño, desarrollo e implementación del software RECH (Caracterizador Eléctrico de Yacimientos de Petróleo bajo el Algoritmo del Modelo de Impedancia Eléctrica), presentando una descripción de cada uno de los componentes que conforman la aplicación, además de un soporte documental para consulta.

1. ASPECTOS GENERALES

En esta sección se presenta a conocimiento del lector las respectivas generalidades del proyecto:

1.1 OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo General

Desarrollar un software que interprete y decodifique los datos proporcionados por el software de simulación de yacimientos STARS, y el diseño y desarrollo de una base de datos para soportar el almacenamiento y procesamiento de los datos a la hora de caracterizar eléctricamente un yacimiento petrolero.

1.1.2 Objetivos Específicos

- ✚ Diseñar y desarrollar un algoritmo que permita el análisis, interpretación, y decodificación del conjunto de datos con enmallado tipo CORNER contenidos en archivos planos generados por el software de simulación de yacimientos STARS pertenecientes a la tecnología CMG.
- ✚ Diseñar e implementar un esquema de base de datos que permita administrar datos espaciales de yacimientos de petróleo provenientes del conjunto de datos del software STARS, y la generación de equivalentes eléctricos de las formaciones.
- ✚ Implementar el Algoritmo del Modelo de Impedancia Eléctrica (AMIE) propuesto por el Centro de Investigación del Gas y del Petróleo para caracterizar yacimientos eléctricamente.
- ✚ Implementar un algoritmo de búsqueda para escoger las zonas óptimas del yacimiento (zonas de baja impedancia y alta saturación de aceite).
- ✚ Desarrollar un prototipo de interfaz gráfica de usuario para administrar el análisis de archivos planos, cálculos de equivalentes eléctricos y análisis visual de los yacimientos.
- ✚ Evaluar los resultados arrojados por el Algoritmo del Modelo de Impedancia Eléctrica (AMIE) comparándolos con las distribuciones de las propiedades petrofísicas de la formación usando la ley de Archie, para establecer las relaciones de proporcionalidad entre las distribuciones.

1.2 JUSTIFICACIÓN

1.2.1 Definición de Problema

En el área de la simulación de yacimientos se han implementado métodos y modelos para discretizar formaciones con base en criterios desarrollados en el campo de la industria de los hidrocarburos. La caracterización de los yacimientos de petróleo permite comprender la naturaleza física de las formaciones.

La caracterización de yacimientos consiste en la integración de la información geofísica, petrofísica, geológica y de ingeniería, para generar un modelo de simulación del yacimiento con el fin de calcular reservas y crear un plan de desarrollo óptimo del campo¹.

Debido a la escasez de reservas de crudo de baja viscosidad actualmente en Colombia y el mundo, los científicos han volcado su atención a las reservas de crudo de alta viscosidad. La extracción de este tipo de crudo implica un alto costo a las petroleras, y los resultados en la implementación de métodos tradicionales como la inyección de agua, vapor o procesos químicos, son poco eficientes para este tipo de reservas. A causa de esto, la industria ha desarrollado métodos para disminuir la viscosidad del crudo y poder extraerlo con más facilidad. Uno de ellos es el calentamiento eléctrico resistivo, el cual consiste en hacer pasar corriente eléctrica en las zonas del yacimiento con mayor probabilidad de desplazamiento de electrones y así poder bajar el nivel de viscosidad del crudo. Para obtener un alto margen de confiabilidad, se deben conocer las zonas más aptas para la aplicación de este método, teniendo en cuenta los resultados de la caracterización eléctrica de la formación.

Esto da inicio a una investigación con el fin de construir un software que pueda caracterizar eléctricamente yacimientos de petróleo, es decir, calcular un equivalente eléctrico de la formación. Habiendo calculado la distribución de las propiedades eléctricas de la formación, se procede a escoger las zonas de menor impedancia eléctrica y alta saturación de aceite. Debido a que el conjunto de datos está contenido en archivos planos, y es proporcionado por el simulador de yacimientos STARS, se plantea el desarrollo de un software que decodifique estos archivos y realice un proceso de conversión al conjunto de datos y pueda enviarlos a una base de datos dedicada a información petrofísica y eléctrica.

¹ <http://www.aip.com.co/caracter.htm>

Luego se procede a caracterizar dicha formación aplicando el Algoritmo del Modelo de Impedancia Eléctrica (AMIE) propuesto por el CIGP, ya que STARS no tiene la utilidad para generar un equivalente eléctrico de un yacimiento de petróleo. Debido a que se está manejando información espacial, se hace necesario implementar en el esquema de la base de datos las técnicas usadas en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para reducir la redundancia, optimizar el almacenamiento y realizar análisis multicriterio. Además, el software debe permitir un análisis visual del conjunto de datos y de los resultados de la caracterización, proporcionando información valiosa en el contexto dado.

Este desarrollo nos proporciona una solución, bajo ciertas condiciones iniciales y de tolerancia, al problema de la *selección de zonas óptimas de un yacimiento petrolero aptas para la perforación*.

1.3 IMPACTO

Las empresas petroleras invierten mucho dinero en la exploración y sobre todo en la perforación de reservas de petróleo. A la hora de ubicar un lugar en la formación, se estudia la naturaleza física del yacimiento, y con base en modelos generados por tecnologías y criterios de los geólogos se puede asegurar, con cierta tolerancia, cuales son las zonas más productoras de la formación.

La caracterización eléctrica del un yacimiento petrolero nos proporciona un equivalente eléctrico de la formación, mostrándonos las zonas donde se tiene un nivel de impedancia muy bajo y que es apto para la inyección de corriente, debido a que el flujo de electrones puede desplazarse con menos dificultad que en otros sitios de la formación. Al calentar esa zona del yacimiento se reduce la viscosidad del crudo en cierto factor y puede ser más fácil extraerlo con los métodos convencionales de extracción de crudo.

El resultado de la investigación nos proporciona una solución al problema: ¿Cuáles son las zonas más adecuadas para perforar en el yacimiento bajo ciertas condiciones y niveles de tolerancia aceptables? Este es el epicentro de la investigación y los resultados pueden ser tratados y evaluados por expertos en el área, más no en los alcances del proyecto. Usaremos el conjunto de datos de 69690 celdas del campo petrolero Tello para aplicar la caracterización eléctrica. Los resultados de la caracterización eléctrica del yacimiento están sujetos a los expertos en Ingeniería Eléctrica, Petróleo y Geología, y como proyecto se desea proporcionar un prototipo software para apoyar este proceso, ya que en el mercado no existe una herramienta que proporcione esta funcionalidad deseada.

El desarrollo exitoso de la investigación traería beneficios para el país, puesto que se desarrollarán nuevas tecnologías, contribuyendo a la formación de personal investigador y creador de nuevas soluciones que permitan un mayor desarrollo científico y un gran aporte al sector energético de la nación.

1.4 VIABILIDAD

- ✚ Para desarrollar el software contamos con la infraestructura hardware necesaria para llevar a cabo el proceso de cálculo intensivo. Esta aplicación se caracteriza por su alto grado de consumo de procesador, memoria RAM y capacidades de video considerables.
- ✚ Se realizó un estudio previo en cuanto al software que cumpliera con los requisitos necesarios para desarrollar el proyecto. El software seleccionado es exigente, puesto que los procesos llevados a cabo por las empresas petroleras son llevados a cabo en ambientes heterogéneos.
- ✚ Se cuenta con un equipo de ingenieros de petróleo y electricistas para ser asesorados en los temas relevantes en el proyecto: Caracterización y Simulación de yacimientos, Caracterización Eléctrica, Visualización multicriterio.
- ✚ Se cuenta con el software STARS de CMG que nos proporciona los datos iniciales y su respectiva documentación, adicionalmente bibliografía en aspectos técnicos: Artículos de proyectos desarrollados en otros países, modelamiento espacial, codificación avanzada, técnicas de desarrollo de software e interoperabilidad.

2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se describirán los conceptos relacionados con los yacimientos, petróleo, crudo pesado, procesos de caracterización, el Modelo de Impedancia Eléctrica, la Ley de Archie y sistemas de información geográficos, para familiarizar al lector con los términos consignados en este libro.

2.1 YACIMIENTOS

Es toda roca en la cual se encuentran acumulados hidrocarburos y se comporta como una unidad independiente en cuanto a mecanismos de producción, propiedades petrofísicas y propiedades de los fluidos². Un yacimiento petrolero normalmente contiene tres fluidos (aceite, gas y agua) que se separan en secciones distintas debido a sus gravedades variantes. El gas siendo el más ligero ocupa la parte superior del yacimiento, el aceite la parte intermedia y el agua la parte inferior. La figura 1 nos muestra dos tipos de yacimientos representando sus límites espaciales (homogéneo y heterogéneo).

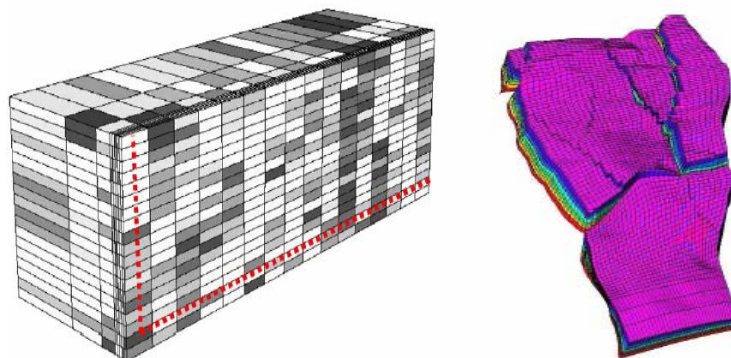


Figura 1. Un yacimiento homogéneo y otro heterogéneo en su geometría.

2.1.1 Tipos de yacimientos

Existen diversos procesos naturales cuyo resultado es la concentración de ciertos minerales en determinados lugares.

²

http://www.ingeminas.gov.co/option,com_glossary/func,display/letter,Y/Itemid,155/catid,82/page,1.htm

Así por ejemplo, la disolución de sales por el agua y su posterior concentración en salares, genera yacimientos de dichas sales. Estas sales no podrían ser explotadas en las rocas que les dieron origen, pues en ellas la concentración del mineral es tan baja que resulta imposible que su extracción sea rentable.

En otros casos, los fluidos calientes que escapan de las cámaras magmáticas arrastran numerosos compuestos. Luego precipitan en zonas donde la temperatura y la presión son favorables para ello. Los yacimientos así originados reciben el nombre de **hidrotermales**.

El carbón, algunos depósitos de óxidos de hierro y otros metales, se formaron por acumulación de los minerales en una cuenca sedimentaria, por lo que constituyen **depósitos sedimentarios**.

Algunos minerales, como el oro o los diamantes, por su gran resistencia (química en el primer caso y física en el segundo) pueden concentrarse en el lecho de los ríos y en las terrazas aluviales, constituyendo **placeres**, un tipo especial de depósitos sedimentarios.

En casi todos los tipos de rocas, sedimentarias, ígneas y metamórficas, podemos encontrar yacimientos minerales. A veces el mineral aparece en forma de **vetas** o **venas**, otras como pequeños granos dispersos en la roca. El granate, usado en joyería, aparece a veces como cristales en esta última forma. La galena (mineral de plomo) y la blenda (mineral de zinc) suelen aparecer asociadas a venas de cuarzo.

El hombre explota los minerales para extraer de ellos los metales pero también algunas rocas (formadas por uno o varios minerales) son utilizadas como materia prima para la industria (como las calizas) y también como materiales de construcción y de ornamentación (como los mármoles).

Si la explotación de un yacimiento tiene lugar en base a la perforación de galerías subterráneas, se dice que dicho yacimiento es una **mina**. En cambio, si el yacimiento se explota a cielo abierto, se dice de este que es una **cantera**. Según sean las dimensiones de la mina o de la cantera, para su explotación puede ser necesario recurrir a una tecnología muy sofisticada. Ambos tipos de explotación requieren adoptar medidas para la protección del medio ambiente que son establecidas por los entes reguladores del país donde se lleve a cabo la explotación de la mina o cantera³.

³ <http://157.92.29.203/aula-gea/recuyaci.html>

2.2 PETRÓLEO

2.2.1 Origen del Petróleo

El petróleo se origina de una materia prima formada principalmente por detritos de organismos vivos acuáticos, vegetales y animales, que vivían en los mares, las lagunas o las desembocaduras de los ríos, o en las cercanías del mar. Se encuentra únicamente en los medios de origen sedimentario. La materia orgánica se deposita y se va cubriendo por sedimentos; al quedar cada vez a mayor profundidad, se transforma en hidrocarburos, proceso que, según las recientes teorías, es una degradación producida por bacterias aerobias primero y anaerobias después. Estas reacciones desprenden oxígeno, nitrógeno y azufre, que forman parte de los compuestos volátiles de los hidrocarburos. Los lugares donde hay petróleo están, por lo general, situados a bastante distancia de las zonas de consumo. Los oleoductos son muy numerosos y el tráfico marítimo muy denso. Las tres zonas con mayor producción mundial son Oriente Medio, la antigua URSS y EE.UU., que producen el 70% del crudo en el mundo⁴.

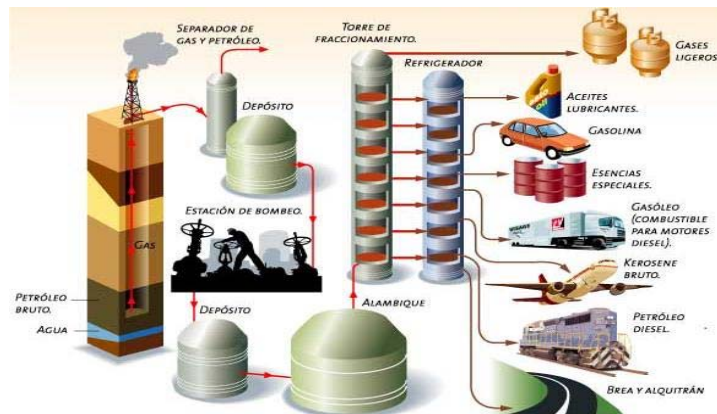


Figura 2. Usos del petróleo en la humanidad.

2.2.2 Crudo Pesado

Los crudos pesados se constituyen en la fuente de hidrocarburos llamada a jugar el papel más importante en el suministro nacional y mundial de petróleo a medida que las reservas de crudo liviano se van extinguiendo. Las reservas de crudo pesado se encuentran tanto en yacimientos convencionales, similares a los de crudo liviano, como en arenas bituminosas, siendo estas últimas de gran potencial petrolífero.

⁴ <http://lima.spe.org/images/UNILima/articles/51/EIPetr%F3leo.pdf>

El crudo pesado es una mezcla de hidrocarburos con características muy particulares como alta viscosidad y baja gravedad API⁵, su apariencia puede ser líquida o semisólida y pueden presentar un alto contenido de elementos tales como Azufre, Vanadio, Níquel y Molibdeno, entre otros. La gravedad API de este tipo de crudos puede variar entre 8° y 20°; en las arenas bituminosas la gravedad API generalmente es menor a 10°. La viscosidad en los crudos pesados varía entre 100 y 10,000 cP⁶ a temperatura de yacimiento; en las arenas bituminosas la viscosidad del crudo es generalmente mayor a 10,000 cP.

La mayoría de yacimientos de crudo pesado se encuentran a profundidades inferiores a 3000 pies y se caracterizan por ser areniscas del Terciario, con altas porosidades (alrededor del 30%), altas permeabilidades y saturaciones de aceite altas (50-80%). También se encuentran algunos yacimientos de crudo pesado en formaciones del Cretáceo tardío.

2.3 CARACTERIZACIÓN DE YACIMIENTOS

2.3.1 Modelado de yacimientos

El modelado de un yacimiento es el paso final en el proceso de la caracterización de yacimientos, el cual consiste en la construcción de modelos geológicos múltiples de alta resolución, el escalamiento y la realización de las simulaciones del flujo.

El modelo geológico de alta resolución representa la integración de datos multidisciplinarios. Los horizontes sísmicos convertidos a profundidad y los datos estratigráficos son usados para construir la arquitectura del yacimiento.

Dentro de este marco de trabajo son simuladas tanto la geometría como las fases de los ambientes de depósito; los atributos sísmicos son usados a menudo durante este paso. A continuación las propiedades petrofísicas (porosidad, permeabilidad y saturación de agua), son distribuidas dentro de las fases apropiadas. Con frecuencia los atributos sísmicos pueden ser usados para auxiliar en la interpolación de estas propiedades entre los pozos. Los modelos de alta resolución pueden contener decenas de millones de celdas en la malla, requiriendo un escalamiento previo a la simulación del flujo.

⁵ American Petroleum Institut

⁶ centiPoise, unidad de viscosidad. http://es.wikipedia.org/wiki/Unidades_de_viscosidad

2.3.2 Heterogeneidad y Anisotropía

La caracterización es la técnica para modelar la naturaleza física de un yacimiento, donde se aprecian ciertos fenómenos muy particulares relacionados con su composición. En un principio, y como características fundamentales del yacimiento, se pueden mencionar la heterogeneidad y la anisotropía en sus propiedades.

La heterogeneidad está relacionada con la variación de las propiedades físicas según la ubicación espacial de la medición de los parámetros de interés, es decir, las propiedades del yacimiento son diferentes para cada punto dentro de este. Por otro lado, la anisotropía se relaciona con la variación de las propiedades físicas de acuerdo a la dirección de medición de los parámetros de interés en el yacimiento⁷.

La heterogeneidad puede modelarse considerando el yacimiento como una matriz formada por muchas celdas heterogéneas en sus propiedades. Para construir esta matriz es necesario conocer las propiedades de las celdas que la conforman; estas propiedades se toman de las celdas del modelo del yacimiento suministrado por el software STARS así mismo la información más detallada de la roca como la composición mineralógica, forma, tamaño y orientación de los granos es tomada del estudio petrográfico del yacimiento; finalmente la información de las propiedades del agua y el aceite se toma del estudio de fluidos del yacimiento. Con esta información es posible calcular el equivalente eléctrico de cada celda, teniendo en cuenta que el grado de exactitud del modelo depende de la calidad y detalle de la información obtenida.

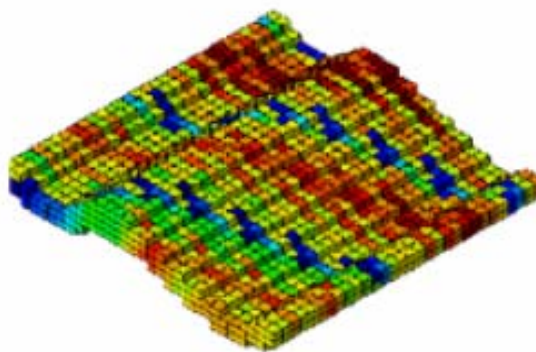


Figura 3. Matriz de celdas que representan la geometría de un yacimiento en el espacio 3D.

⁷ *Calentamiento Electromagnético en Fondo de Pozo para el Aumento del Factor de Recobro en los Campos Tello y La Hocha* (Informe CER-MI-01 Mayo de 2006) CIGP – UIS.

2.4 MODELO DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA

El equivalente eléctrico de la roca del yacimiento es calculado a partir de las ecuaciones más generales de la teoría electromagnética, hasta llegar a las ecuaciones específicas que describen el comportamiento de la roca. La integración de estas ecuaciones permitirá calcular la Impedancia Eléctrica Equivalente de la roca del yacimiento.

El objetivo principal del proyecto es seleccionar las zonas del yacimiento aptas para la perforación, con base en el estudio de las variables eléctricas calculadas a partir del Modelo de Impedancia Eléctrica, dejando un camino apto para la aplicación del calentamiento eléctrico resistivo.

2.4.1 Impedancia

La impedancia es la oposición que presenta un material al paso de la corriente alterna. Es un valor vectorial compuesto en su parte real por un valor de resistencia y en su parte imaginaria por un valor de reactancia y se calcula de la siguiente manera:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Donde:

Z = Impedancia medida en ohmios (Ω)

R = Resistencia medida en ohmios (Ω)

X = Reactancia total medida en ohmios (Ω)

$$\arg Z = \arctg \frac{2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C}}{R}$$

El valor complejo de la impedancia se puede representar también como:

$$Z = R + jX$$

Donde j se utiliza para denotar un valor imaginario. El valor de resistencia es constante, sin tomar en cuenta los efectos de temperatura y otros factores mientras que los valores de reactancia son una función de la frecuencia.

2.4.2 Fundamentos del AMIE

El modelo está fundamentado en dos principios: La conductividad eléctrica y la polarización inducida. El primero esta basado en el comportamiento eléctrico de un sólido y las ecuaciones fundamentales del electromagnetismo y el segundo es uno de los fenómenos que ocurren en la roca del yacimiento.

La conductividad eléctrica σ es la capacidad de un medio o espacio físico de permitir el paso de la corriente eléctrica a través de él. También es definida como la propiedad natural característica de cada cuerpo que representa la facilidad con la que los electrones pueden pasar por él⁸. Está dada en *siemens/m*, donde ρ es la resistividad. Es la proporcionalidad entre el campo eléctrico \vec{E} y la densidad de corriente de conducción \vec{J} :

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \qquad J_{con} = \sigma * E.$$

La roca del yacimiento presenta ciertos fenómenos que la diferencian de un material tradicional; estos fenómenos son: la dependencia de la frecuencia, dispersión dieléctrica, polarización inducida, y transporte de cargas. El Modelo de Impedancia Eléctrica calcula el valor de la impedancia, con base en la ley de Ohm, a partir del valor de tensión y de corriente (transformando la ecuación de la conductividad)⁹:

$$V = Z * I.$$

Donde Z es la impedancia eléctrica.

El modelo expresa esta ecuación en función de la permitividad efectiva ϵ_{ef} y la conductividad efectiva σ_{ef} compleja, que a su vez están expresadas en función de la frecuencia:

$$I = \left(\sigma_{ef} - i\omega\epsilon_{ef} \right) * \frac{A}{L} * V.$$

Donde la permitividad y la conductividad efectiva se definen como:

⁸ http://es.wikipedia.org/wiki/Conductividad_el

⁹ *Calentamiento Electromagnético en Fondo de Pozo para el Aumento del Factor de Recobro en los Campos Tello y La Hocha* (Informe CER-MI-01 Mayo de 2006) CIGP – UIS.

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon' - \frac{\sigma''}{\omega} \qquad \sigma_{ef} = \sigma' + \omega\varepsilon''$$

A es el área de la sección transversal, **V** la diferencia de potencial aplicada a la roca, **L** la longitud de esta, **I** la corriente eléctrica y ω la frecuencia angular. El cálculo de la conductivita y permitividad efectiva se hace basándose en los fenómenos que ocurren en la roca del yacimiento. Ahora reemplazamos esta ecuación en la ley de Ohm y queda la impedancia eléctrica expresada como:

$$Z = (\sigma_{ef} - i\omega\varepsilon_{ef})^{-1} * \frac{L}{A}$$

Esta ecuación es aplicada a cada celda del yacimiento permitiendo tener el equivalente eléctrico de toda la formación. STARS proporciona los archivos planos que contienen la geometría y propiedades petrofísicas del yacimiento: distribuciones de porosidad, presión, y saturaciones de agua y aceite.

A través de la aplicación del Algoritmo del Modelo de Impedancia Eléctrica se obtiene como resultado los valores de impedancia y la resistividad en corriente continúa dadas por celda. La siguiente figura nos muestra un mapa de impedancia de una formación, en donde las zonas rojas poseen valores de impedancia muy bajos.

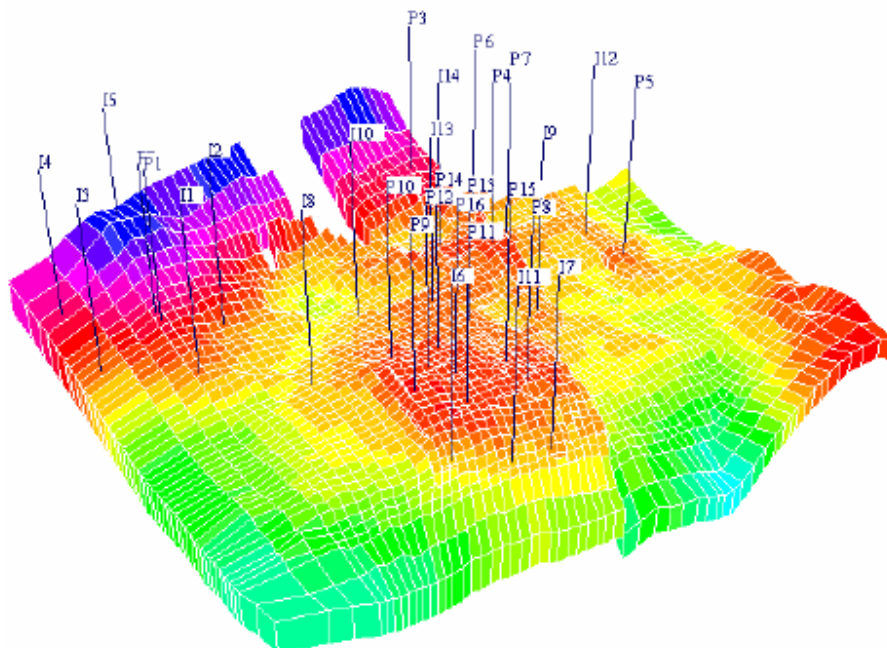


Figura 4. Distribución de Impedancia de un yacimiento (Zonas rojas poseen impedancias bajas).

La siguiente figura conceptualiza la aplicación del Algoritmo del Modelo de Impedancia Eléctrica aplicado a cada celda de la formación. Una formación puede tener desde unos cientos hasta millones de celdas, dependiendo del modelo geológico generado en el campo:

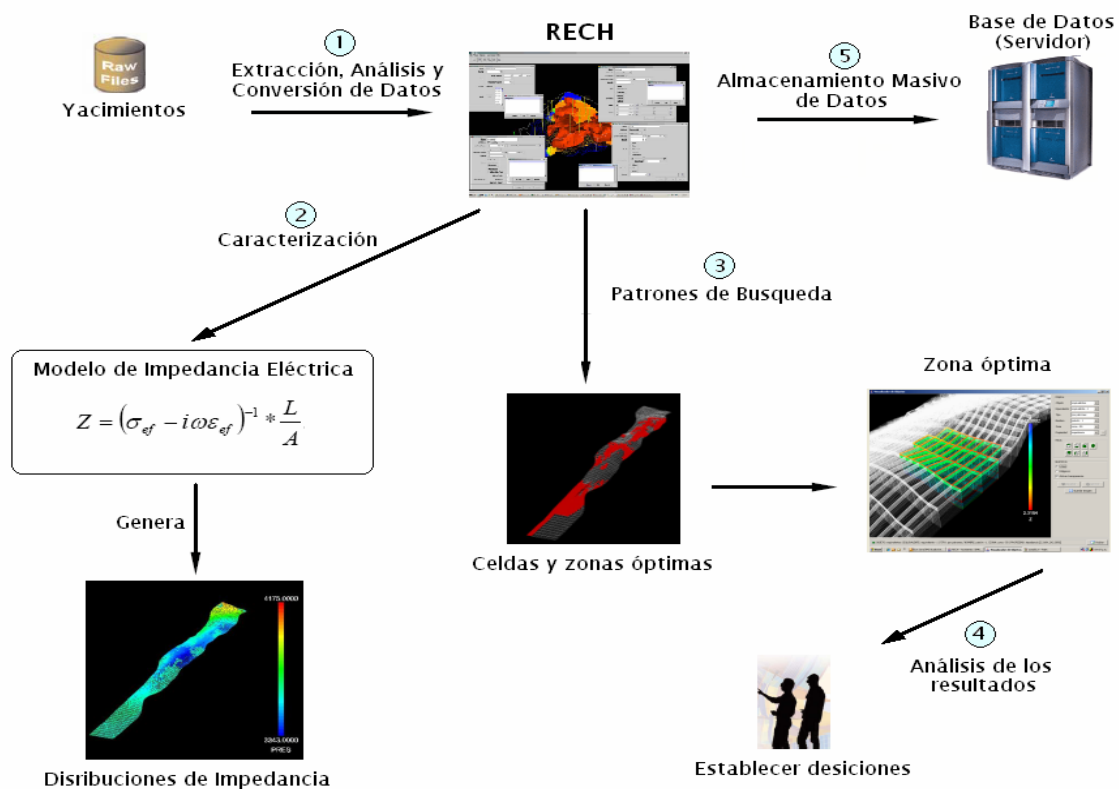


Figura 5. Proceso de caracterización eléctrica aplicando el AMIE.

En el cálculo del equivalente eléctrico para la roca de un yacimiento petrolero es fundamental contar con la mayor información posible de la formación de interés, ya que de esto dependerá la veracidad y exactitud del equivalente. Por lo tanto la investigación se centra en el cálculo de equivalentes eléctricos y selección de zonas del yacimiento, dejando un camino abierto para más adelante poder implementar la técnica de calentamiento eléctrico resistivo a dichas zonas.

2.4.3 Ley de Archie

Una relación llamada la ley de Archie describe como la resistividad eléctrica de la roca, la porosidad y la resistividad del fluido dependen entre sí.

En el cálculo de la resistividad DC de la roca porosa saturada se utiliza la ley de Archie, donde se expresa la resistividad como una función de la saturación de agua S_w y la porosidad de la roca ϕ , la resistividad del agua en DC ρ_w y los coeficientes experimentales a , m y n que son característicos de cada yacimiento.

$$\rho_{dc} = \left(\frac{a \cdot \rho_w}{\phi^m \cdot S_w^n} \right)$$

S_w = porción de los espacios porosos llenados con agua u otro tipo de fluido

$n \approx 2$

a : constante con $0,6 < a < 2,5$

m : constante con $1,3 < m < 2,5$.

La ley de Archie establece las siguientes proporcionalidades (que se tuvieron en cuenta para validar los resultados del AMIE):

- ✚ La resistividad en DC de la roca es inversamente proporcional a la porosidad de la misma.
- ✚ La resistividad en DC de la roca es inversamente proporcional a la saturación de agua de la misma

Todos los métodos eléctricos sensibles para la resistividad y empleados en la superficie detectan la resistividad eléctrica total de un volumen de roca situada en cierta profundidad (in situ).

Los valores de resistividad eléctrica obtenidos de esta manera reflejan la combinación de los efectos de todos los mecanismos conductivos. El rango de resistividad eléctrica de las rocas es amplio y se extiende desde 10^{-2} hasta $10^8 \Omega m$ y mayor¹⁰. Para las rocas y minerales son:

- ✚ Conductores buenos con $r < 1,0 \Omega m$
- ✚ Conductores intermedios con $r = 1 - 100 \Omega m$
- ✚ Conductores pobres con $r > 100 \Omega m$.

¹⁰ <http://plata.uda.cl/minas/apuntes/Geologia/EXPLORAC/TEXT/070elect.htm>

2.5 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

Un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS, en su acrónimo inglés) es un sistema integrado compuesto por hardware, software, personal, información espacial y procedimientos computarizados, que permite y facilita la recolección, el análisis, gestión o representación de datos espaciales¹¹.

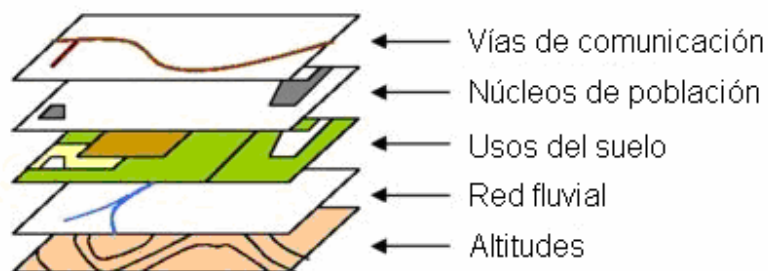


Figura 6. Capas de datos involucradas en un SIG.

El SIG separa la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, facilitando al profesional la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos, con el fin de generar otra nueva que no podríamos obtener de otra forma.

2.5.1 Datos Espaciales

Un dato espacial se define como el dato que se puede ubicar en el espacio, sea con referencia a un sistema de coordenadas o a un orden topológico. El conjunto de datos espaciales y no espaciales, y los atributos de los datos constituyen un conjunto de datos que conceptualiza y almacena el estado de un objeto espacial. Para modelar digitalmente las entidades del mundo real se utilizan tres objetos espaciales: el punto, la línea y el polígono. Estos atributos representan la naturaleza geométrica del yacimiento.

2.5.2 Algoritmo de Búsqueda Multicriterio

En la búsqueda de las zonas se utiliza un algoritmo de búsqueda optimizado para este proceso. Este algoritmo es una modificación al método de búsqueda de los K-VECINOS para seleccionar las zonas óptimas del yacimiento.

¹¹ <http://es.wikipedia.org/wiki/Sig>

Utiliza una búsqueda bidimensional en el plano XY basándose en los centroides de cada entidad espacial (en este caso los límites de las celdas del yacimiento) y comparando distancias entre puntos. Adicionalmente la combinación de valores de impedancia bajos y saturaciones de aceite altos determinan las celdas con buena conductividad y con alto porcentaje de crudo. La siguiente figura muestra claramente las condiciones necesarias para aplicar el algoritmo de búsqueda a un yacimiento:

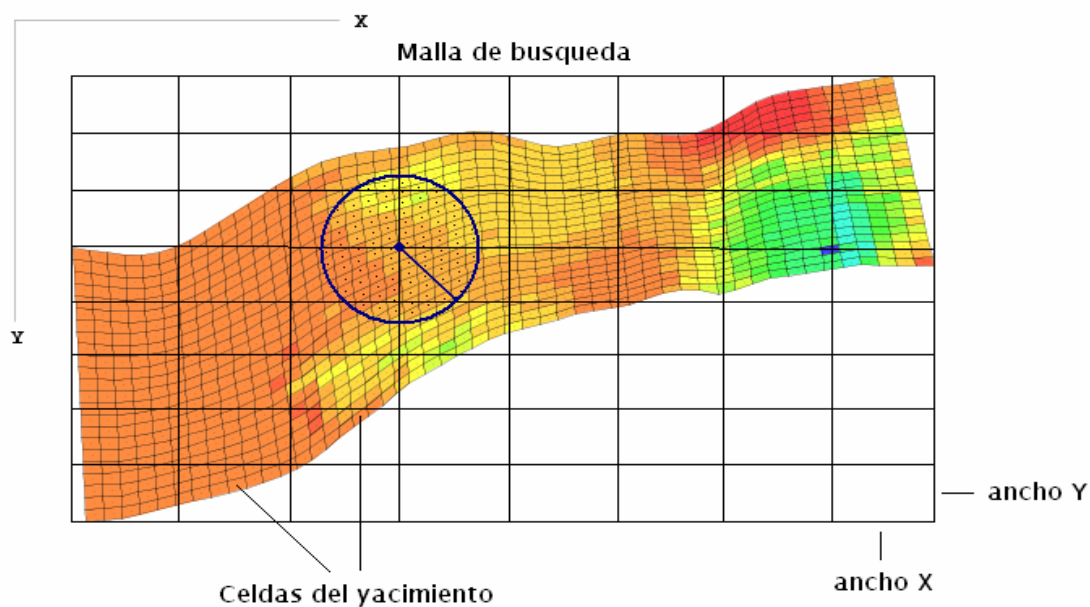


Figura 7. Algoritmo de búsqueda multicriterio usado en la selección de zonas óptimas.

Además se tienen en cuenta criterios propuestos por los ingenieros de petróleo y por medidas estandarizadas en la industria de los hidrocarburos: radio de una zona óptima, distancias mínimas de las celdas en los modelos geológicos, etc.

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 MODELO DE DESARROLLO

Para lograr los objetivos propuestos se organizó un grupo de trabajo conformado por el director del proyecto, un codirector y dos estudiantes de Ingeniería de Sistemas. Además de este grupo principal, se creó un grupo auxiliar conformado por un Ingeniero Electricista y un Petrolero, para ser asesorados en los tópicos concernientes a la caracterización eléctrica y el modelado de yacimientos.

En cuanto a la metodología en la gestión y desarrollo del software usamos la guía del Proceso Unificado de RATIONAL (RUP)¹², el cual es un proceso comprobado y confiable en la industria de desarrollo de software, dirigido por el riesgo, basado en iteraciones e incremental. Este proceso nos garantizó controlar el riesgo desde un principio, producir prototipos de acuerdo a los requisitos que surgieron en el proyecto y establecer una arquitectura sólida para el software. Como complemento a la metodología, usamos el Lenguaje Unificado de Modelado (UML) para especificar, visualizar y documentar los diferentes aspectos relativos al sistema software bajo desarrollo, así como para el modelado del negocio.

El RUP está dirigido por casos de uso, centrado en la arquitectura, iterativo (mini-proyectos) e incremental (versiones). Se implementaron las mejores prácticas actuales en ingeniería de software, como:

- Desarrollo iterativo del software.
- Administración de requerimientos.
- Uso de arquitecturas basadas en componentes.
- Modelado visual del software.
- Verificación de la calidad del software.
- Control de cambios.

Bajo esta etapa se estableció un marco de referencia para controlar los flujos de trabajo en cada fase del proceso.

Estas fases son: **Inicio**, **Elaboración**, **Construcción** y **Transición**. Cada fase concluye con un hito bien definido donde se tomaron ciertas decisiones importantes y críticas de acuerdo a los flujos de trabajo.

¹² Rational Unified Process. http://es.wikipedia.org/wiki/Proceso_Unificado

En la fase de **Inicio** se estableció la oportunidad y alcance del proyecto. Las partes interesadas acordaron el alcance, estimación de tiempo, y comprensión de los requerimientos.

En la fase de **Elaboración** se analizó el dominio del problema, estableciendo una arquitectura base sólida, y se eliminaron los elementos de mayor riesgo. En esta parte se tuvo como resultado el análisis de los tipos de enmallados soportados por el simulador STARS, la arquitectura del software y diseños de interfaces gráficas y no gráficas.

En la fase de **Construcción** todos los componentes restantes se desarrollaron e incorporaron al producto, y se utilizó un yacimiento de prueba para comprobar la validez del AMIE.

En la fase de **Transición** el objetivo es traspasar el software desarrollado a la comunidad de usuarios. Una vez instalado surgirán nuevos elementos que implicarán nuevos desarrollos.

Como el RUP es un proceso demasiado grande, se debe acoplar al tipo de proyecto específico. Los flujos de trabajo que usamos en el desarrollo del software, y que están contenidos en cada fase del proceso, son:

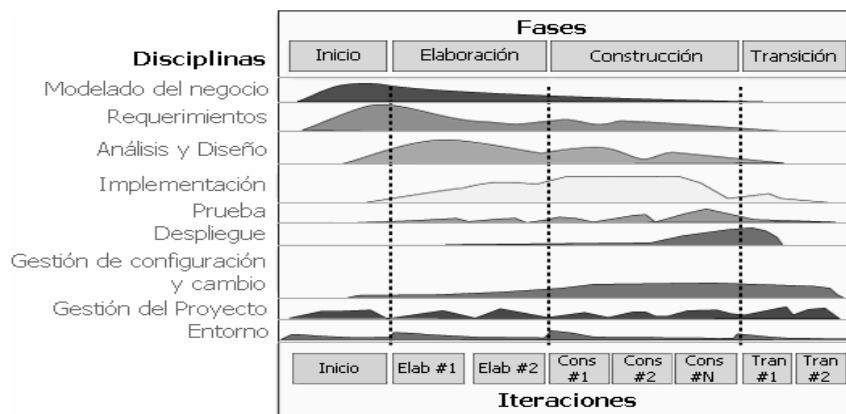


Figura 8. Fases y flujos trabajo del RUP¹³

Flujos Administrativos:

¹³ Rational Unified Process. http://es.wikipedia.org/wiki/Proceso_Unificado

- ✚ **Gestión del proyecto.** En esta disciplina se controló cada paso del proyecto estableciendo una lista de riesgo, consideraciones técnicas en la tecnología a usar, tiempo de desarrollo, recursos disponibles y la generación del plan de desarrollo software para cada iteración. Fue dirigida por iteraciones.
- ✚ **Entorno.** En esta disciplina se establecieron las herramientas de desarrollo a emplear, los estudios técnicos y de factibilidad de la tecnología y los procesos a implementar.

Flujos de Ingeniería:

- ✚ **Modelado del Negocio.** En esta disciplina quedó definido el alcance del proyecto y una visión global del software. Fue dirigida por iteraciones.
- ✚ **Requerimientos.** En esta disciplina se establecieron los requisitos del usuario para definir la funcionalidad del software. Fue dirigida por iteraciones de acuerdo al plan de desarrollo software.
- ✚ **Análisis y Diseño.** En esta disciplina se analizaron los requisitos de usuario y se diseñaron los componentes software de acuerdo a la lista de riesgos establecida en cada iteración. Fue dirigida por iteraciones de acuerdo al plan de desarrollo software.
- ✚ **Implementación y Codificación.** En este flujo se codificaron los diseños realizados previamente en la tecnología escogida. Esta dirigida por iteraciones de acuerdo al plan de desarrollo software del RUP.
- ✚ **Pruebas.** En esta disciplina se realizaron las pruebas de ejecución del software, casos especiales, tiempos de cálculo y el comportamiento de los procesos. Fue dirigida por iteraciones de acuerdo al plan de desarrollo software.

3.2 VALIDACIÓN DEL AMIE

Como no existe una herramienta software que pueda caracterizar eléctricamente un yacimiento, se desarrolló varios prototipos software que involucraron los pasos necesarios para el cálculo de las variables eléctricas (impedancia, resistencia en DC), ya que en la práctica se miden estos valores usando equipos especializados. En el presente documento están consignados los resultados del prototipo 4 (prototipo estable y probado).

La validación del Modelo de Impedancia Eléctrica se llevó a cabo por parte del CIGP. Se evaluaron los resultados de la caracterización de la siguiente manera:

- ✚ Comprobar que el modelo espacial (geometría tridimensional) del yacimiento esté conforme a los resultados que arroja el simulador de yacimientos STARS. Esto equivale a la geometría de la formación.
- ✚ La distribución de las propiedades eléctricas (Impedancia, Resistencia en DC) calculadas por el software, se comparan con la distribución de las propiedades petrofísicas usando como criterio la ley de Archie, analizando las relaciones de proporcionalidad.

La ley de Archie describe como la resistividad eléctrica, la porosidad y la resistividad del fluido dependen entre sí. Debido a que STARS solo nos proporciona la información petrofísica de la formación y no caracteriza los yacimientos eléctricamente, se hace necesario calcular el equivalente eléctrico para poder comparar las distribuciones de impedancia y resistencia en DC con las distribuciones de las propiedades petrofísicas de la formación. Este análisis no es directo, puesto que no se están comparando propiedades de la formación que poseen la misma naturaleza física. Aquí es donde entra un papel crucial la ley de Archie, ya que esta nos asegura que los resultados del equivalente eléctrico son consistentes utilizando como base las siguientes hipótesis:

- ✚ La resistividad eléctrica de la roca es inversamente proporcional a la saturación de agua de la misma.
- ✚ La resistividad eléctrica de la roca es inversamente proporcional a la porosidad de la misma.

4. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN (BASES DE RECH)

En la presente sección se encuentran las bases utilizadas en el desarrollo de RECH. El análisis, modelo de dominio, algoritmos, diagramas, interfaces gráficas de usuario, casos de uso y el modelo relacional involucrados pertenecen al prototipo cuatro, que es el resultado del refinamiento en la implementación del RUP.

4.1 MODELAMIENTO GEOMETRICO IMPLEMENTADO

Un yacimiento posee una geometría muy particular, dependiendo del campo que se esté estudiando. Dicha geometría representa, de forma discreta, a la formación. El simulador STARS es flexible en cuanto al tipo de enmallado que se quiera utilizar para representar la formación. Sabemos de antemano que una formación representada en el espacio tridimensional tiene 3 grados de libertad usando un sistema de referencia cartesiano: el eje x , eje y , y el eje z . Cada eje es ortogonal a sus respectivos ejes adyacentes, es decir, que cada eje forma un ángulo de 90° con sus respectivos ejes vecinos. De acuerdo a esta explicación, cada eje posee una dirección representada por alguno de los vectores unitarios i , j , y k . Cada tipo de enmallado en STARS utiliza esta representación que varía dependiendo del tipo escogido. Para ubicar una celda en la malla se utiliza la notación (I_c, J_c, K_c) , que tiene el siguiente significado: I_c es la coordenada del eje x de la celda que hacemos referencia, J_c es la coordenada del eje y de la celda que hacemos referencia, y K_c es la coordenada del eje z de la celda que hacemos referencia. Todos los tipos de enmallado soportados por STAR utilizan este sistema de localización espacial.

```

lamina-star - Notepad
File Edit Format View Help
RESULTS SIMULATOR STARS 200500
INUNIT FIELD
**
** Office Simulation File (DATA) data section version 2002A_1 Nov 8 2002
**
** File: LAMINAA_E100.DATA
** Created on: 23-May-2003 at: 11:58:06
**
*****
**                                     WARNING
**                                     *
** THIS FILE HAS BEEN AUTOMATICALLY GENERATED.
** ANY ATTEMPT TO EDIT MANUALLY MAY RESULT IN INVALID DATA.
**                                     *
*****
TITLE1 'SIMULACION TELLO'
TITLE2 'LAMINA A'
TITLES 'HOCOL S.A.'
**$ Distance units: ft
RESULTS XOFFSET 2846328.2000
RESULTS YOFFSET 2701546.0000
RESULTS ROTATION 0.0000 **$ (DEGREES)
**$ *****
**$ Definition of fundamental corner point grid
**$ *****
GRID CORNER 23 101 30
COORD
2610.5452 1507.2502 7757.9350 2610.5452 1507.2502 8148.2080 2789.5650 1499.3916 7751.8120 2789.
4042.7109 1444.3810 7617.6210 4042.7109 1444.3810 7864.2370 4221.7319 1436.5223 7594.3680 4221.
5474.8770 1381.5118 7485.0020 5474.8770 1381.5118 7564.6750 5653.8975 1373.6532 7441.4680 5653.
2629.1680 1762.9209 7721.9620 2629.1680 1762.9209 8091.6820 2806.1616 1754.4446 7724.8190 2806.
4045.1165 1695.1086 7590.9210 4045.1165 1695.1086 7899.1040 4222.1104 1686.6321 7575.5320 4222.
5461.0649 1627.2963 7497.6440 5461.0649 1627.2963 7826.6880 5638.0581 1618.8197 7457.3510 5638.
2647.7908 2018.5917 7691.9790 2647.7908 2018.5917 8028.0240 2822.4685 2009.4602 7699.0920 2822.
4045.2117 1945.5370 7560.4110 4045.2117 1945.5370 7931.4800 4219.8896 1936.4052 7555.1010 4219.
Ln 1, Col 1

```

Figura 9. Archivo de un yacimiento generado por STARS.

4.1.1 Tipos de enmallados soportados por el simulador STARS

El simulador STARS soporta 4 tipos de enmallado: Los enmallados cartesianos, de profundidad variable/espesor variable, cilíndricos radial-angulares y los enmallados de puntos de esquina. A continuación se describen brevemente.

Enmallado cartesiano (*CART)

En este tipo de enmallado las celdas del yacimiento poseen la misma longitud en la dirección especificada, sea i , j , o k . Esto quiere decir que la formación es homogénea espacialmente en cada dirección.

Ahora, en la dirección k (eje z) se pueden especificar capas de un grosor variable. Esto es válido puesto que las formaciones reales poseen capas de diferente profundidad. Algo característico de este tipo de enmallados es que se conocen todas las longitudes de cada celda en cada una de las direcciones i , j , y k , pero los puntos de esquina que delimitan a cada celda se desconocen en su totalidad, aunque se pueden calcular.

Un ejemplo de esta enmallado es el siguiente: una malla con 2 celdas en dirección i , 3 celdas en dirección j , y 4 celdas en dirección k , con longitudes de 100, 80 y 50 metros para las celdas en dirección i , j , y k respectivamente. En el archivo que genera STARS se codificaría de la siguiente forma (sin ingresar las longitudes):

```
GRID CART 2 3 4
```

Produciendo la siguiente distribución espacial:

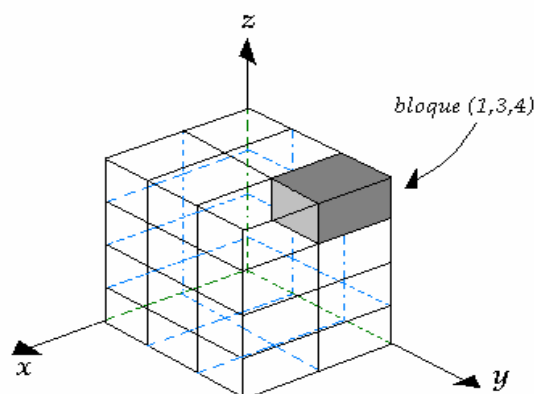


Figura 10. Enmallado tipo *CART soportado por el simulador STARS de dimensiones (2x3x4).

El bloque seleccionado en color gris se representa como $(I_c, J_c, K_c) = (1, 3, 4)$ que da a entender su ubicación espacial con respecto al plano de referencia: se encuentra en $I_c = 1$, $J_c = 3$ y en $K_c = 4$. Nótese que este tipo de enmallado es bastante limitado, puesto que las formaciones en la realidad son irregulares geoméricamente y muy casualmente se puede representar un yacimiento usando este tipo de enmallado.

Para efectos de simulaciones en STARS es bastante conveniente, ya que asegura la convergencia a la hora de realizar cálculos. De acuerdo a este gráfico esta formación posee 4 capas, ubicadas desde la parte inferior en $K = 1$ hasta la parte superior en $K = 4$. Esta orientación se puede modificar en el modelo de STARS estableciendo la palabra clave *KDIR al valor *DOWN y las capas estarán en orden inverso al anteriormente mostrado.

Enmallado de profundidad variable/espesor variable (*VARI)

Este enmallado es similar al anterior pero tiene ciertas ventajas, permitiendo establecer capas de profundidad variable o de espesor variable. La profundidad se entiende como los valores en el eje z , y el espesor puede ser alguno de los ejes x o y . No es posible establecer en la malla la profundidad en el eje z y el espesor variable en los ejes x y y al mismo tiempo, se debe seleccionar una de las dos. Un ejemplo de este enmallado es el siguiente: una malla con 6 celdas en dirección i , 4 celdas en dirección j , y 2 celdas en dirección k , con longitudes variables para las celdas del el eje x , 100 metros para las celdas del eje y , y variable para las celdas del eje z . En el archivo que genera STARS se codificaría de la siguiente forma (sin ingresar las longitudes):

```
GRID VARI 6 4 2
```

Produciendo la siguiente distribución espacial:

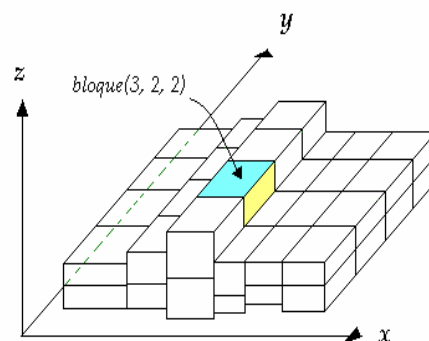


Figura 11. Enmallado tipo *VARI soportado por el simulador STARS de dimensiones (6x4x2).

Está claro que las longitudes en las direcciones i , j y k deben ingresarse después. En este ejemplo las celdas tienen longitudes iguales en dirección j , pero estas son variables en dirección i (eje x) y k (eje z). Posee las mismas propiedades que el enmallado tipo *CART y los 8 puntos de esquina de cada celda no coinciden en su totalidad con los puntos de esquina de sus celdas adyacentes. Esto significa que hay puntos de las celdas que son colineales, pero aún así se desconocen los valores de cada uno de los puntos de esquina de cada celda de la formación. Nótese que este tipo de enmallado refleja un poco mejor la realidad de la formación pero aún así existen capas en las formaciones que no se pueden representar como caras laterales rectangulares y en este caso este tipo de enmallado falla puesto que siempre se ven rectángulos viendo la formación desde arriba, abajo y cualquier plano lateral. En este tipo de enmallados también se puede refinar una zona específica de la formación.

Enmallado cilíndrico radial-angular (*RADIAL)

Este enmallado se caracteriza porque es muy usado para estudios de conificación, en donde la formación tiene pozos que están siendo perforados continuamente. Este sistema de enmallado es parecido al sistema de coordenadas polares visto desde arriba pero utiliza una tercera variable para indicar la profundidad, que en este caso se encuentra en el eje z . Posee anillos indexados en la dirección i contando de adentro hacia fuera. Cada anillo puede ser dividido en la dirección j contando en sentido contrario a las manecillas del reloj.

Las capas son indexadas en la dirección k comenzando desde el fondo del yacimiento y contando de abajo hacia arriba, o comenzando desde la parte superior del yacimiento y contando desde arriba hacia abajo dependiendo del valor de *KDIR establecido a *UP o *DOWN respectivamente.

Un ejemplo de este enmallado es el siguiente: una malla con 1 celda en dirección i , 7 celdas en dirección j , y 3 celdas en dirección k con diferentes longitudes en el eje y ($theta$) y el eje z . En el archivo de STARS se codificaría de la siguiente forma, sin tener en cuenta las longitudes de las celdas que se ingresarán después:

```
GRID RADIAL 1 7 3
```

Produciendo la siguiente distribución espacial:

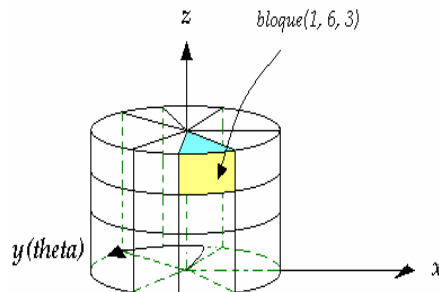


Figura 12. Enmallado tipo *RADIAL soportado por el simulador STARS de dimensiones (1x7x3).

Se puede establecer el radio interno que separa el pozo de las celdas usando la palabra clave *RW para un valor dado. Las celdas empezarían a partir de este radio y el valor del radio puede ser igual a cero. Este tipo de enmallado tiene la ventaja de que es útil en los casos en donde se tiene pozos perforados y que las propiedades de la roca que rodean estos pozos varían en función del nivel del perforación. Por otro lado presenta inconvenientes a la hora de realizar una simulación por errores de contorno de las celdas y aún así no refleja la realidad de las formaciones irregulares, sino que se usa para estudiar sectores parciales de dichas formaciones. Este tipo de enmallado es poco práctico.

Enmallado de puntos de esquina (*CORNER)

Este enmallado es el más flexible de todos los anteriores. Se caracteriza porque se puede definir el contorno de cada celda de la malla. El contorno se define como los 8 puntos que limitan cada celda de las demás celdas de la formación. Dado que cada punto de la celda está conformado por una terna de valores (x, y, z) , se hace necesarios definir $3 \times 8 = 24$ valores por cada celda para especificar su contorno. En la figura 11 se muestra la forma en que el simulador STARS interpreta el contorno de cada celda de la formación. STARS utiliza 6 etiquetas llamadas norte (*n*), sur (*s*), este (*e*), oeste (*o*), arriba (*t-top*), abajo (*b-bottom*) para ubicar cada uno de los 8 puntos de la celda a la cual se hace referencia.

Por ejemplo el punto superior izquierdo al fondo de la celda (nor-oeste arriba) se define usando la terna $(x_{NO-T}, y_{NO-T}, z_{NO-T})$ o el punto inferior derecho al frente de la celda (sur-este abajo) se define usando la terna $(x_{SE-B}, y_{SE-B}, z_{SE-B})$, y así sucesivamente para cada uno de los 8 puntos de cada celda de la formación.

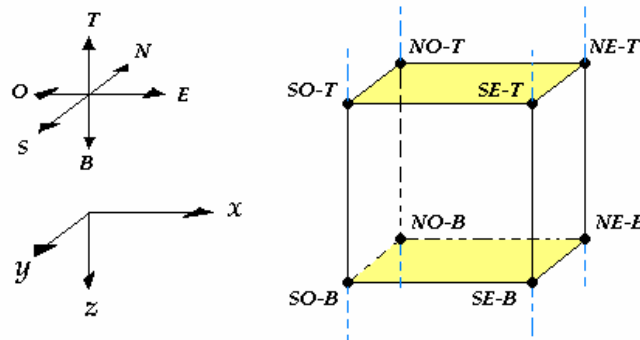


Figura 13. Orientación y contorno de las celdas usado por STAR.

En este tipo de enmallado la orientación de las capas siempre es descendente (KDIR = DOWN) y STAR no permite que se altere dicha orientación.

El simulador STARS impone restricciones a los puntos de las celdas de manera que no es necesario leer los 24 valores de que consta el contorno de cada celda de la formación. Las restricciones son:

- La diferencia entre NE-T y NO-T debe ser positiva e igual a la diferencia entre SE-T y SO-T.
- La diferencia entre SO-T y NO-T debe ser positiva e igual a la diferencia entre SE-T y NE-T.
- Los puntos de la cara superior serán los mismos en (x, y) para las cuatro ternas de abajo subtitulados con *B*. El simulador calcula la tapa superior e inferior por interpolación bilineal.

Las cuatro caras laterales son planares, ya que las líneas rectas que delimitan a la celda son paralelas y verticales (líneas azules punteadas). Las caras superior e inferior no son planares.

Los enmallados de este tipo son los más adecuados para representar formaciones con geometrías irregulares, en donde algunas caras de las celdas no son rectangulares y tampoco son planares. Ahora, STARS necesita que las caras laterales sean planares y las caras superior e inferior no necesariamente serán planares, ya que esto depende de los valores de los puntos superiores e inferiores de las celdas en cada capa.

El simulador STARS evalúa un enmallado de este tipo antes de hacer las simulaciones y una formación que lo implemente debe verse como una retícula rectangular desde la vista de planta (ver figura 14).

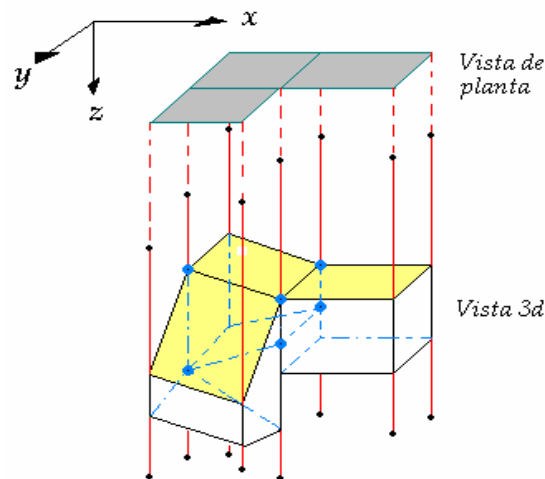


Figura 14. Vista de planta y tridimensional de un enmallado tipo *CORNER.

Las líneas siempre deben ser paralelas y verticales. Los puntos (x, y, z) siempre deben estar sobre las líneas (colineales) y no necesariamente son los mismos que los puntos de las celdas adyacentes. Los puntos negros sobre las partes superior e inferior de cada línea roja son los límites de cada línea que atraviesa la formación. Esto significa que la formación puede tener una forma geométrica muy irregular, con algunas celdas más grandes que otras.

Un ejemplo de este enmallado es el siguiente: una malla con 4 celdas en dirección i , 2 celdas en dirección j , y 1 celdas en dirección k con diferentes longitudes en los tres ejes de coordenadas. En el archivo de STARS se codificaría de la siguiente forma:

```
GRID CORNER 4 2 1
```

Produciendo la siguiente distribución espacial (aquí se ingresaron después los 8 puntos de esquina que definen el contorno de cada una de las celdas de la formación):

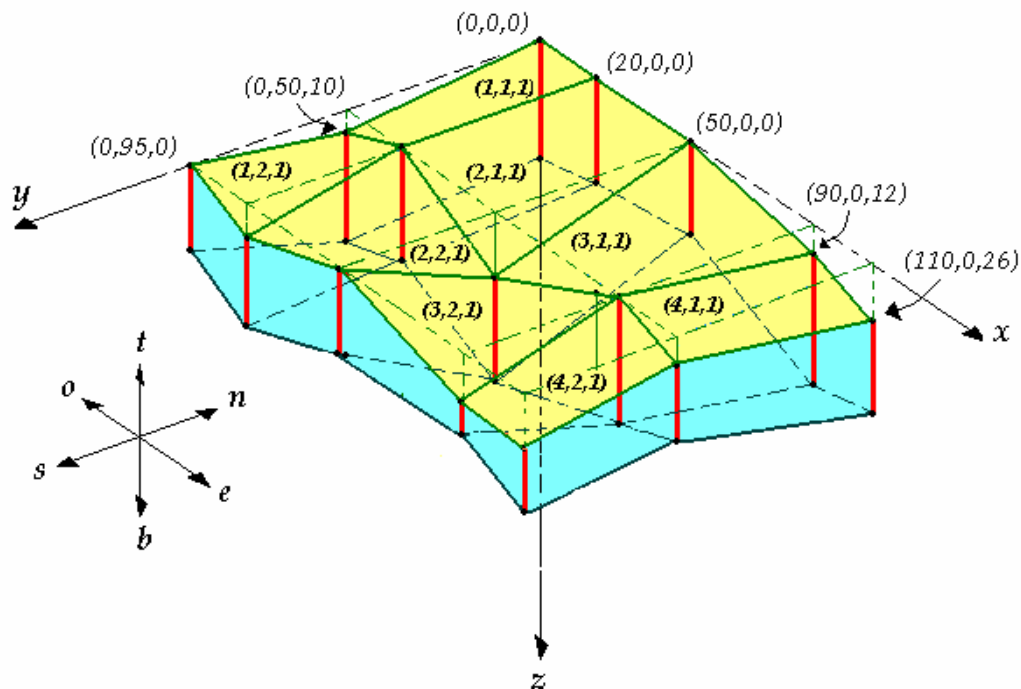


Figura 15. Enmallado de puntos de esquina de (4x2x1). Enmallado tipo *CORNER soportado por el simulador STARS.

Nótese que los 8 puntos de esquina de cada una de las celdas de la malla se conocen y además se encuentran localizados en la misma línea vertical que lo incluye (líneas rojas). En este ejemplo sólo tenemos una capa ($n_k = 1$) y si se tiene una vista de planta se puede apreciar la retícula rectangular, independientemente del número de capas que se tenga (líneas verdes discontinuas). En este tipo de enmallados también se puede hacer un refinamiento a una zona específica de la formación. Claro está, primero se deben crear el número de celdas en n_i , n_j y n_k (que es lo que está arriba) y después se debe asignar los 8 puntos de esquina a cada celda de la formación.

4.1.2 Análisis de los enmallados soportados por STARS

De todos los enmallados soportados por el simulador STARS el más sencillo y a la vez menos flexible e irreal son los enmallados de tipo cartesiano (*CART), ya que las formaciones reales se caracterizan por ser irregulares en su geometría. Los enmallados de profundidad variable/espesor variable (*VARI) tiene alguna funcionalidad adicional por encima de los enmallados cartesianos que los hace más flexibles a la hora de discretizar una formación.

Tienen la ventaja de que los puntos de esquina no necesariamente son los mismos que los puntos de esquina de sus celdas adyacentes (superior, inferior y laterales) y son colineales los unos con los otros permitiendo así capas de grosores diferentes y geometría no muy compleja. Aún así no se conocen directamente estos valores si no que hay que realizar cálculos para poder crearlos y usarlos para posteriores procesos, además siguen siendo inadecuados para representar formaciones irregulares. Los enmallados cilíndricos radiales-angulares (*RADIAL) no se tienen en cuenta por ser poco prácticos para representar formaciones irregulares.

El enmallado de puntos de esquina (*CORNER) es el más flexible de todos. Se caracteriza por representar formaciones con geometría irregular en cada capa de la formación conociéndose los 8 puntos de esquina de cada una de las celdas de la malla. Por estas razones RECH reconoce los archivos generados por STARS que usan esta configuración para almacenar los datos referentes a la geometría del yacimiento. Se escogió este tipo de archivos debido a que esta configuración representa a las otras configuraciones geométricas, pero no las reconoce a nivel de archivos.

Al igual que los anteriores tipos de enmallados, primero hay que definir el número de celdas n_i , n_j , n_k . Después, este tipo de enmallado debe establecer cada uno de los 8 puntos de cada celda de la formación utilizando dos algoritmos que el simulador STARS implementa. Estos dos algoritmos suponen que cada celda está delimitada por cuatro líneas imaginarias verticales y paralelas en el espacio tridimensional. Pueden existir puntos de una cara inferior de una celda que no son los mismos puntos que pertenecen a la cara superior de la celda de abajo permitiendo así fallas verticales.

4.1.3 Algoritmos implementados por STARS para generar una malla tipo *CORNER

STARS genera una malla de puntos de esquina usando dos algoritmos que almacenan los puntos de las celdas de varias formas. Sabemos que una celda de la formación tiene 8 puntos y que cada punto en realidad es una terna (x, y, z) ubicada de acuerdo a la orientación mostrada en la figura 4. Ambos algoritmos trabajan por capas y no celda a celda, basándose en este sistema de ubicación espacial pero el almacenamiento de estos valores es diferente y los índices varían en mayor rapidez en dirección i , luego j , y por último k . Esto quiere decir que ambos algoritmos generan los puntos de esquina en dirección i , luego en dirección j y por último en dirección k .

Algoritmo N°1 – Valores *COORD y *ZCORN

Este algoritmo se divide en dos secciones: generación de valores *COORD y generación de valores *ZCORN. Primero debe generar las líneas verticales que atraviesan la formación generando los valores *COORD para cada línea, para después generar las profundidades de cada uno de los 8 puntos de esquina de cada celda (valores *ZCORN) que se encuentran limitadas por estas líneas. Su implementación es la siguiente:

🔧 Generación de valores *COORD

Este algoritmo se encarga de generar las líneas verticales que atraviesan a la formación. Cada línea está definida por un punto superior (x_s, y_s, z_s) y uno inferior (x_i, y_i, z_i) y existen $(ni+1)*(nj+1)$ líneas en la formación, por lo tanto se hace necesario definir $2*3*(ni+1)*(nj+1)$ valores para generar todas las líneas de la malla. El pseudocódigo de este proceso se encuentra en la guía de usuario de STARS [1], y es el siguiente:

```

Para j=1 hasta (nj+1)
  Para i=1 hasta (ni+1)

    //Para la parte superior de línea
    Si ((i<ni) y (j<nj)) entonces
      Escribir ( $x_s, y_s, z_s$ ) de la esquina NO
    Sino Si ((i=ni) y (j<nj)) entonces
      Escribir ( $x_s, y_s, z_s$ ) de la esquina NE
    Sino Si ((i<ni) y (j=nj)) entonces
      Escribir ( $x_s, y_s, z_s$ ) de la esquina SO
    Sino
      Escribir ( $x_s, y_s, z_s$ ) de la esquina SE
    Fin Si

    //Para la parte inferior de línea
    Si ((i<ni) y (j<nj)) entonces
      Escribir ( $x_i, y_i, z_i$ ) de la esquina NO
    Sino Si ((i=ni) y (j<nj)) entonces
      Escribir ( $x_i, y_i, z_i$ ) de la esquina NE
    Sino Si ((i<ni) y (j=nj)) entonces
      Escribir ( $x_i, y_i, z_i$ ) de la esquina SO
    Sino
      Escribir ( $x_i, y_i, z_i$ ) de la esquina SE
    Fin Si
  Fin Para i
Fin Para j
  
```

Para mayor comprensión se realizó una malla de prueba tipo *CORNER con 4 celdas en dirección i , 2 celdas en dirección j y 2 celdas en dirección k . El número de líneas a generar es $(4+1)*(2+1) = 15$, y estas con las que atravesarán verticalmente toda la formación. Los valores (x, y, z) superiores e inferiores de cada línea a ingresar son los siguientes:

Tabla 1. Datos (x, y, z) para generar líneas.

| Línea | (x_s, y_s, z_s) | (x_i, y_i, z_i) |
|-------|-------------------|-------------------|
| L1 | (0, 0, 0) | (0, 0, 80) |
| L2 | (20, 0, 0) | (20, 0, 75) |
| L3 | (50, 0, 0) | (50, 0, 70) |
| L4 | (90, 0, 12) | (90, 0, 82) |
| L5 | (100, 0, 26) | (110, 0, 86) |
| L6 | (0, 50, 10) | (0, 50, 90) |
| L7 | (20, 50, 0) | (20, 50, 83) |
| L8 | (50, 50, 23) | (50, 50, 80) |
| L9 | (90, 50, 0) | (90, 50, 60) |
| L10 | (110, 50, 13) | (110, 50, 63) |
| L11 | (0, 95, 0) | (0, 95, 60) |
| L12 | (20, 95, 14) | (20, 95, 64) |
| L13 | (50, 95, 0) | (50, 95, 50) |
| L14 | (90, 95, 18) | (90, 95, 58) |
| L15 | (110, 95, 22) | (110, 95, 62) |

De acuerdo al pseudocódigo en el archivo que genera STARS, y utilizando los datos de la tabla 1 para generar las líneas que atraviesan la formación, se codificaría de la siguiente forma:

GRID CORNER 4 2 2

COORD

```

0 0 0 0 0 80 20 0 0 20 0 75
50 0 0 50 0 80 90 0 12 90 0 82
110 0 26 110 0 86
0 50 10 0 50 90 20 50 0 20 50 83
50 50 23 50 50 83 90 50 0 90 50 60
110 50 0 110 50 63
0 95 0 0 95 60 20 95 14 20 95 64
50 95 0 50 95 0 90 95 18 90 95 58
110 95 22 110 95 62

```

El programa que debe extraer estos valores tiene que reconocer esta estructura organizativa de los puntos de las líneas para poder hacer uso de ellas en el modulo de visualización.

La figura 14 muestra estos valores creados por STARS en el espacio tridimensional y se puede apreciar de una manera más clara y menos abstracta la geometría que tendrá la malla.

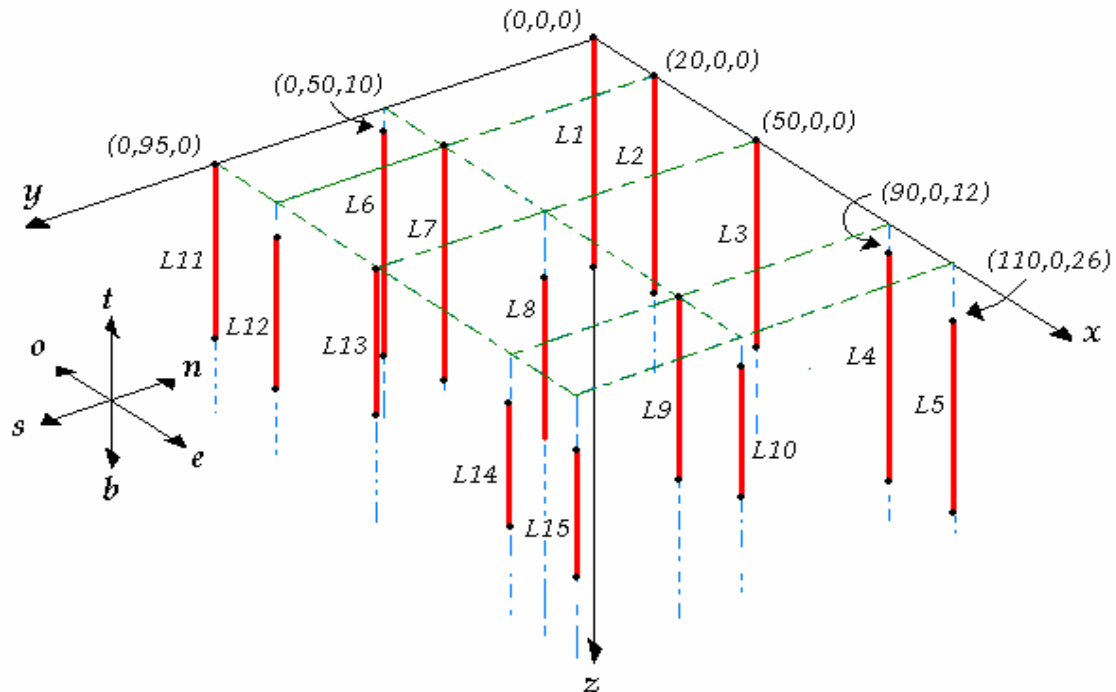


Figura 16. Generación de valores *COORD

Las líneas rojas representan las líneas verticales que atraviesan la formación. Nótese que las coordenadas (x, y) son las mismas para cada línea. Las líneas verdes discontinuas hacen parte de la vista de planta de esta malla. Las líneas verticales no necesariamente empiezan desde los puntos superiores a la misma profundidad y tampoco tienen la misma profundidad en sus puntos inferiores, por ejemplo la línea L1 y L2 tiene 80 unidades de longitud pero la línea L2 tiene su punto superior en $z=10$ y L1 lo tiene en $Z=0$. Esto quiere decir que pueden existir capas más gruesas e irregulares que otras.

✚ Generación de valores *ZCORN

Después de que el simulador STARS almacena los puntos superior e inferior de todas las líneas que atraviesan la formación, procede a generar los valores de las profundidades (valores *ZCORN) de cada uno de los 8 puntos de esquina que conforman el contorno de cada una de las celdas de la formación. El pseudocódigo de este proceso se encuentra en la guía de usuario de STARS [1], y es el siguiente:

```

Para k=1 hasta nk
  Para j=1 hasta nj //Para la parte superior de las capas
    Para i=1 hasta ni
      Escribir  $z_s$  de NO-T  $\in$  a la celda (i, j, k)
      Escribir  $z_s$  de NE-T  $\in$  a la celda (i, j, k)
    Fin Para i
    Para i=1 hasta ni
      Escribir  $z_s$  de SO-T  $\in$  a la celda (i, j, k)
      Escribir  $z_s$  de SE-T  $\in$  a la celda (i, j, k)
    Fin Para i
  Fin Para j

  Para j=1 hasta nj //Para la parte inferior de las capas
    Para i=1 hasta ni
      Escribir  $z_i$  de NO-B  $\in$  a la celda (i, j, k)
      Escribir  $z_i$  de NE-B  $\in$  a la celda (i, j, k)
    Fin Para i
    Para i=1 hasta ni
      Escribir  $z_i$  de SO-B  $\in$  a la celda (i, j, k)
      Escribir  $z_i$  de SE-B  $\in$  a la celda (i, j, k)
    Fin Para i
  Fin Para j
Fin Para k

```

Para mayor comprensión utilizaremos la misma malla de (4x2x2) utilizada en la sección del algoritmo *COORD y generaremos los valores de los 8 puntos de esquina de cada celda de la malla utilizando los datos de prueba de la tabla 2.

Tabla 2. Puntos de esquina por celda.

| Celda | NO-T | NE-T | SO-T | SE-T | NO-B | NE-B | SO-B | SE-B |
|-------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|
| 1-1-1 | (0,0,0) | (20,0,0) | (0,50,10) | (20,50,0) | (0,0,40) | (20,0,35) | (0,50,50) | (20,50,43) |
| 2-1-1 | (20,0,0) | (50,0,0) | (20,50,0) | (50,50,23) | (20,0,35) | (50,0,30) | (20,50,43) | (50,50,60) |
| 3-1-1 | (50,0,0) | (90,0,12) | (50,50,23) | (90,50,0) | (50,0,30) | (90,0,52) | (50,50,60) | (90,50,40) |
| 4-1-1 | (90,0,12) | (110,0,26) | (90,50,0) | (110,50,13) | (90,0,52) | (110,0,56) | (90,50,40) | (110,50,43) |
| 1-2-1 | (0,50,10) | (20,50,0) | (0,95,0) | (20,95,14) | (0,50,50) | (20,50,43) | (0,95,30) | (0,50,43) |
| 2-2-1 | (20,50,0) | (50,50,23) | (20,95,14) | (50,95,0) | (20,50,43) | (50,50,60) | (20,95,43) | (50,95,30) |
| 3-2-1 | (50,50,23) | (90,50,0) | (50,95,0) | (90,95,18) | (50,50,60) | (90,50,40) | (50,95,30) | (90,95,28) |
| 4-2-1 | (90,50,0) | (110,50,13) | (90,95,18) | (110,95,22) | (90,50,40) | (110,50,43) | (90,95,28) | (110,95,42) |
| 1-1-2 | (0,0,40) | (20,0,35) | (0,50,50) | (20,50,43) | (0,0,80) | (20,0,75) | (0,50,90) | (20,50,83) |
| 2-1-2 | (20,0,35) | (50,0,30) | (20,50,43) | (50,50,60) | (20,0,75) | (50,0,70) | (20,50,83) | (50,50,80) |
| 3-1-2 | (50,0,30) | (90,0,52) | (50,50,60) | (90,50,40) | (50,0,70) | (90,0,82) | (50,50,80) | (90,50,60) |
| 4-1-2 | (90,0,52) | (110,0,56) | (90,50,40) | (110,50,43) | (90,0,82) | (110,0,86) | (90,50,60) | (110,50,63) |
| 1-2-2 | (0,50,50) | (20,50,43) | (0,95,30) | (20,95,43) | (0,50,90) | (20,50,83) | (0,95,60) | (0,50,64) |
| 2-2-2 | (20,50,43) | (50,50,60) | (20,95,43) | (50,95,30) | (20,50,83) | (50,50,80) | (20,95,64) | (50,95,50) |
| 3-2-2 | (50,50,60) | (90,50,40) | (50,95,30) | (90,95,28) | (50,50,80) | (90,50,60) | (50,95,50) | (90,95,58) |
| 4-2-2 | (90,50,40) | (110,50,43) | (90,95,28) | (110,95,42) | (90,50,60) | (110,50,63) | (90,95,58) | (110,95,62) |

Nótese que las 8 primeras filas de la columna NO-B hasta la columna SE-B son exactamente iguales a las últimas 8 filas de la columna NO-T hasta la columna SE-T. Esto quiere decir que la parte inferior de la capa $k=1$ vendría siendo la parte superior de la capa $k=2$ (No existen fallas verticales). Las fallas verticales existen cuando los valores son diferentes.

Existen $4*2*2 = 16$ celdas en toda la malla identificadas como $x-y-z$, dándonos la ubicación exacta de cada celda dentro de la malla. Estos valores no son los puntos de esquina de las celdas sino que son identificadores únicos que representan a cada celda de manera abstracta (columna de la tabla titulada como Celda). Es decir que la celda 2-1-2 se encuentra entre las celdas localizadas en $I_c=2$, en $J_c=1$ y en la segunda capa de la formación ($K_c=2$).

Hay que resaltar que el pseudocódigo anterior, que genera los valores *ZCORN, trabaja por capas y no por celdas, es decir, que reconstruye toda la malla generando los valores superiores (NO-T, NE-T, SO-T, SE-T) de la capa 1 y luego sus inferiores (NO-B, NE-B, SO-B, SE-B), después genera los valores superiores de la capa 2 y luego sus inferiores, y así sucesivamente hasta llegar a la capa n_k .

En el archivo que genera STARS se codificaría de la siguiente forma:

```
ZCORN
 0 0    0 0    0 12   12 26
10 0    0 23   23 0    0 13 ←Parte superior de la capa k=1
10 0    0 23   23 0    0 13
 0 14   14 0    0 18   18 22

40 35   35 30   30 52   52 56
50 53   53 60   60 40   40 43 ←Parte inferior de la capa k=1
50 53   53 60   60 40   40 43
30 43   43 30   30 28   28 42

40 35   35 30   30 52   52 56
50 53   53 60   60 40   40 43 ←Parte superior de la capa k=2
50 53   53 60   60 40   40 43
30 43   43 30   30 28   28 42

80 75   75 70   70 82   82 86
90 83   83 80   80 60   60 63 ←Parte inferior de la capa k=2
90 83   83 80   80 60   60 63
60 64   64 50   50 58   58 62
```

De esta manera STARS genera la malla como se puede apreciar en la figura 17. Se puede ver que hay valores que se repiten dependiendo de la celda que nos encontremos.

“El punto de esquina NE-T de la celda (i, j, k) y el punto de esquina NW-T de la celda (i+1, j, k) deberán estar situados en la misma línea vertical, al igual que las esquinas NE-B y NW-B, SE-T y SW-T, y SE-B y SW-B de los bloques (i, j, k) y (i+1, j, k), respectivamente; el punto de esquina SW-T del bloque (i, j, k) y el punto de esquina NW-T de la celda (i, j+1, k) deberán estar situados en la misma línea vertical, al igual que las esquinas SW-B y NW-B, SE-T y NE-T, y SE-B y NE-B de las celdas (i, j, k) y (i, j+1, k), respectivamente” [1].

El simulador STARS optimiza este almacenamiento factorizando los valores que son comunes entre esquinas y no entre puntos, es decir que no factoriza por capas. De esta manera el archivo generado por STARS se verá de la siguiente forma:

```
ZCORN
 0  2*0   2*0   2*12  26
10  2*0   2*23  2*0   13
10  2*0   2*23  2*0   13
 0  2*14  2*0   2*18  22  ←Hasta aquí la parte superior de la capa k=1
40  2*35  2*30  2*52  56
50  2*53  2*60  2*40  43
50  2*53  2*60  2*40  43
30  2*43  2*30  2*28  42  ←Hasta aquí la parte inferior de la capa k=1
40  2*35  2*30  2*52  56
50  2*53  2*60  2*40  43
50  2*53  2*60  2*40  43
30  2*43  2*30  2*28  42  ←Hasta aquí la parte superior de la capa k=2
80  2*75  2*70  2*82  86
90  2*83  2*80  2*60  63
90  2*83  2*80  2*60  63
60  2*64  2*50  2*58  62  ←Hasta aquí la parte inferior de la capa k=2
```

Generando la siguiente malla:

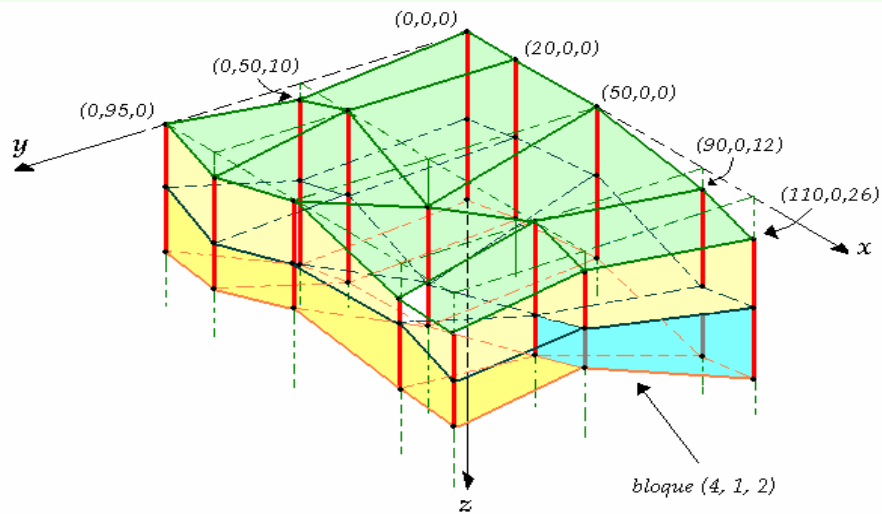


Figura 17. Generación de valores *ZCORN. Malla generada usando el algoritmo N°1.

Nótese que el algoritmo genera primero las líneas verticales (valores *COORD) en las cuales descansarán los profundidades z (valores *ZCORN) de cada uno de los 8 puntos de esquina de cada celda de la malla.

Fíjese que la parte inferior de la capa k=1 es exactamente igual a la parte superior de la capa k=2. Esto significa que no existen fallas verticales en la malla. En este ejemplo de enmallado tipo *CORNER no existen fallas horizontales ni verticales, puesto que los puntos de esquina de una celda específica coinciden numéricamente, dentro de una tolerancia establecida por STARS, a los puntos de esquina de sus celdas adyacentes. Esta malla se puede ver mejor separándola por capas, que en este caso son las capas k=1 y k=2.

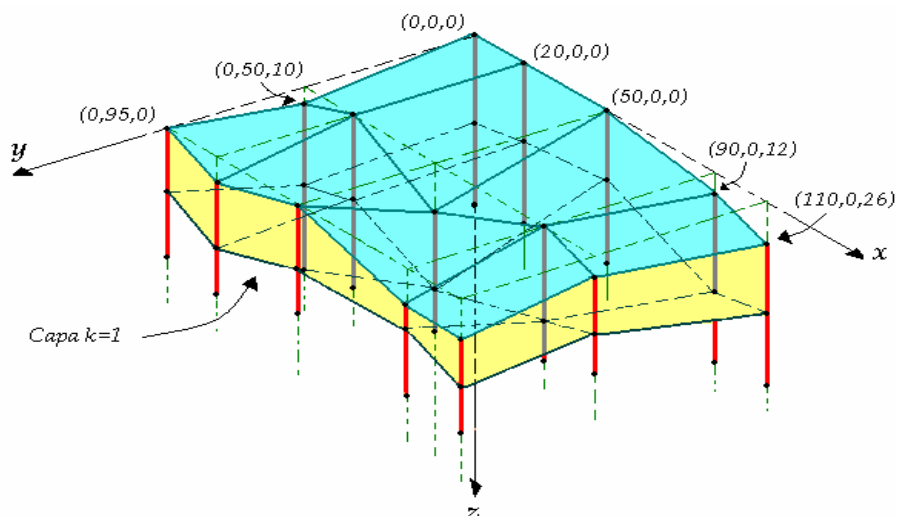


Figura 18. Capa k=1 de un enmallado tipo *CORNER.

Esta es la capa superior de la malla, puesto que la orientación de las capas siempre es descendente (KDIR=DOWN).

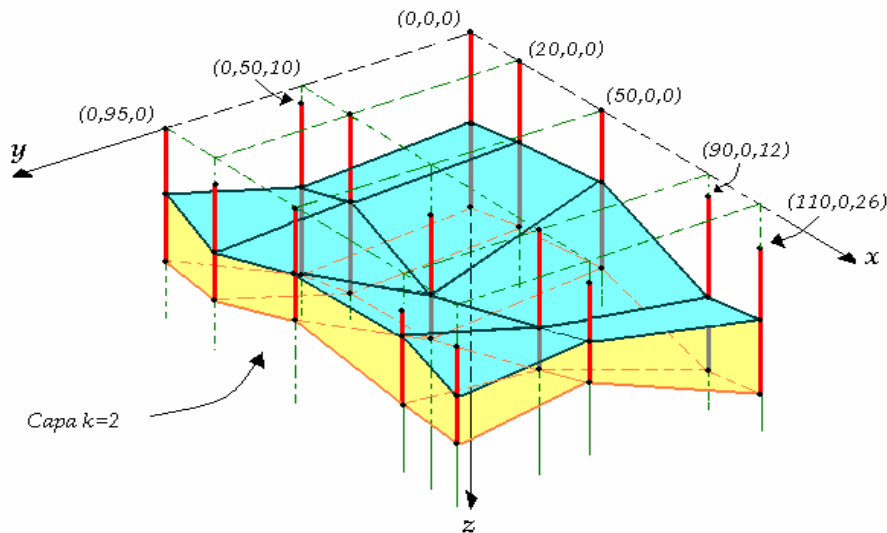


Figura 19. Capa k=2 de un enmallado tipo *CORNER.

En este caso la parte superior de la capa k=2 coincide numéricamente con la parte inferior de la capa k=1.

Algoritmo N°2 – Valores *CORNERS

El anterior algoritmo generaba las líneas verticales que atravesaban la formación, para luego generar las profundidades de cada uno de los 8 puntos de esquina de cada celda, trabajando por capas y no por celdas. El algoritmo N°2 se diferencia del anterior en que no necesita generar las líneas verticales sino que especifica todos los valores (x, y, z) de cada uno de los 8 puntos de esquina de cada celda de la malla. Claro está, también genera estos valores por capas y no celda a celda. Para poder generar todas las celdas de la malla se necesitan $8 \cdot (n_i \cdot n_j \cdot n_k)$ valores que representarán a toda la formación. El algoritmo es el mismo usado en la generación de valores *ZCORN, sólo que lo hace para los valores de la coordenada x, luego los valores de la coordenada y, y por último las profundidades z. El pseudocódigo de este proceso se encuentra en la guía de usuario de STARS [1], y es el siguiente:

- i. Reemplazar w por x .
- ii. Reemplazar w por y .
- iii. Reemplazar w por z .

Hacer los siguientes ciclos para los casos i, ii y iii:

```

Para k=1 hasta nk
  Para j=1 hasta nj //Para la parte superior de las capas
    Para i=1 hasta ni
      Escribir  $w_s$  de NO-T  $\in$  a la celda (i, j, k)
      Escribir  $w_s$  de NE-T  $\in$  a la celda (i, j, k)
    Fin Para i
    Para i=1 hasta ni
      Escribir  $w_s$  de SO-T  $\in$  a la celda (i, j, k)
      Escribir  $w_s$  de SE-T  $\in$  a la celda (i, j, k)
    Fin Para i
  Fin Para j

  Para j=1 hasta nj //Para la parte inferior de las capas
    Para i=1 hasta ni
      Escribir  $w_i$  de NO-B  $\in$  a la celda (i, j, k)
      Escribir  $w_i$  de NE-B  $\in$  a la celda (i, j, k)
    Fin Para i
    Para i=1 hasta ni
      Escribir  $w_i$  de SO-B  $\in$  a la celda (i, j, k)
      Escribir  $w_i$  de SE-B  $\in$  a la celda (i, j, k)
    Fin Para i
  Fin Para j
Fin Para k

```

En otras palabras el algoritmo genera un bloque de valores x para todas las celdas de la malla, luego genera un bloque de valores y , y por último un bloque de las profundidades de cada una de las celdas de la malla.

Para mayor comprensión creamos la siguiente malla: una malla tipo *CORNER con $n_i=4$, $n_j=2$, $n_k=1$ con longitudes de celdas de 100 unidades en dirección i , 200 unidades en dirección j , y 100 unidades en dirección k me genera la siguiente distribución espacial:

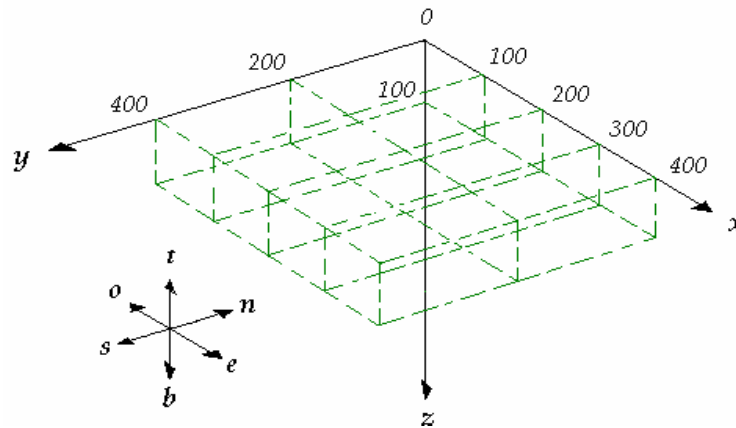


Figura 20. Esqueleto de la malla (4x2x1).

Las líneas verdes representan el esqueleto de la malla. Aún no se han asignado los valores (x, y, z) de cada punto de esquina de cada celda de la malla. Ahora el algoritmo empieza asignando el bloque de valores x (reemplazar w por x) de todos los puntos de esquina de todas las celdas de la malla así:

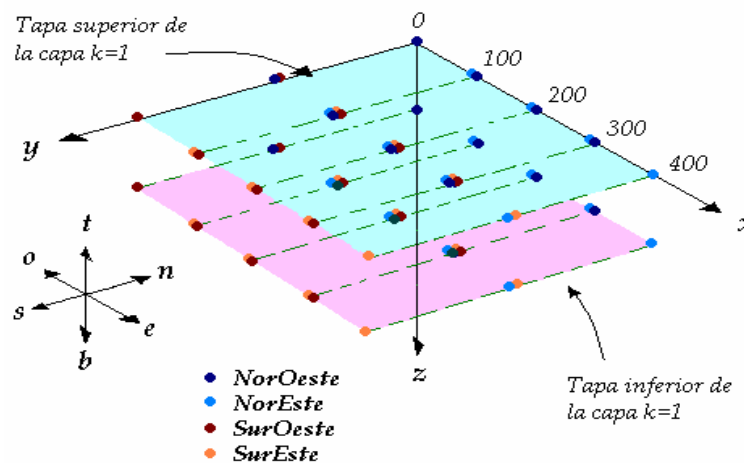


Figura 21. Bloque de valores x de las partes superior e inferior de la capa $k=1$.

Luego repite el mismo proceso pero reemplazando w por y para asignar el bloque de valores de la coordenada y de todos los puntos de esquina de las celdas de la malla, así:

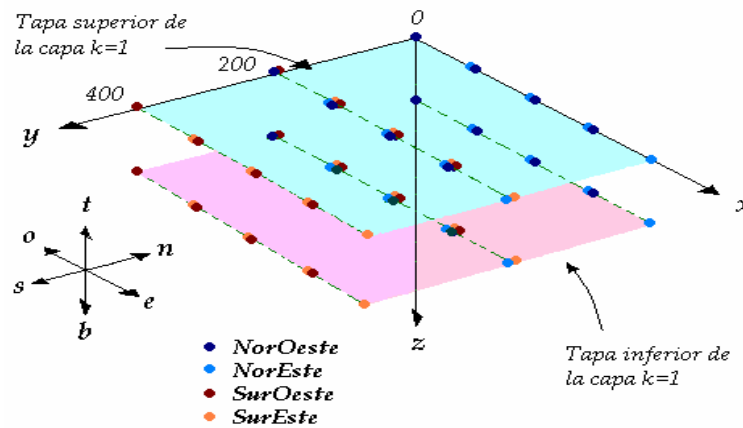


Figura 22. Bloque de valores y de las partes superior e inferior de la capa $k=1$

Por último repite el mismo proceso asignando los valores de las profundidades z (reemplazar w por z) de todas las celdas de la malla, así:

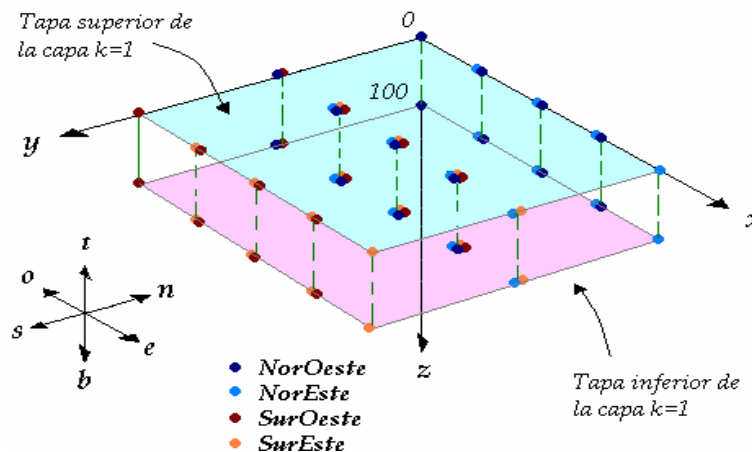


Figura 23. Bloque de valores z de las partes superior e inferior de la capa $k=1$.

De esta manera se generan todos los puntos de esquina de todas las celdas de la malla. Hay que resaltar que este enmallado es homogéneo en cuanto a su geometría y por esta razón todos los puntos de esquina de las celdas coinciden numéricamente, dentro de una tolerancia, a los puntos de esquina de sus celdas adyacentes. Esto se debe a que todas las celdas en dirección i tienen una longitud de 100 unidades, en dirección j tienen una longitud de 200 unidades, y en dirección k tienen una longitud de 100 unidades. Este algoritmo es general para cualquier formación, por más irregular que sea su geometría.

En el archivo que genera STARS todos estos valores, factorizándolos de acuerdo a los puntos de esquina que son comunes, se distribuyen de la siguiente forma:

```

CORNERS
  0  2*100  2*200  2*300  400
  0  2*100  2*200  2*300  400
  0  2*100  2*200  2*300  400
  0  2*100  2*200  2*300  400 ← Hasta aquí la parte superior de k=1
  0  2*100  2*200  2*300  400
  0  2*100  2*200  2*300  400
  0  2*100  2*200  2*300  400 ← Hasta aquí la parte inferior de k=1
  0    2*0    2*0    2*0    0
200  2*200  2*200  2*200  200
200  2*200  2*200  2*200  200
400  4*200  4*200  4*200  400 ← Hasta aquí la parte superior de k=1
  0    2*0    2*0    2*0    0
200  2*200  2*200  2*200  200
200  2*200  2*200  2*200  200
400  4*200  4*200  4*200  400 ← Hasta aquí la parte inferior de k=1
100  2*100  2*100  2*100  100
100  2*100  2*100  2*100  100
100  2*100  2*100  2*100  100
100  2*100  2*100  2*100  100 ← Hasta aquí la parte superior de k=1
100  2*100  2*100  2*100  100
100  2*100  2*100  2*100  100
100  2*100  2*100  2*100  100 ← Hasta aquí la parte inferior de k=1

```

De esta manera se define toda la geometría de la malla. Como se puede ver el primer bloque de números son todas las coordenadas x de todos los puntos de esquina de las celdas de la malla, luego le siguen el bloque de coordenadas y, y por último el bloque de profundidades z.

Existe mucha redundancia de datos porque, aunque se utilice este algoritmo, siempre se necesitan que los puntos de esquina estén sobre las líneas verticales que no se han creado, pero se afirma esto ya que los valores (x, y) siempre serán los mismos para cada profundidad z, perteneciente a la línea verticales imaginaria, que se está asignando en la malla.

Todo este proceso se resume de manera grafica en la figura 22. Esta es la malla generada usando el algoritmo N°2 anteriormente descrito

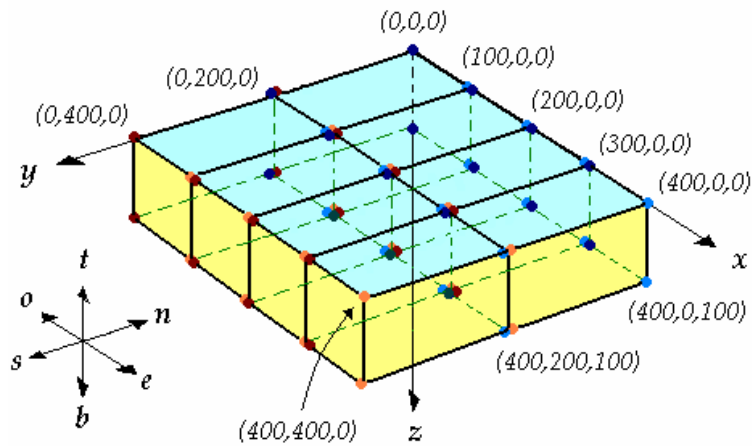


Figura 24. Generación de valores *ZCORN. Malla generada usando el algoritmo N°2.

4.1.4 Análisis de los algoritmos N°1 y N°2

Ambos algoritmos suponen que la formación, por más irregular que sea su geometría, deben verse como una retícula rectangular en la vista de planta. Esto quiere decir que, en ambos casos, la formación es atravesada por líneas verticales paralelas, permitiendo que las caras laterales de cada celda de la malla sean planares y ortogonales unas con otras. Las caras superiores e inferiores de cada celda no siempre son planares y en los casos donde existen fallas verticales la cara inferior de la celda (i, j, k) se traslapa con la cara superior de la celda $(i, j, k+1)$. STARS calcula estas caras usando interpolación bilineal. Ahora, en cuanto al almacenamiento de los puntos de esquina de las celdas, el algoritmo N°1 reduce considerablemente la cantidad de datos que hay que almacenar, y es más eficiente que el algoritmo N°2, ya que el primero genera los valores (x, y) de todas las líneas verticales (valores *COORD) para después asignar las profundidades z (valores *ZCORN) que estarán siempre sobre las líneas verticales generadas. Cosa contraria con el algoritmo N°2 que repite los valores (x, y) de las celdas $(i, j, 2)$, $(i, j, 3)$, $(i, j, 4)$, ..., $(i, j, nk-1)$, que representan las capas $k=2, k=3, k=4, \dots, k=nk-1$ de toda la malla. Como se dijo desde el principio: La formación siempre debe ser atravesada por líneas verticales generadas, que es el caso del algoritmo N°1, o líneas verticales imaginarias, para el caso del algoritmo N°2. Se utilizó el algoritmo N°1 para extraer los valores de interés y realizar las pruebas de rendimiento de RECH, porque los archivos generados usando este algoritmo son menos pesados y la carga de procesamiento en el computador disminuye considerablemente entre la memoria RAM y el SWAPING al disco.

4.2 GENERADOR DEL YACIMIENTO

Con base a los requisitos del usuario se desarrolló un primer prototipo con un algoritmo en Java que decodifica los archivos de STARS. El programa inicialmente contenía aproximadamente 3500 líneas de código y se refinó hasta llegar al prototipo cuatro, produciendo el siguiente diagrama de colaboración:

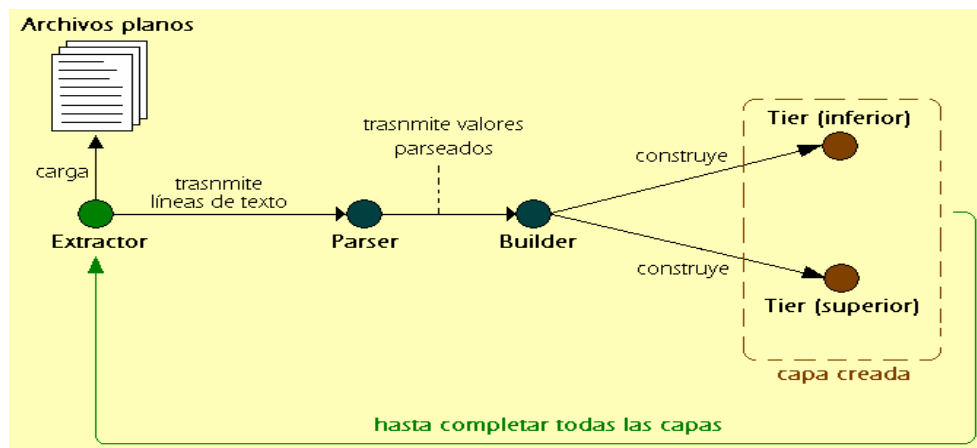


Figura 25. Proceso de extracción, conversión y creación de una malla en el software

El algoritmo utiliza varios objetos software para establecer comunicación entre ellos y dividir las responsabilidades. El **Extractor** es un objeto que tiene la responsabilidad de cargar los archivos planos generados por STARS. Extrae líneas de texto que contiene datos alfanuméricos que son enviados al objeto **Parser** para su posterior análisis sintáctico.

El **Parser** analiza sintácticamente cada línea de texto y extrae los valores relevantes para la construcción del modelo geométrico y petrofísico de acuerdo a unas reglas basadas en palabras claves encontradas en los archivos. Un yacimiento puede tener su información distribuida en varios archivos: En uno se encuentra el modelo geométrico y en el otro las distribuciones de las propiedades petrofísicas.

Estos valores son enviados al objeto **Builder** que es el constructor de la malla y responsable de generar toda la geometría de un yacimiento particular. El constructor de la malla utiliza dos objetos que representan la parte superior e inferior de cada capa del yacimiento. Construye la formación capa por capa hasta que se cumplan las condiciones de terminación.

En la figura 26 se encuentra el diagrama de actividades desarrollado:

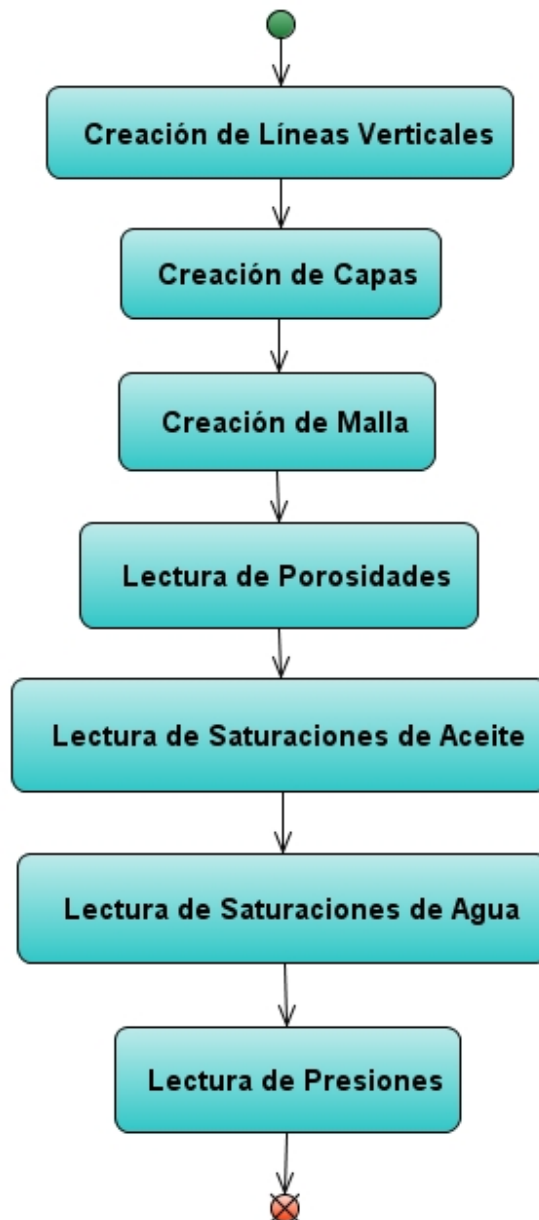


Figura 26. Diagrama de actividades para la extracción, conversión, creación y almacenamiento de una malla en la base de datos.

Después de la creación de la malla se procede a notificar los resultados a la interfaz gráfica de usuario.

4.3 ESTRUCTURA DE LA INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO

La figura 19 contiene el esquema de los contenedores para los controles gráficos para la ventana principal de la aplicación: tablas de datos, equivalentes generados, árboles de información, barra de menú y herramientas.

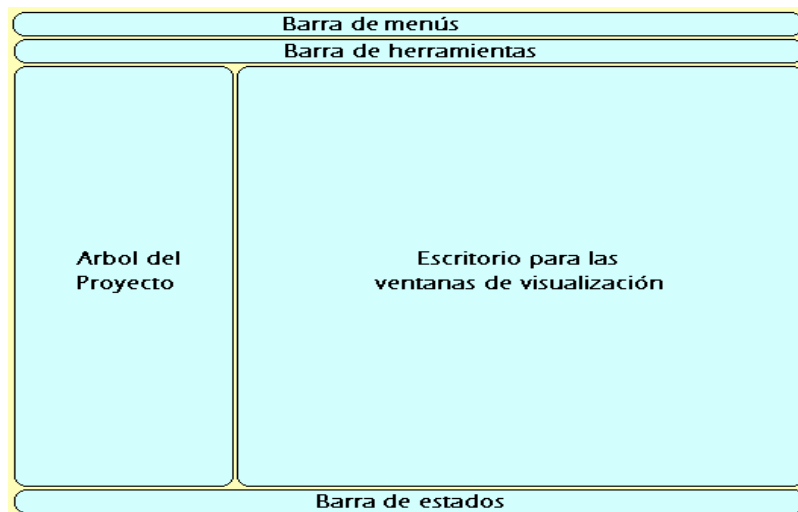


Figura 27. Esquema de los contenedores de la interfaz gráfica de usuario principal

Para el visualizador de objetos se propuso la siguiente interfaz gráfica para aislar el funcionamiento básico del adicional. La aplicación caracteriza yacimientos sin necesidad de utilizar el módulo de visualización.

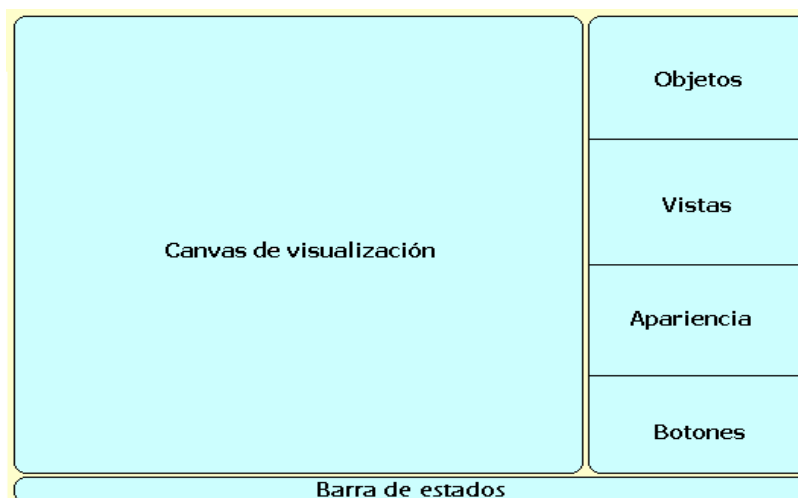


Figura 28. Esquema de los contenedores de la interfaz gráfica de usuario del visualizador.

4.4 REPOSITORIO DE EQUIVALENTES

Debido a que la propuesta inicial contemplaba la administración de equivalentes eléctricos calculados a partir de los parámetros del modelo de impedancia eléctrica y la ley de Archie, optamos por implementar un esquema relacional para almacenar los resultados de cada equivalente eléctrico generado en la aplicación.

Este esquema está dividido en dos grandes grupos: Uno donde se almacenan los datos del modelo geológico, y el otro contiene los resultados de la implementación del AMIE sobre los yacimientos procesados en la aplicación.

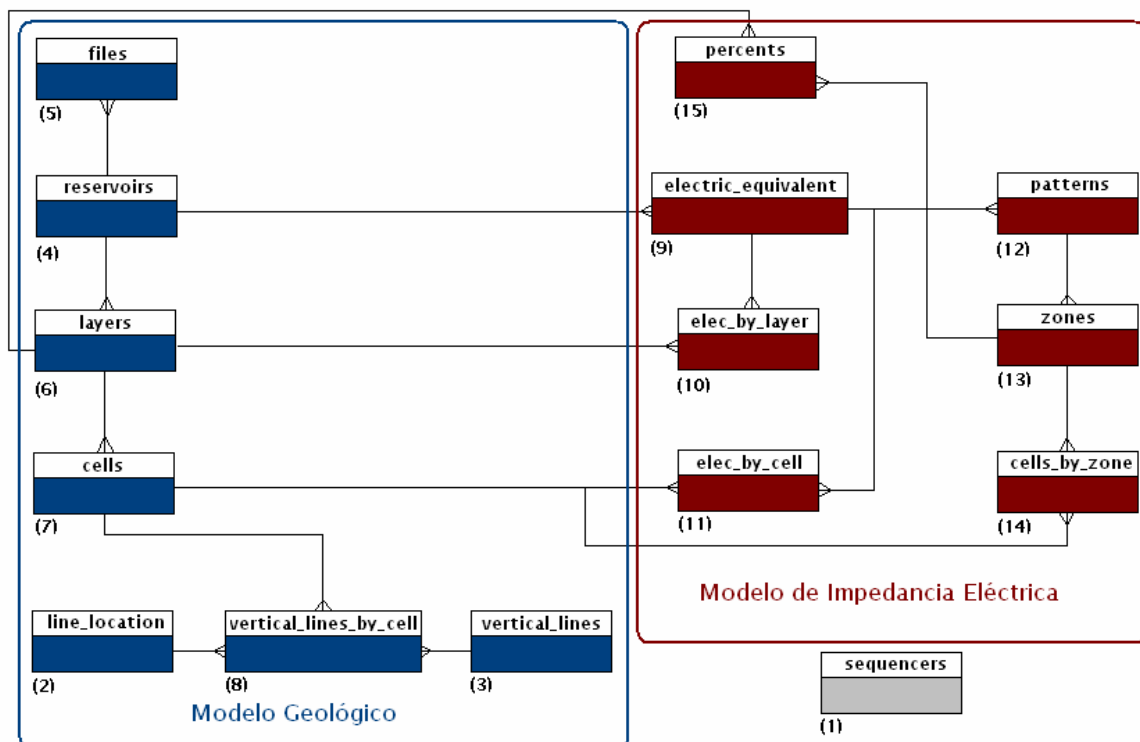


Figura 29. Esquema relacional de la base de datos de la aplicación.

En el Anexo A y B se encuentra este esquema detalladamente y el diccionario de datos para una mayor comprensión.

Como nota técnica adicional recalamos que el proceso de caracterización de los yacimientos está implementado en el lado de la aplicación y no del lado de la base de datos

Al principio se realizaron pruebas de tiempo caracterizando el yacimiento del lado de la base de datos, pero los tiempos de respuesta eran muy altos en comparación que si se hacía del lado de la aplicación (alrededor de 17 veces más rápido). Hicimos una prueba con un yacimiento y aplicamos el AMIE del lado de la aplicación y la base de datos, arrojándonos los siguientes tiempos de respuesta al usuario.

Tabla 3. Tiempos de respuesta

| Aplicación del AMIE | Tiempo de respuesta (segundos) |
|------------------------------|---------------------------------------|
| Del lado de la Base de datos | 53 segundos |
| Del lado de la Aplicación | 3 segundos |

Otra razón por la cual optamos en dejar el proceso de caracterización del lado de la aplicación fue la interoperabilidad. Al dejar un esquema relacional usando sentencias SQL estandarizadas que reconocen la mayoría de los Sistemas Manejadores de Bases de Datos, dejamos una puerta abierta para la selección del proveedor de Bases de Datos y no forzamos el funcionamiento de la aplicación a un proveedor en particular.

Las sentencias SQL implementadas en la aplicación siguen el estándar ANSI SQL-92 que garantiza que la mayoría de los Sistemas Manejadores de Bases de Datos reconocen las sentencias SQL sin ninguna modificación alguna. Esto quiere decir que la aplicación puede funcionar con otra base de datos siempre y cuando al driver JDBC sea proporcionado y se configuren los datos referentes a la conexión.

4.5 ANÁLISIS DEL SISTEMA

A continuación se presenta el análisis del sistema por medio de casos de uso

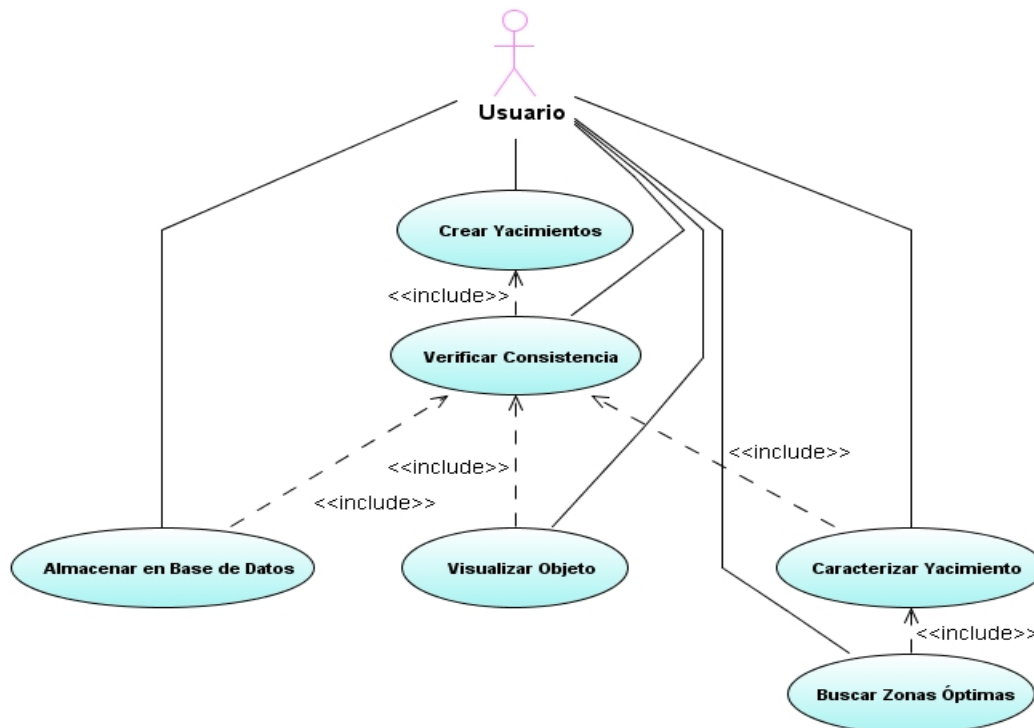


Figura 30. Diagrama de Casos de Uso de RECH.

| Crear Yacimientos | |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Actor | Usuario. |
| Propósitos | Crear un yacimiento. |
| Resumen | Por medio de este caso de uso el actor carga o remover el archivo o archivos en donde están almacenadas las propiedades del yacimiento. |
| Flujo principal | 1. El actor agrega el archivo. 2. El actor ubica el archivo o archivos y genera el Yacimiento. 3. El sistema agrega el archivo. 4. El Sistema genera el yacimiento usando los archivos cargados previamente. 1a. El actor remueve el archivo del sistema. El sistema regresa al módulo principal. |
| Precondición | Ninguna. |

| Verificar Consistencia | |
|-------------------------------|--------------------------------------------------|
| Actor | Usuario. |
| Propósitos | Verificar la consistencia de las propiedades del |

| | |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | yacimiento para hallar satisfactoriamente el equivalente. |
| Resumen | Por medio de este caso de uso el actor modifica en caso de ser necesaria la consistencia de las propiedades del yacimiento para caracterizar. El yacimiento es consistente si y solo si cada celda del mismo posee valores válidos para las propiedades: Porosidad, Presión, Saturación de Aceite y Agua. |
| Flujo principal | <ol style="list-style-type: none"> 1. El actor verifica en las propiedades del yacimiento la consistencia. 2. El sistema convierte en consistente las propiedades promediándolas capa por capa. |
| Precondición | Debe haber un yacimiento creado y cargado. |

| Caracterizar Yacimiento | |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Actor | Usuario. |
| Propósitos | Crear un equivalente eléctrico. |
| Resumen | Por medio de este caso de uso el actor crea el equivalente eléctrico según las especificaciones que asigna en los parámetros del AMIE y la Ley de Archie. |
| Flujo principal | <ol style="list-style-type: none"> 1. El actor verifica la consistencia del yacimiento. 2. El actor establece los parámetros necesarios para caracterizar el yacimiento. 4. El sistema caracteriza el yacimiento. El sistema regresa al módulo principal. |
| Precondición | Debe estar creado el yacimiento con las propiedades petrofísicas y su geometría Debe ser validada su consistencia. |

| Buscar Zonas Óptimas | |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Actor | Usuario. |
| Propósitos | Identificar las zonas de acuerdo al patrón de búsqueda seleccionado. |
| Resumen | Por medio de este caso de uso el actor define el patrón de búsqueda indicado para la identificación de las zonas a analizar. |
| Flujo principal | <ol style="list-style-type: none"> 1. El actor selecciona el equivalente eléctrico 2. El actor determina el patrón de búsqueda. 3. El sistema identifica las zonas de acuerdo al patrón aplicado. 4. El actor puede almacenar la zona de interés. |
| Precondición | Debe haber un equivalente eléctrico creado. |

| Visualizar Objeto | |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Actor | Usuario |
| Propósitos | Visualizar un objeto del modelo geológico (malla, capa) o del MIE (malla, capa, zona). |
| Resumen | Por medio de este caso de uso el actor puede visualizar el yacimiento completo, capas específicas, zonas óptimas de equivalentes eléctricos de acuerdo a sus propiedades geológicas y eléctricas. |
| Flujo principal | <ol style="list-style-type: none"> 1. El actor ingresa al visualizador de objetos. 2. El actor selecciona el tipo de objeto a visualizar. 3. El actor define la propiedad a visualizar. 4. El actor define el intervalo de visualización. 5. El sistema genera la representación visual del objeto |
| Precondición | Debe haber un yacimiento creado. El yacimiento debe ser consistente |

| Almacenar en Base de Datos | |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Actor | Usuario |
| Propósitos | Mantener un repositorio de equivalentes para análisis futuro y tener la información en almacenamiento persistente |
| Resumen | Por medio de este caso de uso el actor puede almacenar un yacimiento con su modelo de impedancia eléctrica en la base de datos. |
| Flujo principal | <ol style="list-style-type: none"> 6. El actor ingresa al visualizador de objetos. 7. El actor selecciona el tipo de objeto a visualizar. |
| Precondición | Debe haber un yacimiento creado. El yacimiento debe ser consistente |

5. TECNOLOGÍAS USADAS EN RECH



RECH (**R**eservoir **E**lectric **C**haracterize) es un software cliente/servidor desarrollado bajo la plataforma Java y la base de datos Postgres, que implementa el Algoritmo del Modelo de Impedancia Eléctrica para caracterizar reservas petroleras. La idea inicial del surgimiento de RECH fue la elaboración de un software que fuera capaz de analizar las propiedades petrofísicas de una formación, se le aplicara el algoritmo del modelo de impedancia eléctrica (AMIE) usado para calcular equivalentes eléctricos de la formación, dándonos una aproximación de las propiedades eléctricas que posee la tierra, como la Impedancia, la Resistencia en DC (corriente continua), el Calor Específico, la Densidad de masa del sistema roca-fluido, y otras variables eléctricas.

Estos equivalentes eléctricos, llamados '*mapas eléctricos*' se estudian utilizando un visualizador de yacimientos incluido en el software, que nos permite ver las zonas más aptas del yacimiento de acuerdo a unos parámetros de búsqueda. Estas zonas son los lugares que posee el yacimiento con un alto grado de saturación de aceite y bajos valores de impedancia eléctrica.

Brevemente damos una descripción de cada componente del software RECH.

5.1 MODELO CLIENTE/SERVIDOR

Es la tecnología que proporciona al usuario final el acceso transparente a las aplicaciones, datos, servicios de cómputo o cualquier otro recurso del grupo de trabajo y/o, a través de la organización, en múltiples plataformas. El modelo soporta un medio ambiente distribuido en el cual los requerimientos de servicio hechos por estaciones de trabajo inteligentes o "clientes", resultan en un trabajo realizado por otros computadores llamados servidores¹⁴

¹⁴ <http://www.monografias.com/trabajos24/arquitectura-cliente-servidor/arquitectura-cliente-servidor.shtml>

RECH utiliza el modelo Cliente/Servidor como arquitectura hardware para su ejecución. El software puede estar ubicado en una máquina mientras que la base de datos que administra la información de los equivalentes eléctricos puede estar en otra máquina dentro de una red corporativa. Para que la aplicación pueda acceder a la base de datos, se necesita que ambas máquinas se encuentren dentro de una red, o la base de datos puede estar instalada en la misma máquina donde se encuentra la aplicación.

En la siguiente figura podemos ver el modelo usado por RECH:

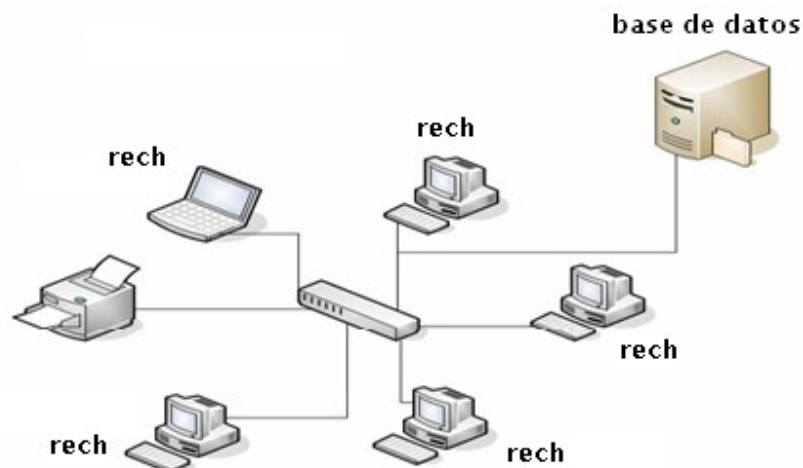


Figura 31. Arquitectura Hardware de RECH.

RECH internamente establece comunicación con la base de datos de equivalentes eléctricos de las reservas de petróleo implementada en Postgres. Esta base de datos es necesaria para el debido funcionamiento de RECH, ya que cada vez que se carga un yacimiento de estudio, o se caracteriza eléctricamente la formación, RECH realiza un seguimiento y permanece conectado a la base de datos mientras se realizan estos procesos.

5.2 JAVA

Uno de los grandes problemas a los que se enfrentan los desarrolladores es la falta de garantía de que si se escribe un programa hoy, mañana funcionará correctamente, e incluso en la misma máquina. Las continuas actualizaciones de los sistemas operativos, procesadores, bases de datos y cambios en los recursos fundamentales del sistema se han de combinar para que los programas sean multifunción. Esto ha sido un reto a la hora de escoger una tecnología para la implantación.

En este sentido existen dos tópicos contrarios: la portabilidad y el rendimiento del software. Se debe escoger el tópico dependiendo de las necesidades del software. Por ejemplo, el software científico, por lo general, es poco portable a diferentes arquitecturas hardware y software, pero su ejecución es considerablemente rápida debido al código compilado que lo conforma.

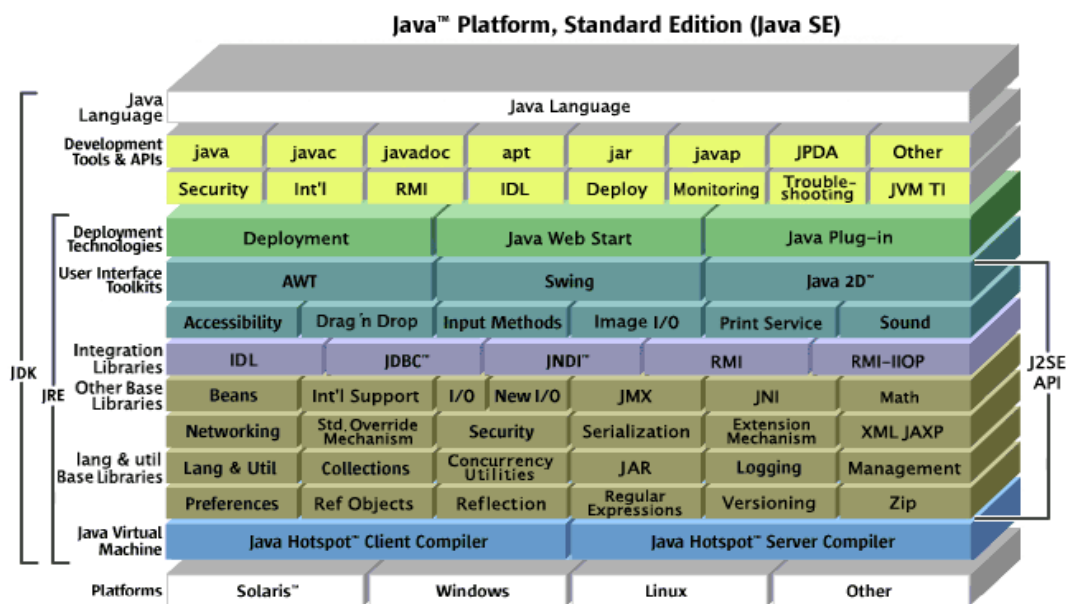


Figura 32 Plataforma Java SE 5 implementada en RECH.

Java es un lenguaje de programación relativamente nuevo desarrollado por Sun Microsystems alrededor de 1990. Las características propias del lenguaje, lo definen como: *Sencillo, Orientado a Objetos, Distribuido, Interpretado, Robusto, Seguro, Arquitectura Neutra, Alto rendimiento, Multihilo y Dinámico.*

Java es interpretado, al contrario de C, C++, Pascal o Fortran. Java permite la creación de programas en plataformas cruzadas, por compilación, en una representación intermedia denominada *Bytecode Java*. Este código puede ser interpretado por cualquier sistema operativo que esté provisto de una máquina virtual Java *JVM*. Esto significa que una aplicación en Java puede ejecutarse en una gama de sistemas operativos como Windows 98/2000/ME/XP, Macintosh, Linux, Solares y Estaciones UNIX siempre y cuando esté provisto de una *JVM*. Los diseñadores de Java tomaron la decisión de ejecutar los programas en la Máquina Virtual Java en un intento de modificar esta situación.

Utilizando Java, los desarrolladores necesitan escribir una única versión para ejecutarse en todas las plataformas, dado que los *Bytecodes* no se corresponden a ninguna máquina específica y trabajan en todas las máquinas.

Sin embargo, los intérpretes Java tienen una seria desventaja sobre los sistemas convencionales: son, normalmente, mucho más lentos en ejecución. En cálculos intensivos el rendimiento de Java cae en un 50% en comparación con los lenguajes convencionales como C, C++ y Fortran para fines científicos. Esto se compensa en la escritura de programas, ya que aun así hay que hacerles mantenimiento. Innovaciones recientes en el mundo Java han avanzado sobre las ideas de los intérpretes y han aparecido compiladores JIT (*just-in-time*) que traducen dinámicamente los *Bytecodes* en código nativo del procesador realmente usado, y lo guarda en una caché, para su reutilización, y con ello obtener una gran eficiencia de ejecución.

Sun Microsystems es propietaria de Java; sin embargo, numerosos fabricantes contribuyen a la mejora y desarrollo de las especificaciones de estándar. *Sun* proporciona las licencias de esta tecnología, pero ejerce siempre un control sobre las implementaciones que se hacen de la misma, con el objetivo de mantener la independencia de la plataforma. *Sun* ofrece Kits de desarrollo como el JDK (*Java Development Kit*), y algunos IDE (*Integrated Development Environment*) de manera gratuita descargándolos de la página de Sun¹⁵. Además de los Kits de desarrollo de Java, existen docenas de herramientas comerciales de desarrollo para los diseñadores de Java. Entre ellos está:

- ✚ **Visual Café**. Proporcionado por **Symantec**. Se necesita comprar licencia de uso.
- ✚ **JBuilder**. Proporcionado por **Borland**. Se necesita comprar licencia de uso
- ✚ **Visual Age for Java**. Proporcionado por **IBM** Se necesita comprar Licencia de uso.
- ✚ **NetBeans**. Proporcionado por **Netbeabs Foundation**. De licencia gratuita.
- ✚ **Java Studio Enterprise**. Proporcionado por Sun **Microsystems**. De licencia gratuita.
- ✚ **JCreator Pro**. Proporcionado por **Xinox Software**. Se necesita comprar Licencia de uso.
- ✚ **Visual J++**. Proporcionado por Microsoft. Se necesita comprar Licencia de uso.

¹⁵ www.sun.com.co

5.3 JAVA3D

El API Java 3D es un interface para escribir programas que muestran e interactúan con gráficos tridimensionales. Java 3D es una extensión estándar del JDK 2 de Java. El API Java 3D proporciona una colección de constructores de alto-nivel para crear y manipular geometrías 3D y estructuras para dibujar esta geometría. Java 3D proporciona las funciones para creación de imágenes, visualizaciones, animaciones y programas de aplicaciones gráficas 3D interactivas¹⁶.

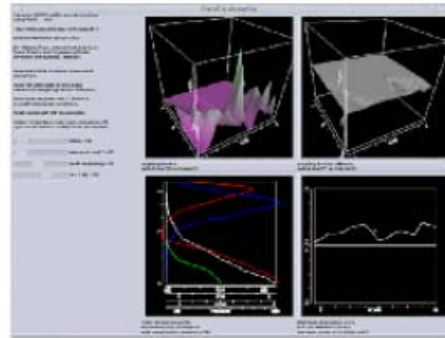
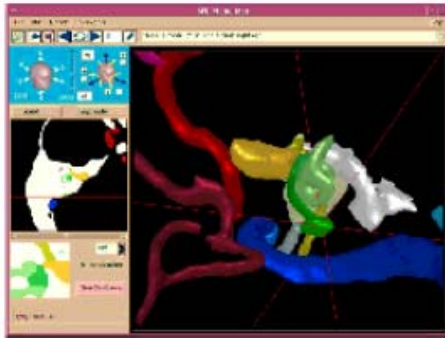


Figura 33. Aplicaciones desarrolladas en Java3D (Visualización de tejidos y científica).

RECH utiliza Java3D para el proceso de visualización de los objetos del yacimiento. Como se está analizando datos en grandes cantidades se hizo necesario desarrollar un módulo de visualización que está integrado en la aplicación. La visualización de las propiedades del yacimiento y las variables del modelo de impedancia eléctrica del mismo son responsabilidad de este módulo.

Debido a que Java no depende del hardware subyacente, se hizo necesario utilizar Java3D para interactuar con las librerías gráficas del hardware de video. En la sección '**Caso de Estudio: Tello**' se puede apreciar la implementación de este módulo.

5.4 OPENGL

OpenGL es una especificación estándar que define una API multilenguaje y multiplataforma para escribir aplicaciones que produzcan gráficos 2D y 3D. Fue desarrollada por Silicon Graphics Inc. (SGI) en 1992.

¹⁶ <http://programacion.com/java/tutorial/3d/1/>

Su nombre viene del inglés Open Graphics Library, cuya traducción es biblioteca de gráficos abierta (o mejor, libre, teniendo en cuenta su política de licencias). OpenGL se utiliza en campos como CAD, realidad virtual, representación científica y de información, simulación de vuelo o desarrollo de videojuegos, en el que su principal competidor es Direct3D de Microsoft Windows¹⁷.




OpenGL es una API basada en procedimientos de bajo nivel que requiere que el programador dicte los pasos exactos necesarios para renderizar una escena. Esto contrasta con las APIs descriptivas, donde un programador sólo debe describir la escena y puede dejar que la biblioteca controle los detalles para renderizarla. El diseño de bajo nivel de OpenGL requiere que los programadores conozcan en profundidad la **pipeline** gráfica, a cambio de la libertad ofrecida en la implementación de algoritmos novedosos de renderizado. OpenGL ha influido en el desarrollo de las tarjetas gráficas, promocionando un nivel básico de funcionalidad que actualmente es común en el hardware comercial

RECH utiliza Java3D para establecer comunicación con las tarjetas graficadoras que poseen OpenGL o DirectX como librería de renderizado. RECH no manipula directamente OpenGL puesto que Java3D permite la interoperabilidad de la aplicación. La aceleración gráfica por software es más lenta que la aceleración por hardware. Por tanto es recomendable tener una máquina que posea aceleración gráfica para optimizar el proceso de visualización y reducir el tiempo de respuesta hacia el usuario.

5.5 BASES DE DATOS

Una base de datos es una colección de información relacionada con un tema particular, facilitando la organización, manejo, seguridad y velocidad de los datos en el desarrollo de una aplicación.

Componentes de una Base de datos

-  **Hardware:** Se constituye por los dispositivos de almacenamiento (disco).
-  **Software:** Es el sistema de administración de la base de datos (DBMS).
-  **Datos:** Son los datos almacenados de acuerdo a la estructura externa y que van a ser procesados para ser información.

¹⁷ <http://es.wikipedia.org/wiki/OpenGL>

Tipos de usuarios en una Base de datos

- ✚ **Usuario Final:** Ve los datos convertidos en información.
- ✚ **Desarrollador de aplicaciones:** Desarrolla los programas que interaccionan con la base de datos.
- ✚ **Administrador de la base de datos:** Es el encargado de realizar el mantenimiento periódico asegurando la seguridad, consistencia, disminución de la redundancia

Principales funciones de una Base de datos

- ✚ Definir las estructuras para el almacenamiento de los datos.
- ✚ Proveer mecanismos para la manipulación de la información (Acceso, validación y actualización de los datos).
- ✚ Implementar mecanismos de seguridad que garanticen la integridad de la información.
- ✚ Flexibilidad para modificar los requerimientos en cualquier momento.

Ventajas de las Bases de datos

- ✚ **Control sobre la redundancia de los datos:** Se evita el almacenamiento múltiple de un dato favoreciendo el espacio en disco y las actualizaciones.
- ✚ **Consistencia de los datos:** Al reducir la redundancia también disminuye el riesgo de tener inconsistencia en los datos.
- ✚ **Compartición de datos:** La base de datos puede ser compartida por todos los usuarios y cada aplicación que se cree puede utilizar los datos almacenados en la base de datos.
- ✚ **Mantenimiento de estándares:** Estándares establecidos para el formato de los datos para facilitar su intercambio, pueden ser estándares de documentación, procedimientos de actualización y también reglas de acceso.

PostgreSQL

Es un sistema de gestión de bases de datos objeto – relacional ya que incluye características orientadas a objetos, por ejemplo herencia, tipos de datos funciones, restricciones. Postgresql tiene la capacidad de almacenar grandes cantidades de datos y lograr un manejo de altas tasas de actividad manteniendo la integridad de la información.

Porque utilizar PostgreSQL

Postgresql cuenta con las características adecuadas para mantener la eficiencia al manejar los datos en cualquier aplicación, se adapta a las necesidades del usuario y su gran soporte incluye desde reporte hasta recuperación de fallas, instrucciones sobre como usar cada característica y optimización de consultas.

Postgresql puede ser usado en cualquier tipo de sistema desde los más comunes como por ejemplo de facturación, hasta sistemas científicos o páginas Web.

Historia de PostgreSQL

Postgresql se derivó del proyecto Postgres el cual llevó más de una década de desarrollo, convirtiéndose actualmente en el sistema libre más avanzado, soportando la gran mayoría de transacciones SQL, control concurrente y teniendo interacción con lenguajes de programación como por ejemplo Java, PHP, Python entre otros.

La implementación de Postgres inicio en 1986 liberándose las primeras versiones a unos pocos usuarios. Hacia 1991 se realizó una reimplementación incluyendo una serie de mejoras como una mayor eficiencia en el ejecutor de peticiones. A partir de las siguientes versiones se centraron en la portabilidad del sistema. En 1994 se añadió a este gestor un interprete SQL llamado Postgre95 escrito en C, con un tamaño menor al de Postgres y una mayor rapidez, además de la creación de algunas mejoras respecto a versiones anteriores.

A partir de 1996 se cambió el nombre a postgresql (versión 6.0) y se realizaron modificaciones que lograron mayor eficiencia en versiones posteriores de postgresql.

5.6 DATOS DE INTERÉS

RECH se basa en el estudio de las propiedades de los yacimientos, y proporciona la siguiente funcionalidad:

- ✚ Cargar yacimientos en formato PLANO proporcionados por el software STARS. Esta versión sólo reconoce los enmallados tipo COORD/ZCORN. Los demás tipos de enmallados no están soportados en esta versión.
- ✚ Cargar distribuciones de porosidad, presión y saturaciones de aceite y agua en el yacimiento de estudio.
- ✚ Proporcionar un enfoque orientado al análisis de equivalentes eléctricos. Esto quiere decir que el software puede caracterizar eléctricamente el yacimiento de estudio dependiendo de los parámetros de entrada proporcionados al Algoritmo del Modelo de Impedancia Eléctrica (AMIE).
- ✚ Sólo puede caracterizar yacimientos implementando el AMIE. Esta versión no implementa otros métodos de caracterización.
- ✚ Permite seleccionar zonas de los equivalentes eléctricos estableciendo parámetros de búsqueda en la selección. Esta opción es de vital importancia, ya que nos permite aislar las regiones de mayor relevancia en la formación dándonos una aproximación de donde se encuentra el crudo.
- ✚ Generar archivos de la geometría de la formación, propiedades eléctricas calculadas usando el AMIE, y pueden ser usados por otros paquetes de visualización y análisis espacial.
- ✚ Proporciona una base de datos de equivalentes eléctricos donde se tiene como repositorio de datos para un análisis a futuro. Esta base de datos puede estar instalada en el equipo donde se ejecuta RECH, o puede ser accedida remotamente.
- ✚ Esta desarrollado 100% en Java, lo cual nos brinda un interoperabilidad en entornos hardware no homogéneos. Se puede instalar en equipos Window, Unix, Linux, Solaris, Mac y proporciona la misma funcionalidad ofrecida.

Adicionalmente damos a conocer las siguientes cifras y datos relevantes:

- ✚ Está organizado por 11 paquetes Java programados por funcionalidad.

- ✚ Contiene 68 archivos *.java distribuidos en sus respectivos paquetes.
- ✚ La base de datos está dividida en 15 tablas. (Modelo Geológico y MIE).
- ✚ Contiene aproximadamente 20000 líneas de código programado.
- ✚ Implementa los Patrones de Diseño del Catalogo de Patrones de Software Orientado a Objeto Reutilizables: SINGLETON, FLYWEIGHT y COMPOSITE.
- ✚ Utiliza el generador de Claves Primarias desarrollado por George Reese para permitir independencia de Base de Datos.
- ✚ Desarrollado bajo el IDE Netbeans 5.5.1 por su licencia gratuita y uso extensivo en la industria del software.

6. CASO DE ESTUDIO: TELLO

En sección veremos paso a paso la creación de un proyecto en RECH, consistencia, caracterización, búsqueda de zonas y análisis visual de un yacimiento de estudio. Usaremos el campo petrolero TELLO que posee un modelo geológico de 69690 celdas para evaluar los resultados de la aplicación del AMIE.

La ventana principal de la aplicación es como sigue. Esta dividida en cuatro secciones:

- ✚ Barra de menú
- ✚ Barra de herramientas (Archivo y Procesos)
- ✚ Canvas de detalle
- ✚ Barra de estados



Figura 34. Ventana principal de RECH

RECH internamente establece comunicación con la base de datos de equivalentes eléctricos de las reservas de petróleo implementada en Postgres.

Esta base de datos es necesaria para el debido funcionamiento de RECH, ya que cada vez que se carga un yacimiento de estudio, o se caracteriza eléctricamente la formación, RECH realiza un seguimiento y permanece conectado a la base de datos mientras se realizan estos procesos.

6.1 CREACIÓN DE UN PROYECTO (CARGA DE ARCHIVOS)

Para crear un proyecto en RECH se deben cargar un conjunto de archivos que representan a la formación. Nos dirigimos al menú Archivo/Nuevo yacimiento, o puede dar click en el botón abrir de la barra de herramientas:



Figura 35. Barra de herramientas de RECH

Aparecerá un formulario donde puede agregar el o los archivos que contiene la información necesaria para que RECH reconstruya el yacimiento internamente. El yacimiento puede estar distribuido en varios archivos planos generados por STARS o CMG. Estos archivos poseen una estructura interna que organiza la información del yacimiento en diferentes bloques de datos. Algunos de estos bloques son:

- ✚ **Cabecera del archivo (Contiene información general del yacimiento).**
- ✚ **Bloque de la geometría del yacimiento (Datos provenientes del modelo geológico).**
- ✚ **Bloque de la distribución de porosidad en el yacimiento.**
- ✚ **Bloque de la distribución de saturación de aceite en el yacimiento.**
- ✚ **Bloque de la distribución de saturación de agua en el yacimiento.**
- ✚ Bloque de la distribución de saturación de gas en el yacimiento.
- ✚ **Bloque de la distribución de presiones en el yacimiento.**
- ✚ Bloque referente a datos de las simulaciones de STARS o IMEX.
- ✚ Otros bloques

De todos estos bloques, RECH sólo hace uso de los que están resaltados en negrita. El AMIE necesita estos datos de entrada para realizar las operaciones en aritmética compleja, y poder así calcular un equivalente eléctrico de.

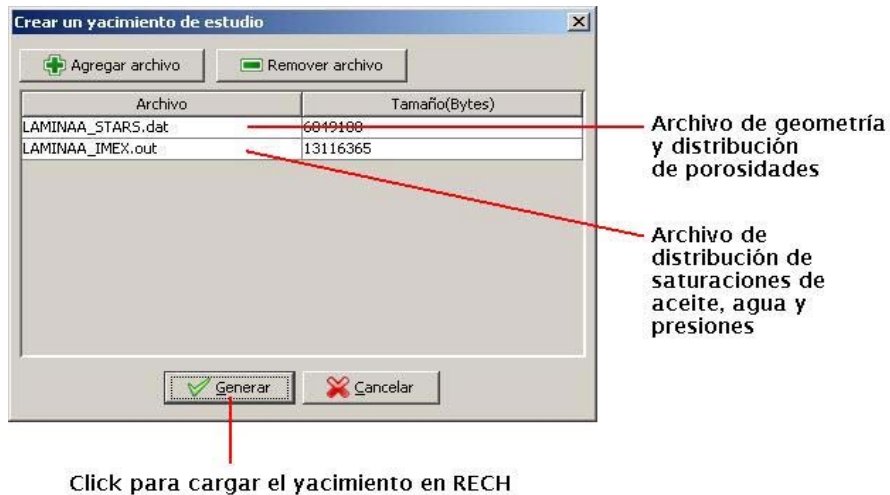


Figura 36. Asistente para la carga de archivos y creación de un yacimiento de estudio.

Es importante tener en cuenta que el proceso de parsing tiene como precondition que el orden de los bloques a extraer por RECH **DEBEN** estar en la secuencia dada anteriormente. Es decir, si en el o los archivos planos no vienen los bloques de datos organizados de esta manera, RECH probablemente no completará el proceso de parsing y generará errores a la hora de cargar el yacimiento de estudio.

Damos click en el botón 'Generar' y esperamos el completamiento del parsing. Aparecerá la siguiente ventana con los resultados del parsing:

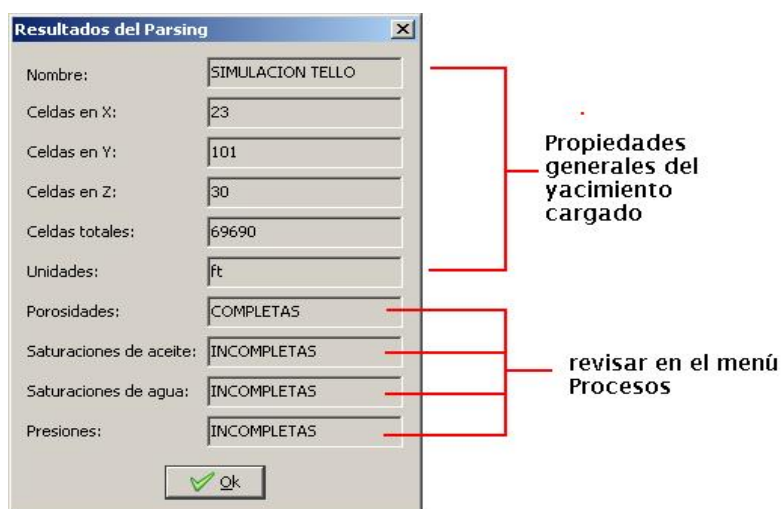


Figura 37. Ventana de resultados del asistente para creación del proyecto.

Note que las propiedades petrofísicas del yacimiento de estudio pueden venir incompletas. Es decir, las distribuciones pueden tener valores lógicos y nulos. Esta inconsistencia se puede resolver más adelante usando una utilidad de RECH para dejar consistente el yacimiento y poder caracterizar la formación. El proceso de caracterización eléctrica requiere que el yacimiento sea consistente en los datos, de lo contrario no se puede aplicar el AMIE. Damos click en el botón 'OK'.

Luego de que RECH pudo realizar la operación de carga con éxito, se puede explorar el yacimiento analizando sus propiedades. RECH empaqueta el yacimiento en un árbol de datos ubicado al lado izquierdo de la aplicación. Este árbol contiene el nombre del yacimiento en el nodo raíz y posee tres hijos: **malla**, **MIE**, **propiedades**.

El nodo 'malla' contiene la información petrofísica, por capas, del yacimiento cargado. Podemos ver las propiedades capa por capa, con valores mínimos, máximos y promedios por cada una de las propiedades petrofísicas (POROSITY, OIL SAT, WAT SAT y PRESSURE). El nodo 'MIE' contiene información relacionada con la caracterización eléctrica del yacimiento y es aquí donde se agrupan los equivalentes eléctricos del yacimiento.

El nodo 'propiedades' contiene información general del yacimiento y del modelo geológico. La siguiente figura lo resume:

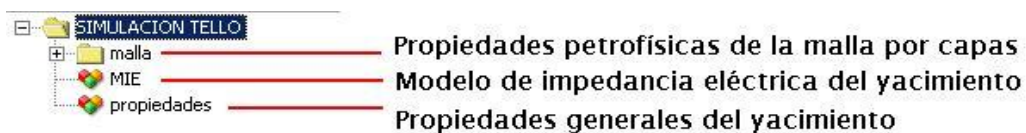


Figura 38. Árbol del proyecto en RECH. Representa el contenido del yacimiento de forma jerárquica

RECH tiene un administrador de ventanas para ver información del yacimiento por capas, equivalentes, patrones de búsqueda y zonas óptimas. Más adelante veremos esto en detalle:

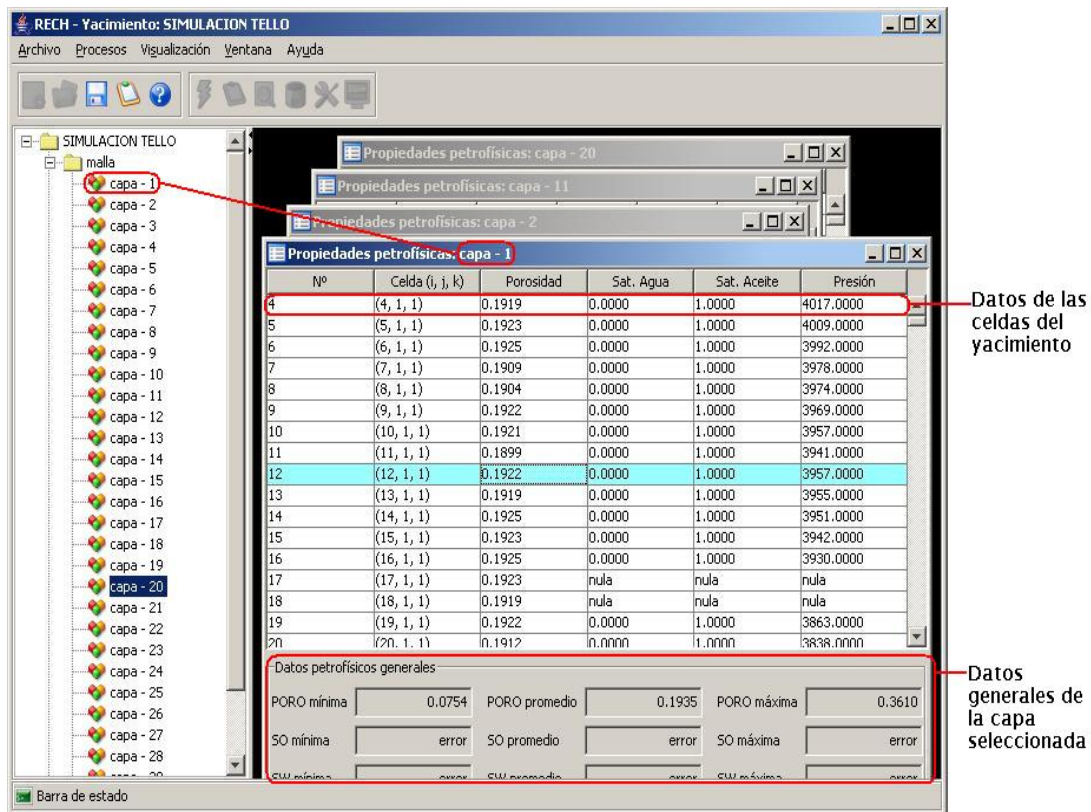


Figura 39. Escritorio de RECH usado para mostrar información por malla, capas, zonas o equivalente

Nótese que podemos ver las propiedades petrofísicas del yacimiento: Porosidades, Presiones y Saturaciones de agua y aceite. Para poder ver las propiedades del yacimiento, seleccionamos en el menú Archivo la opción 'Propiedades del Yacimiento', o en botón de la barra de herramientas:

En la sección inferior hay información referente a la calidad de los datos. Este paso es necesario verificarlo y de mucha importancia, ya que si los datos no son consistentes (falta información en el yacimiento) no se puede caracterizar la formación de estudio.

Propiedades del yacimiento seleccionado

Conjunto de datos del yacimiento

| | | | |
|-----------------------|------------------|--------------------|-------------------|
| Nombre del yacimiento | SIMULACION TELLO | Fecha de creación | 30/07/2007 |
| Celdas en dirección i | 23 | Archivos | LAMINAA_STARS.dat |
| Celdas en dirección j | 101 | Celdas del modelo | 69690 |
| Celdas en dirección k | 30 | Unidad de longitud | ft |

Propiedades petrofísicas de la malla

| | | | | | |
|-------------|--------|---------------|--------|-------------|--------|
| PORO mínima | 0.0162 | PORO promedio | 0.2027 | PORO máxima | 0.4835 |
| SO mínima | error | SO promedio | error | SO máxima | error |
| SW mínima | error | SW promedio | error | SW máxima | error |
| PRES mínima | error | PRES promedio | error | PRES máxima | error |

Observaciones del conjunto de datos

Porosidades: COMPLETAS,
 Saturaciones de aceite: INCOMPLETAS,
 Saturaciones de agua: INCOMPLETAS,
 Presiones: INCOMPLETAS

Annotations:

- Datos generales de la procedencia del yacimiento
- Datos generales petrofísicos del yacimiento cargado (Note la inconsistencia de algunas propiedades)
- Anotaciones relacionadas con la calidad de los datos del yacimiento

Figura 40. Ventana de propiedades petrofísicas del yacimiento.

6.2 CONSISTENCIA DEL YACIMIENTO

Debido a que algunas propiedades petrofísicas del yacimiento pueden venir incompletas, RECH no puede realizar el proceso de caracterización aplicando el AMIE, ya que se requiere que el yacimiento sea consistente en los datos. Un yacimiento es consistente, desde el punto de vista de RECH, cuando las distribuciones de las propiedades petrofísicas están completas y no poseen valores nulos.

Los valores nulos hacen referencia a la ausencia de datos en algunas celdas de la formación, dependiendo de la distribución en la que nos encontremos. Un yacimiento es inconsistente si por lo menos hay una distribución de alguna propiedad petrofísica inconsistente. Como algunos simuladores de yacimientos no calculan para ciertas celdas de la formación los valores correspondientes en las simulaciones, ellos optan por no asociarles valores y dejan algunas propiedades de las celdas vacías.

La siguiente figura muestra una porción de la distribución de saturación de aceite del yacimiento cargado. Note que algunas celdas no poseen valores de saturación asociados y están vacías (valores nulos desde el punto de vista de RECH):

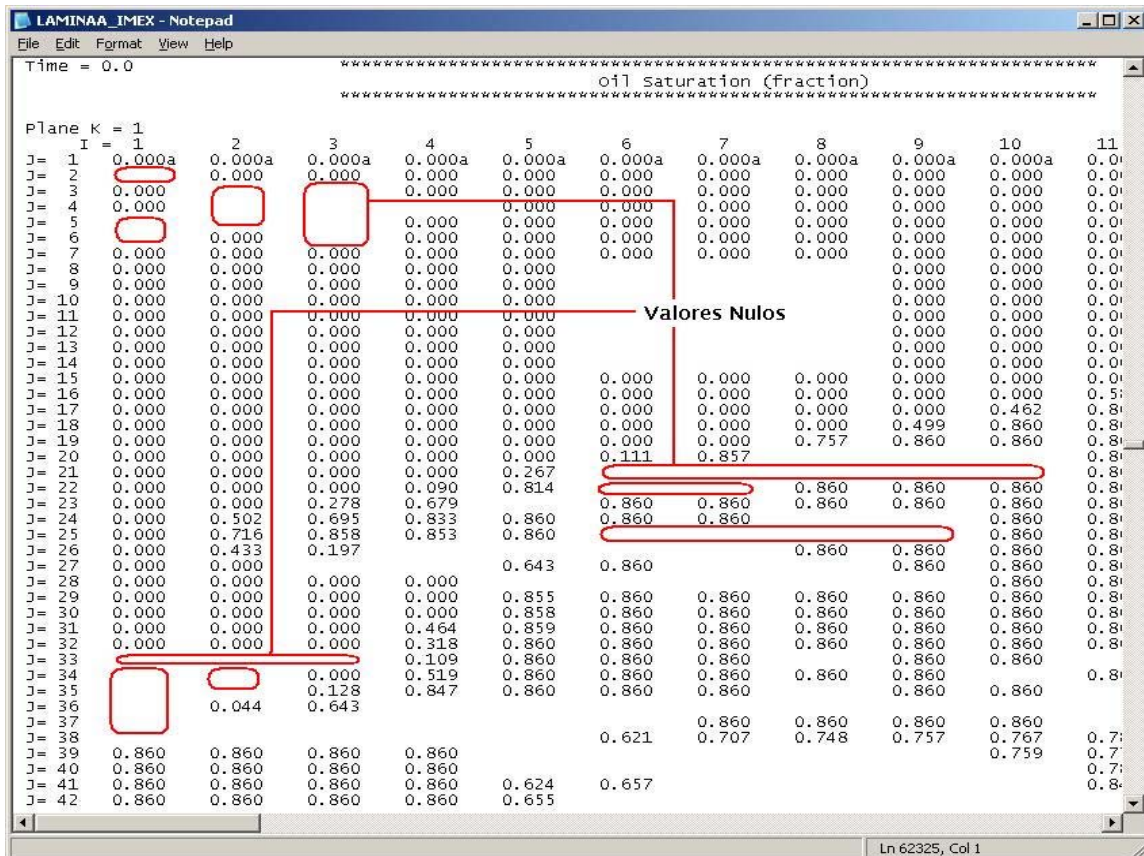


Figura 41. Distribución de Saturación de Aceite inconsistente (desde el punto de vista de RECH).

Para resolver esto, RECH tiene una utilidad para garantizar que el yacimiento sea consistente (si por lo menos vienen algunos datos consistentes en las distribuciones), y de esta manera poder realizar el proceso de caracterización. En el menú 'Procesos' se da click en la opción 'Verificar consistencia del yacimiento'.

Si el yacimiento es consistente, entonces se habilitará el módulo de caracterización para proceder a calcular los equivalentes eléctricos de la formación. Si el yacimiento es inconsistente, entonces vamos al menú 'Procesos' y escogemos la opción 'Resolver Inconsistencia'. Aparecerá el siguiente cuadro de diálogo:

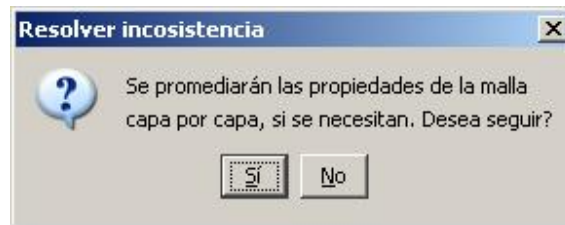


Figura 42. Cuadro de diálogo para verificar la consistencia del yacimiento.

Si le damos 'Si', RECH realiza un promedio capa por capa de cada una de las celdas que poseen valores validos, y asigna este promedio a las celdas que poseen valores nulos. De esta manera se garantiza que todas las celdas que tenían valores nulos poseen valores promediados de acuerdo a la profundidad que se encuentran en sus respectivas capas. Luego de esto se habilita el módulo de caracterización y se puede ver el detalle de las capas ya consistentes:

| Nº | Celda (i, j, k) | Porosidad | Sat. Agua | Sat. Aceite | Presión |
|----|-----------------|-----------|-----------|-------------|-----------|
| 1 | (1, 1, 1) | 0.1922 | 0.0000 | 1.0000 | 4033.0000 |
| 2 | (2, 1, 1) | 0.1919 | 0.0000 | 1.0000 | 4031.0000 |
| 3 | (3, 1, 1) | 0.1922 | 0.0000 | 1.0000 | 4024.0000 |
| 4 | (4, 1, 1) | 0.1919 | 0.0000 | 1.0000 | 4017.0000 |
| 5 | (5, 1, 1) | 0.1923 | 0.0000 | 1.0000 | 4009.0000 |
| 6 | (6, 1, 1) | 0.1925 | 0.0000 | 1.0000 | 3992.0000 |
| 7 | (7, 1, 1) | 0.1909 | 0.0000 | 1.0000 | 3978.0000 |
| 8 | (8, 1, 1) | 0.1904 | 0.0000 | 1.0000 | 3974.0000 |
| 9 | (9, 1, 1) | 0.1922 | 0.0000 | 1.0000 | 3969.0000 |
| 10 | (10, 1, 1) | 0.1921 | 0.0000 | 1.0000 | 3957.0000 |
| 11 | (11, 1, 1) | 0.1899 | 0.0000 | 1.0000 | 3941.0000 |
| 12 | (12, 1, 1) | 0.1922 | 0.0000 | 1.0000 | 3957.0000 |
| 13 | (13, 1, 1) | 0.1919 | 0.0000 | 1.0000 | 3955.0000 |
| 14 | (14, 1, 1) | 0.1925 | 0.0000 | 1.0000 | 3951.0000 |
| 15 | (15, 1, 1) | 0.1923 | 0.0000 | 1.0000 | 3942.0000 |
| 16 | (16, 1, 1) | 0.1925 | 0.0000 | 1.0000 | 3930.0000 |
| 17 | (17, 1, 1) | 0.1923 | 0.6410 | 0.3589 | 3599.1934 |
| 18 | (18, 1, 1) | 0.1919 | 0.6410 | 0.3589 | 3599.1934 |
| 19 | (19, 1, 1) | 0.1922 | 0.0000 | 1.0000 | 3863.0000 |

| Datos petrofísicos generales | | | | | |
|------------------------------|-----------|---------------|-----------|-------------|-----------|
| PORO mínima | 0.0754 | PORO promedio | 0.1935 | PORO máxima | 0.3610 |
| SO mínima | 0.0000 | SO promedio | 0.6410 | SO máxima | 0.8600 |
| SW mínima | 0.1400 | SW promedio | 0.3589 | SW máxima | 1.0000 |
| PRES mínima | 3343.0000 | PRES promedio | 3599.1934 | PRES máxima | 4033.0000 |

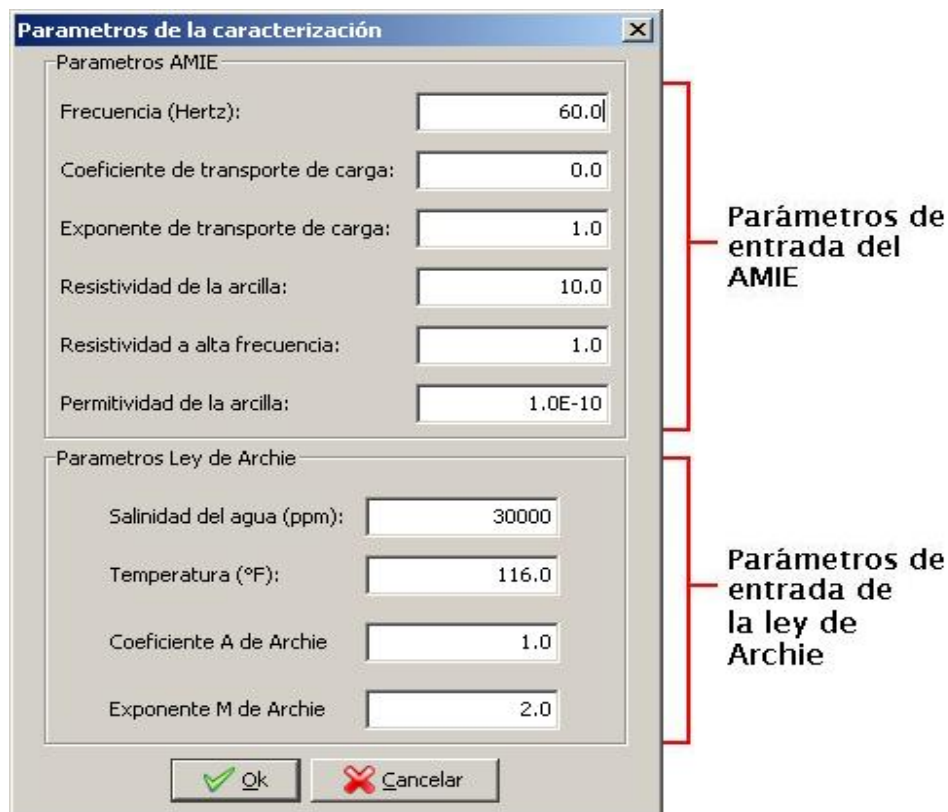
Note que las celdas que tenía valores nulos, ahora poseen los valores promediados de la propiedad analizada

Figura 43. Ventana de Propiedades Petrofísicas después de promediar propiedades

El visualizador de objetos del yacimiento sólo se activa cuando el yacimiento es consistente (Note que se habilita el último icono en la barra de herramientas), de lo contrario no podrá analizar los datos de forma visual.

6.3 CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO (APLICACIÓN DEL AMIE)

RECH permite caracterizar yacimientos aplicando el AMIE. Este algoritmo permite realizar una serie de cálculos en cada celda de la formación y poder tener una representación fidedigna de las propiedades eléctricas del yacimiento. El algoritmo requiere de unos parámetros de entrada, y se pueden configurar dando click en el menú 'Procesos' y seleccionando la opción 'Configuración de parámetros del MIE'. Aparece el siguiente formulario con los valores por defecto de los parámetros de entrada:



| Parametros AMIE | |
|-------------------------------------|---------|
| Frecuencia (Hertz): | 60.0 |
| Coeficiente de transporte de carga: | 0.0 |
| Exponente de transporte de carga: | 1.0 |
| Resistividad de la arcilla: | 10.0 |
| Resistividad a alta frecuencia: | 1.0 |
| Permitividad de la arcilla: | 1.0E-10 |

| Parametros Ley de Archie | |
|---------------------------|-------|
| Salinidad del agua (ppm): | 30000 |
| Temperatura (°F): | 116.0 |
| Coeficiente A de Archie | 1.0 |
| Exponente M de Archie | 2.0 |

Figura 44. Ventana de configuración de parámetros del AMIE y la Ley de Archie.

El proceso de caracterización produce un único equivalente eléctrico del yacimiento. Se pueden tener varios equivalentes eléctricos por cada yacimiento que estemos analizando. Muchos de estos valores son experimentales y deben ser proporcionados de acuerdo a la literatura o pueden venir de estudios realizados en laboratorios en condiciones apropiadas.

Estos parámetros son conocidos por el experto en el campo de la Ingeniería Eléctrica y se deben proporcionar al AMIE para proceder a caracterizar el yacimiento. Esto quiere decir que podemos caracterizar el yacimiento varias veces variando estos parámetros de entrada y tener así un conjunto de equivalentes eléctricos apropiados para el estudio.

Para caracterizar el yacimiento vamos al menú 'Procesos' y seleccionamos la opción 'Calcular equivalente eléctrico', o damos click en el botón que posee un ícono de rayito en la barra de herramientas 'procesos'. Aparecerá el siguiente cuadro de diálogo:



Figura 45. Cuadro de diálogo para aplicar el AMIE al yacimiento usando los actuales parámetros del modelo.

Si le damos en la opción 'Si', RECH toma los valores ya establecidos en la opción 'Configuración de parámetros del MIE' y procede a caracterizar el yacimiento. Este proceso puede tardar algún tiempo prudencial, dependiendo del tamaño del yacimiento cargado. Al final aparece el siguiente cuadro de dialogo confirmando que la caracterización tuvo éxito:



Figura 46. Proceso de caracterización completado.

Luego el árbol del yacimiento es actualizado y el nodo 'MIE' contiene el equivalente eléctrico calculado. Note que este nodo puede tener muchos equivalentes eléctricos y si deseamos eliminar uno de ellos, vamos a la barra de herramientas 'procesos' y damos click en el icono que representa una caja de basura y procedemos a eliminarlo del espacio de trabajo de RECH:



Figura 47. Equivalente Eléctrico agregado al nodo del MIE en el árbol del proyecto.

Los equivalentes son agrupados por capas, al igual que el nodo 'malla', y se puede ver el detalle de cada equivalente capa por capa o en toda la malla. Si expandimos el nodo 'equivalente-1' veremos los resultados distribuidos por capa. Para poder ver los resultados de un equivalente eléctrico calculado nos posicionamos con el Mouse sobre el nodo 'equivalente-x' de interés, y vamos al menú 'Procesos' y seleccionamos la opción 'Propiedades del objeto seleccionado del MIE':

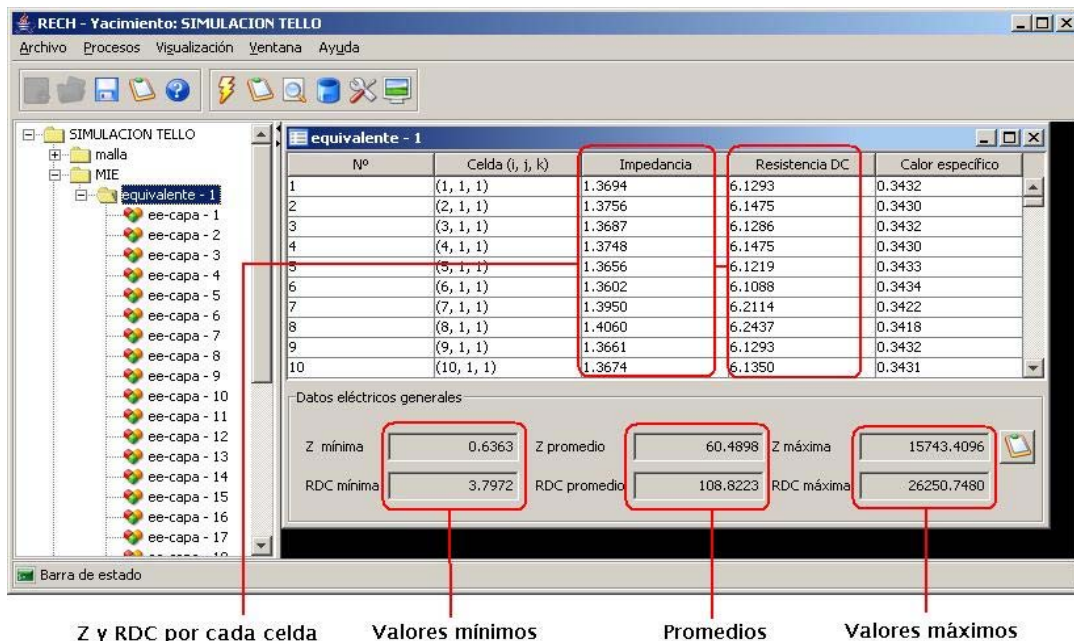


Figura 48. Detalle del Equivalente Eléctrico calculado para el yacimiento.

El AMIE calcula las siguientes variables eléctricas del yacimiento caracterizado (esto es por cada equivalente eléctrico):

- ✚ Magnitud de Impedancia (Z) Ohmios/ULM.
- ✚ Resistencia en DC (RDC) Ohmios/ULM.
- ✚ Calor específico.
- ✚ Densidad de masa del sistema roca-fluido.
- ✚ Conductividad térmica.
- ✚ Permitividad.

Donde ULM es la unidad de longitud del modelo geológico. El AMIE no depende de la unidad de longitud para su implementación. Podemos tener una lista de equivalentes eléctricos y escoger los mejores de acuerdo a las variaciones de los parámetros de entrada del AMIE:

6.4 PATRONES DE BUSQUEDA

Después de caracterizar el yacimiento, RECH tiene una utilidad para seleccionar las zonas de interés. Esto se logra aplicando patrones de búsqueda en los equivalentes calculados. Estas zonas se basan en dos principios aplicados por RECH a la hora de discretizar el yacimiento por sectores:

- ✚ Que las celdas posean valores altos de saturación de aceite. Esto significa que las celdas que posean estos valores, son las celdas que probablemente poseen una buena concentración de crudo, ignorando algunas otras propiedades de la tierra.
- ✚ Que las celdas posean valores bajos de impedancia eléctrica. Esto significa que las celdas que posean estos valores, son las celdas que probablemente poseen una concentración de agua baja, y esto es adecuado, ya que la corriente eléctrica siempre pasa por las celdas que posean menos resistencia al paso de los electrones.

Para poder aplicar un patrón de búsqueda hay que rellenar los siguientes parámetros del formulario. Primero vamos al menú 'Procesos' y seleccionamos la opción 'Buscar zonas óptimas del equivalente'; o también puedes seleccionar el botón con el ítem en forma de lupa en la barra de herramientas 'proceso':

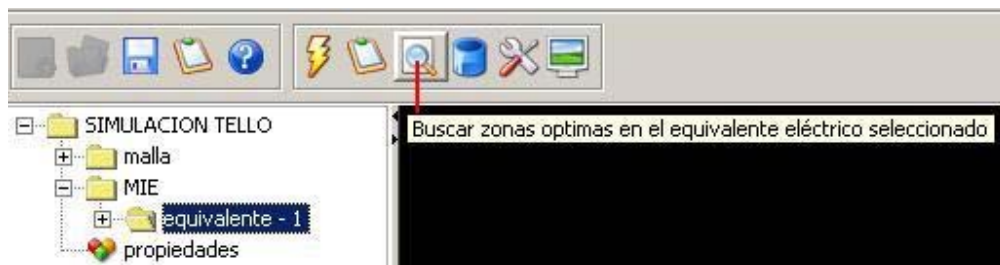


Figura 49. Botón para aplicar algoritmo de búsqueda multicriterio

Después aparecerá la siguiente ventana de dialogo para configurar los parámetros de entrada del patrón de búsqueda a aplicar. Es necesario que estemos posicionados sobre el nodo 'equivalente-x' de interés:

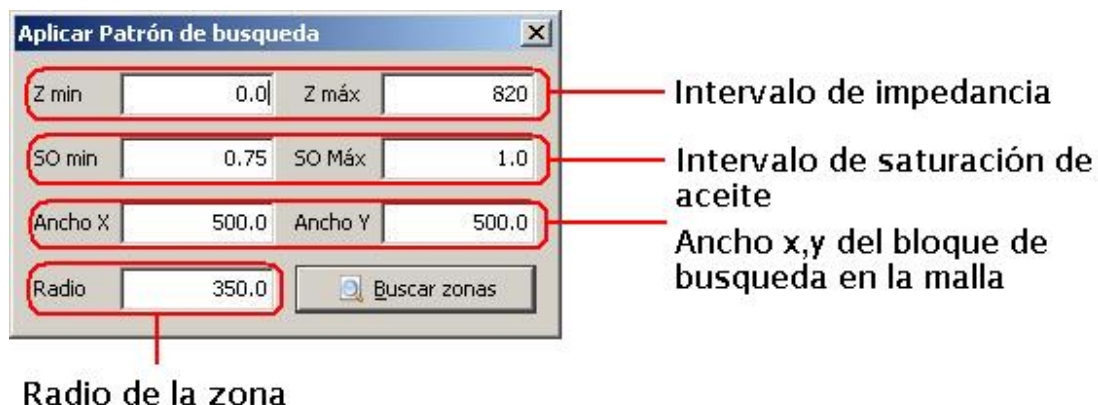


Figura 50. Detalle del Equivalente Eléctrico calculado para el yacimiento.

Estos parámetros se definen en la siguiente figura. Los intervalos de impedancia [Zmin, Zmax] y saturación de aceite [Somin, SOfmax] determinan cuales son las celdas que se encuentran en este umbral dentro de las zonas encontradas. Cuando se aplica un patrón de búsqueda sobre un equivalente pueden encontrarse muchas zonas en el yacimiento que cumplan con este criterio de selección. El ancho en (x, y) determina las dimensiones del rectángulo de la grilla de búsqueda aplicado al yacimiento.

Este rectángulo es bidimensional y la búsqueda se hace en el plano XY del yacimiento para cada capa, ya que las profundidades del mismo se encuentran en las mismas líneas verticales que atraviesan la geometría del yacimiento:

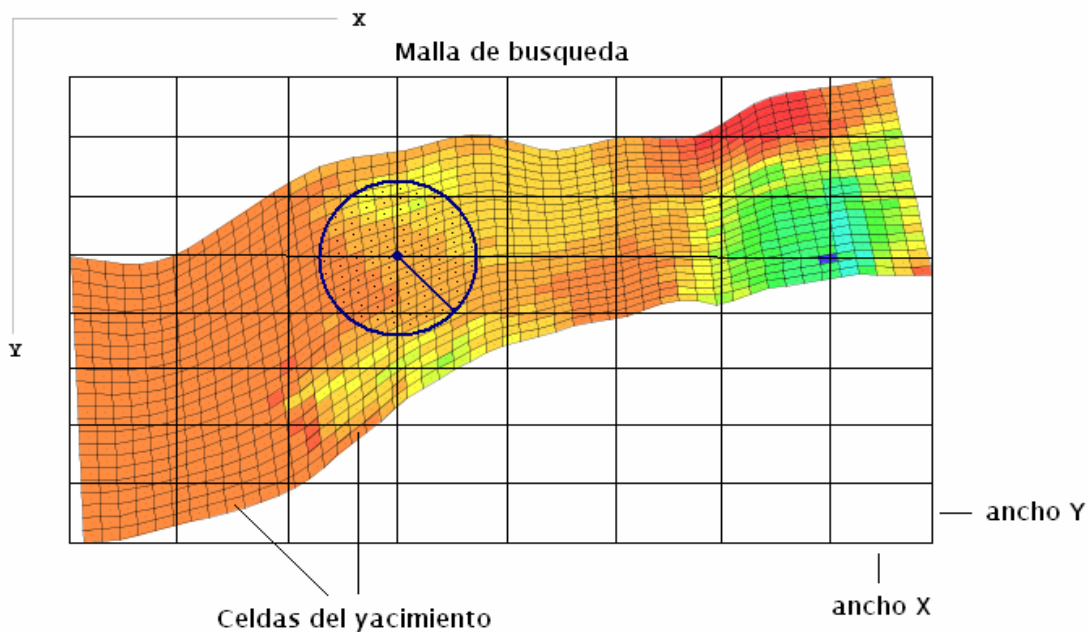


Figura 51. Significado de las variables de entrada del algoritmo de búsqueda multicriterio.

Los puntos de la malla que se encuentren fuera de los límites del yacimiento (puntos de color verde) no se consideran en la aplicación del patrón de búsqueda del equivalente eléctrico, y se aíslan en el cálculo de las zonas. Luego de aplicar el patrón al equivalente, podemos ver en la estructura que un nodo 'Patrón - 1' se agregó al equivalente de interés.

Se pueden tener muchos patrones por cada equivalente, y pueden ser considerados por el usuario final estudiándolos o eliminados de la estructura. Podemos ver las zonas calculadas en el patrón y el detalle de estas dando doble click sobre un nodo 'zona-x' o presionamos <ENTER> sobre el nodo actual en la estructura. Note que se tienen la cantidad de celdas óptimas en la zona, celdas no óptimas, total de celdas de la zona, porcentajes de eficiencia de la zona y datos por cada capa de la misma, intervalos de impedancia y saturación de aceite, el centroide 3D de la zona, número de rectángulos del patrón, y otras propiedades:

Para este caso establecemos el intervalo de Impedancia a $[0, 820]$ Ohmios/ULM y el valor de Saturación de Aceite a $[0.75, 1]$ y un radio para la zona de 350 ULM (en este caso pies puesto que los datos vienen medidos en pies)

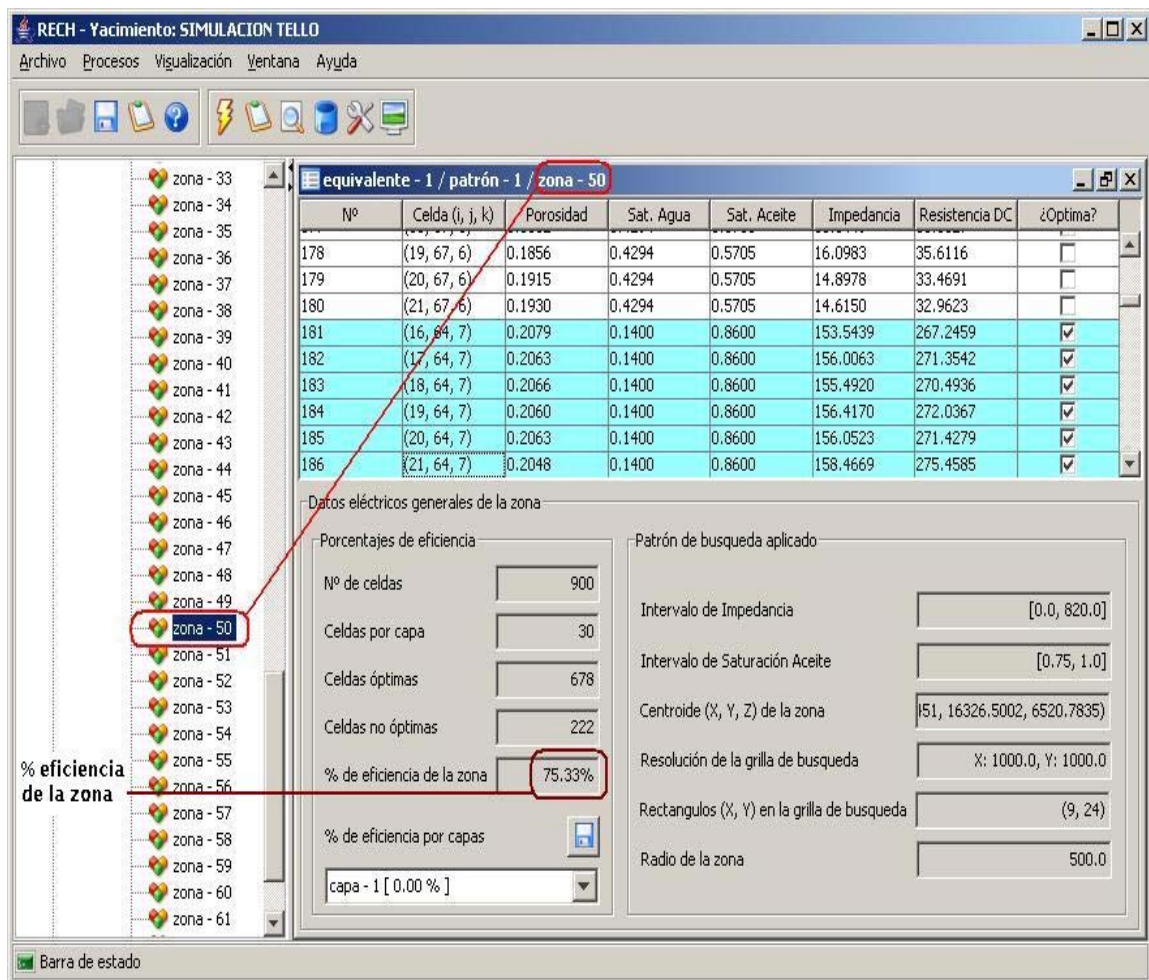


Figura 52. Detalle de una Zona Óptima en el equivalente calculado.

Estas zonas se guardan dando click sobre el botón con el ícono del diskette. Se almacenará en el directorio proporcionado por el usuario. Fíjese que las celdas óptimas aparecen con un checkbox activado y las no-óptimas desactivado.

Para salvar el yacimiento total, podemos ir a la opción 'Archivo' y seleccionar la opción 'Guardar yacimiento'. RECH internamente lo almacena con una extensión '.rech'. Estos archivos son serializados y pueden ser enviados a través de la red a otros entornos operativos que posean la aplicación RECH.

6.5 VISUALIZAR EL YACIMIENTO Y LOS RESULTADOS DEL AMIE

RECH tiene un módulo adicional para analizar los procesos relacionados con la caracterización eléctrica del yacimiento de forma visual. Hoy en día el análisis visual de la información cobra mayor importancia en todas las empresas, ya que proporciona un marco de trabajo donde se tienen diversos recursos multimedia para llevar a cabo tal procesamiento. El módulo del visualizador de objetos de RECH sólo está activo cuando un yacimiento, por lo menos, es consistente:

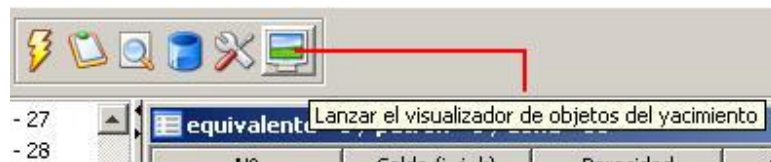


Figura 53. Botón para activar el módulo de visualización.

Se lanzará el visualizador de objetos del yacimiento de estudio. Para generar el contenido visual del yacimiento actual, procedemos a dar click en el botón Generar. Inmediatamente RECH creará el contenido visual del yacimiento, incluyendo el análisis eléctrico del yacimiento agrupados por equivalentes. Esta operación puede tardar algunos minutos dependiendo del tamaño del modelo cargado en RECH. Un yacimiento de 70000 celdas puede ser renderizado, sin ninguna tarjeta aceleradora de gráficos, en unos 8 minutos. Si se tiene un hardware de video adecuado, este tiempo disminuye. Hay que tener en cuenta que podemos generar unas cuantas capas del modelo por cuestiones de rendimiento, y esto lo hacemos dando click en el botón 'Generar':

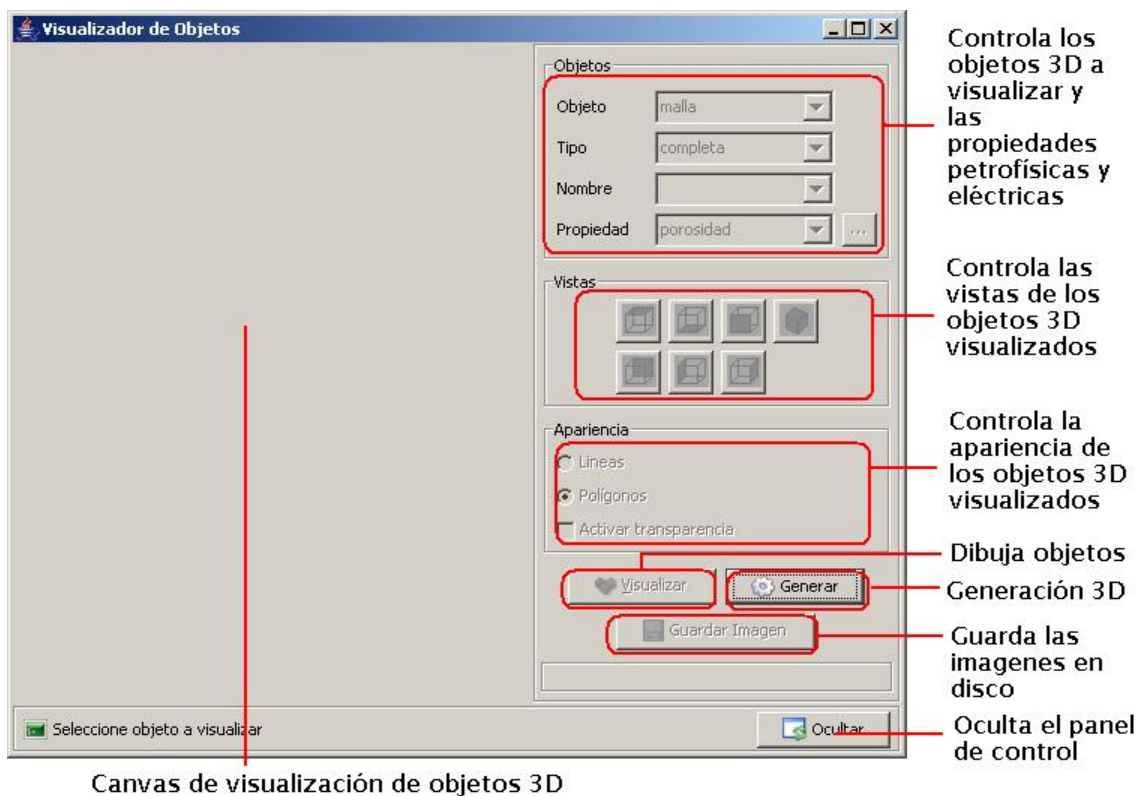


Figura 54. Ventana del módulo de visualización de RECH.

Por defecto el visualizador muestra la distribución de porosidad del yacimiento. Se puede cambiar la escala de visualización dando click con el Mouse en el botón '!...!'. Los objetos soportados por el visualizador se organizan en dos grandes grupos: Propiedades petrofísicas y propiedades eléctricas. En el primero se pueden ver las distribuciones de porosidad, saturación de aceite, agua y presión de la formación de estudio. En este grupo sólo cubija los objetos de tipo:

- ✚ Malla completa.
- ✚ Análisis capa a capa de la malla.

En el segundo grupo se encuentran las propiedades de impedancia eléctrica, resistencia en DC y celdas óptimas. En este grupo sólo cubija los objetos de:

- ✚ Malla completa.
- ✚ Análisis capa a capa de la malla.
- ✚ Análisis por patrones de búsqueda (incluye las zonas por cada patrón).

La siguiente figura muestra la distribución de porosidad de la malla completa (usando la vista isométrica y apariencia sólida sin transparencias):

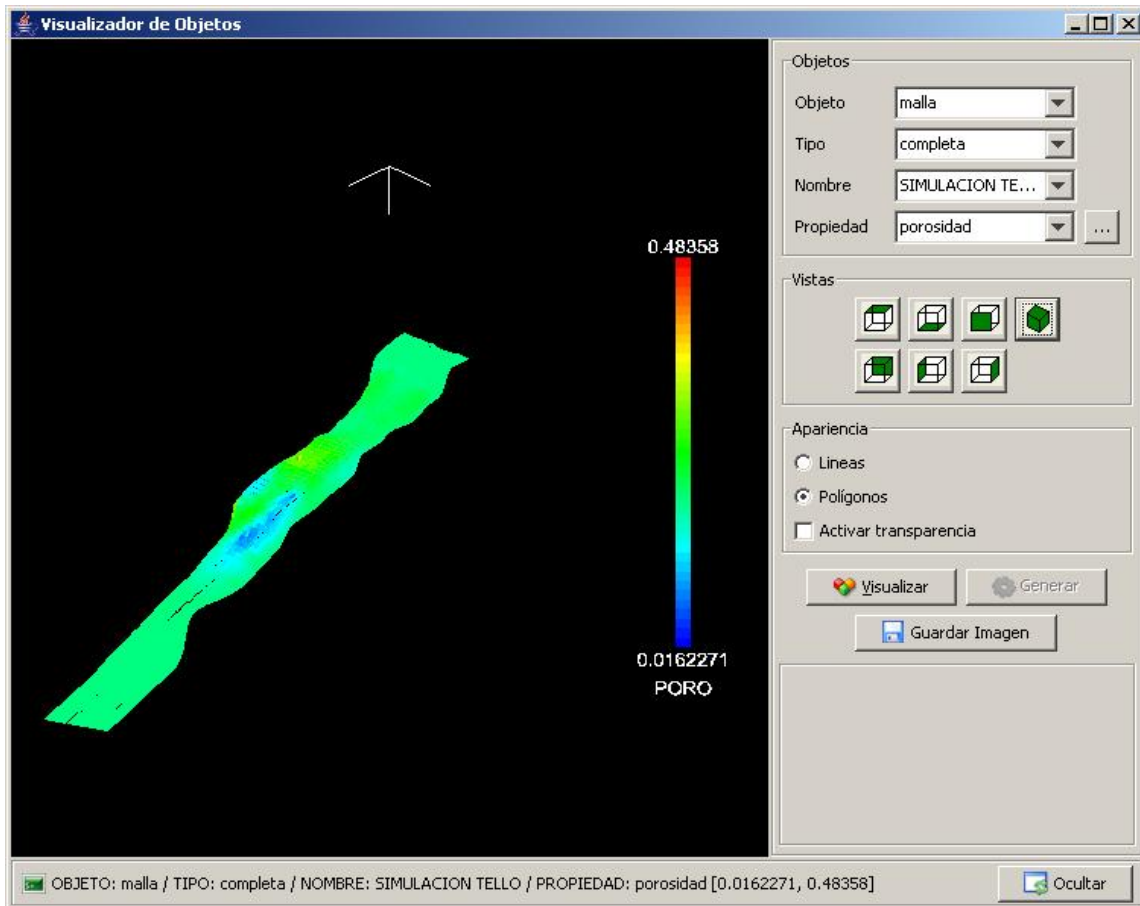


Figura 55. Distribución de porosidad de TELLO en la escala [0.0162271, 0.48358].

Nótese que el yacimiento es irregular en su geometría y bastante delgado en profundidad. La porosidad total de la formación oscila alrededor de 0.2, lo cual quiere decir que la mayor parte del yacimiento es poco poroso (con respecto al valor 1 y no al límite del intervalo de porosidad).

La siguiente figura muestra la distribución de presión de la malla completa (usando sólo líneas en el contorno de las celdas). El módulo de visualización permite modificar las propiedades relacionadas con la apariencia de los objetos visualizados. Esta apariencia es asociada por cada celda de la formación y pueden verse como líneas o polígonos que delimitan el contorno de la celda.

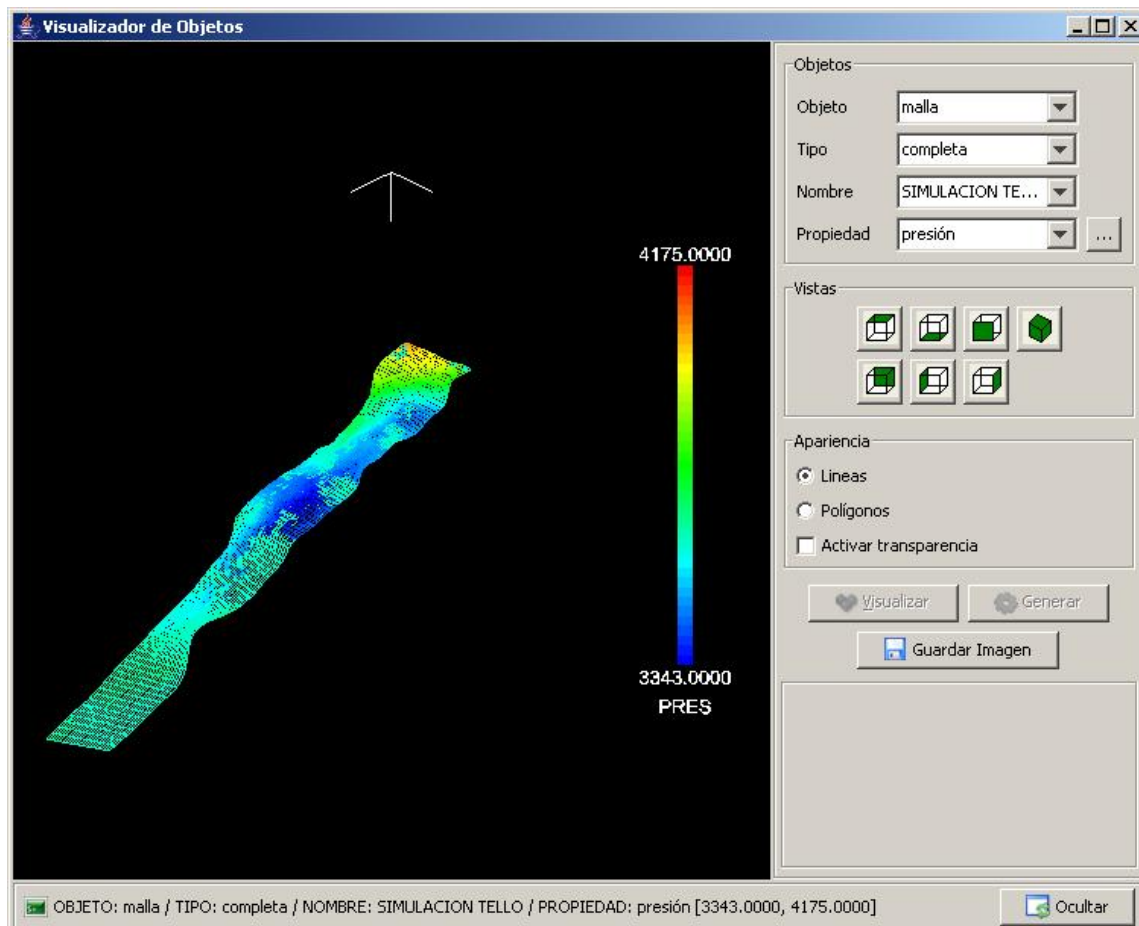


Figura 56. Distribución de presión de TELLO en la escala [3343, 4175] psia.

En la visualización de la distribución de presión se puede apreciar con más exactitud la naturaleza física de la formación. En la esquina superior izquierda del yacimiento la presión es un poco más elevada que en el resto de la formación.

Ahora procedemos a visualizar la distribución de Saturación de Aceite en la escala calculada para TELLO [0, 0.86]. Configuramos la apariencia del yacimiento a sólidos y la vista desde arriba en el plano XY:

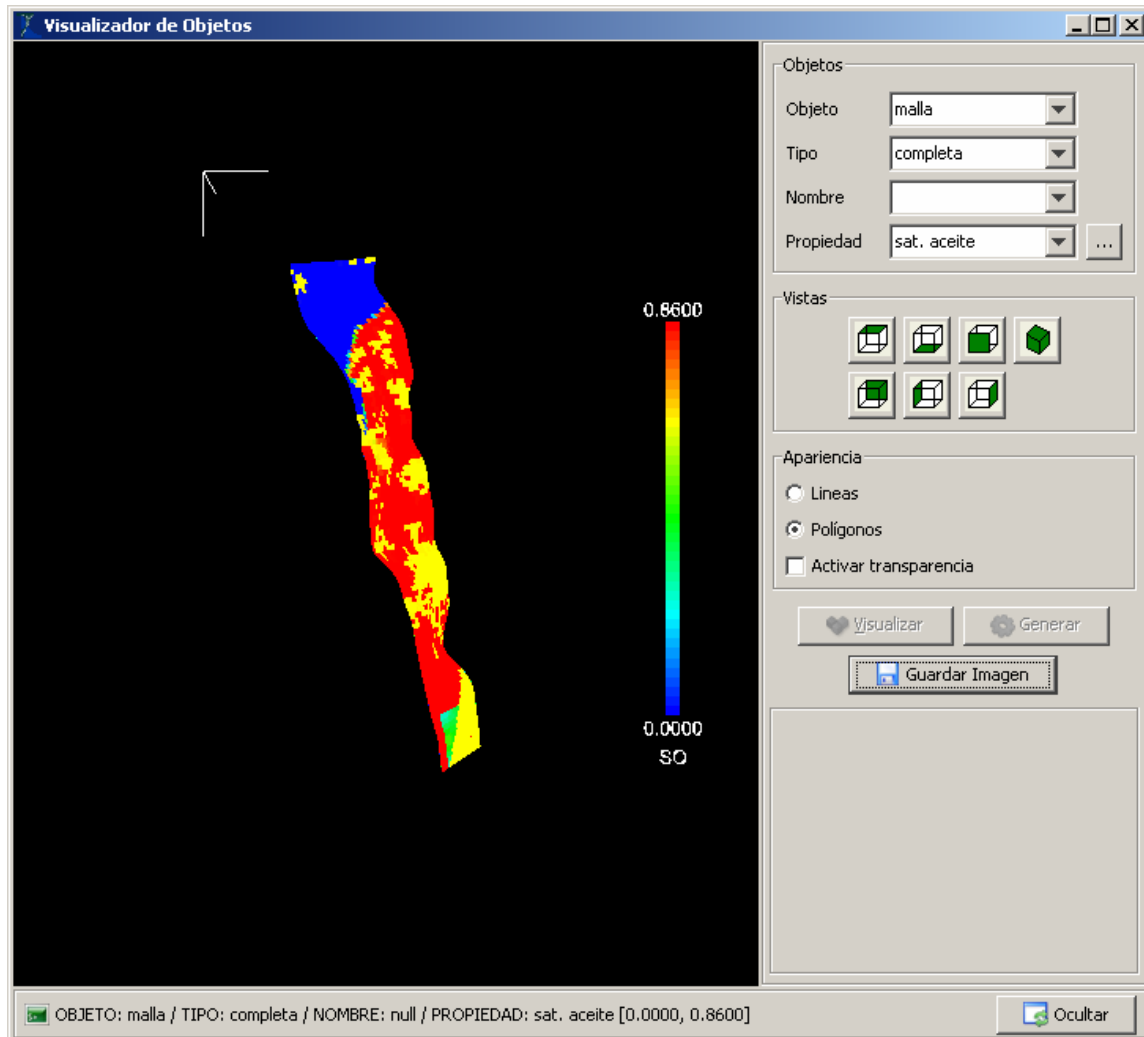


Figura 57. Distribución de Saturación de Aceite de TELLO en la escala [0, 0.86].

Se puede ver que la parte superior del yacimiento en el plano XY la saturación de aceite es nula, y este sector posee valores de presión altos. Si comparamos esta distribución con la de porosidad nos damos cuenta que existen sectores que poseen valores de porosidad intermedios o inferiores y a la vez niveles de saturaciones de aceite intermedios o superiores.

Hay que aclarar que las distribuciones de presión, saturaciones de aceite y agua del yacimiento TELLO fueron inconsistentes porque faltaban datos que el Simulador STARS no proporcionó en el modelo contenido en los archivos.

La siguiente figura muestra la distribución de impedancia de la malla completa (usando una escala de $[0, 250]$ Ohmios/ULM y una apariencia sólida con transparencias entre celdas):

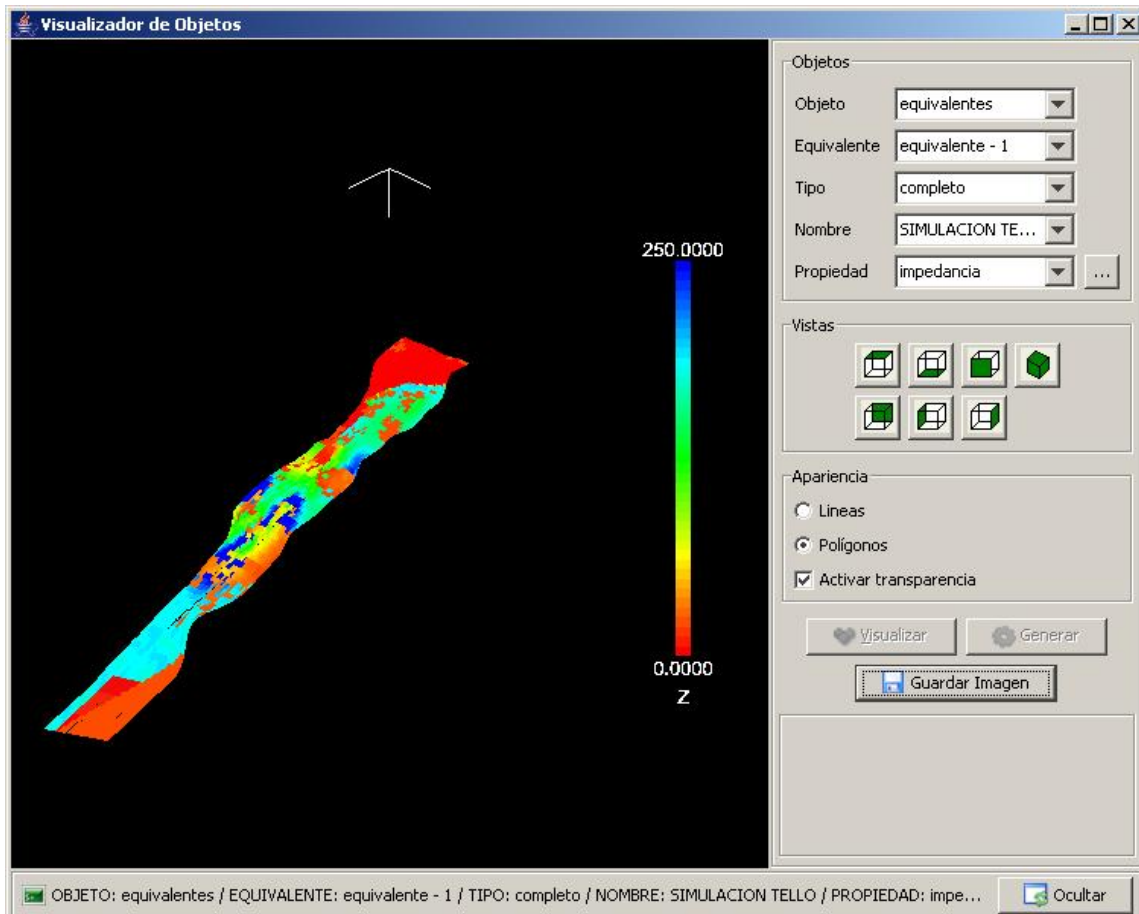


Figura 57. Distribución de Impedancia del equivalente-1 de TELLO en la escala $[0, 250]$ Ohmios/ULM.

Aquí podemos ver los resultados de la aplicación del AMIE sobre el yacimiento. Las partes rojas son zonas que poseen valores de impedancia muy 'bajos' (de acuerdo a la escala de visualización) y que pueden tener una alta saturación de aceite, pero aún no se puede garantizar esta afirmación.

Adicionalmente se puede ver la calidad de los datos provenientes del modelo geológico de TELLO. Recuerde que este modelo inicialmente poseía datos inconsistentes y que RECH los promedió por cada propiedad en cada capa.

Cambiamos la escala de visualización para esta propiedad y el atributo de apariencia a líneas. La siguiente figura muestra la distribución de impedancia de la malla completa (usando una escala de [1, 186] Ohmios/ULM usando la vista: plano-XY y apariencia de líneas con transparencias):

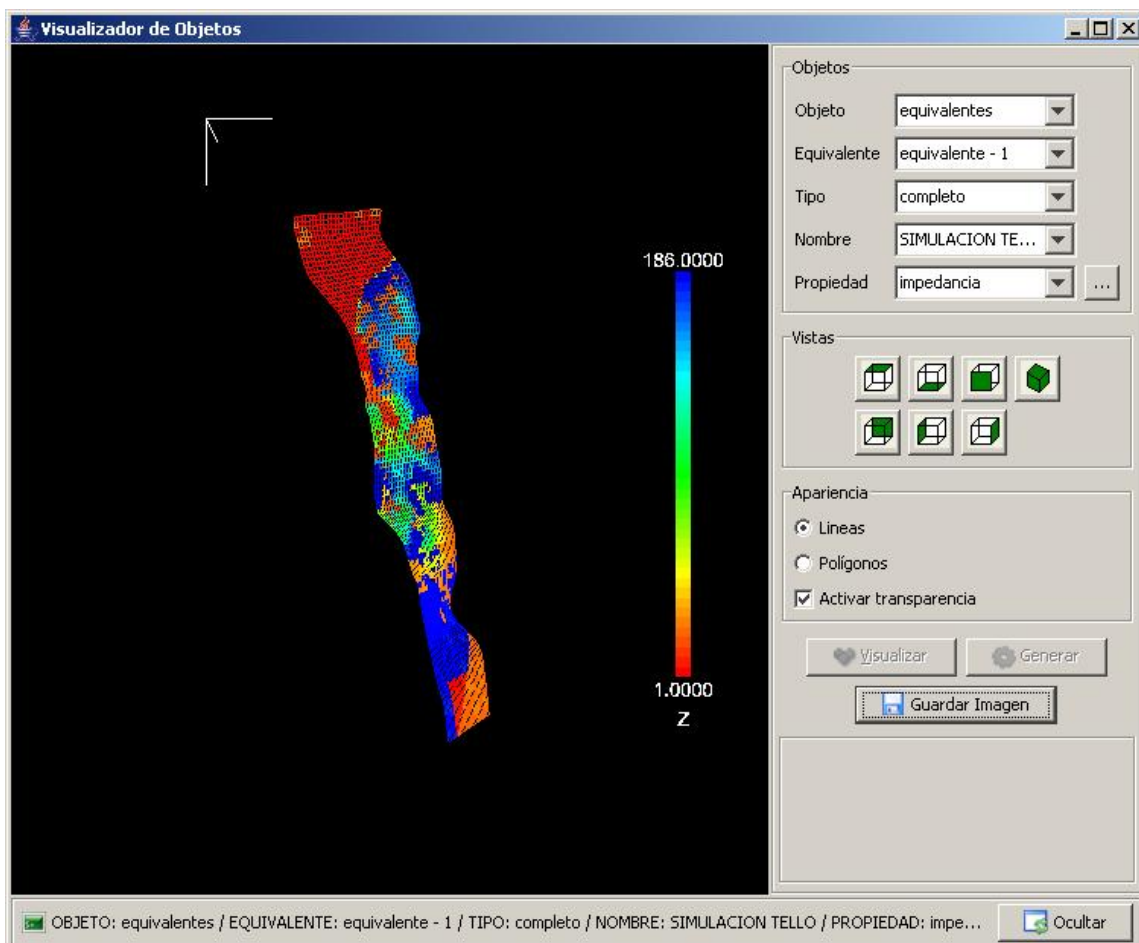


Figura 58. Distribución de Impedancia del equivalente-1 de TELLO en la escala [0, 186] Ohmios/ULM.

Se sigue presentando el mismo patrón y que concuerda con la anterior visualización usando otra escala. Los parámetros de visualización están sujetos a los expertos en el campo de la Ingeniería de Petróleos e Ingeniería Eléctrica. El AMIE proporciona un punto de partida para el análisis eléctrico de la formación y en la búsqueda de zonas óptimas del yacimiento.

Fijese que la distribución de Impedancia conserva una aproximación en cuanto a proporcionalidad con respecto a la distribución de porosidad. Los sectores que poseen valores de impedancia bajos implican que sean sectores con porosidades considerablemente altas o con valores iguales o por encima del valor promedio de la formación (Ver gráfica distribución de porosidad vs. impedancia).

Esto era de esperarse puesto que la ley de Archie establece que la porosidad de roca es inversamente proporcional a las resistividad de la misma. Notese que este valor es en corriente continua y la impedancia es para corriente alterna. Sabemos que la impedancia y la resistividad en DC de la roca son proporcionales y que el factor de proporcionalidad se debe a la diferencia en la inyección de corriente.

Podemos ver la zona 50, que es un sector óptimo según los resultados arrojados por el AMIE, y saber la posición geográfica en la formación. Configuramos la apariencia a líneas para ver el interior de la zona y activamos las transparencias.

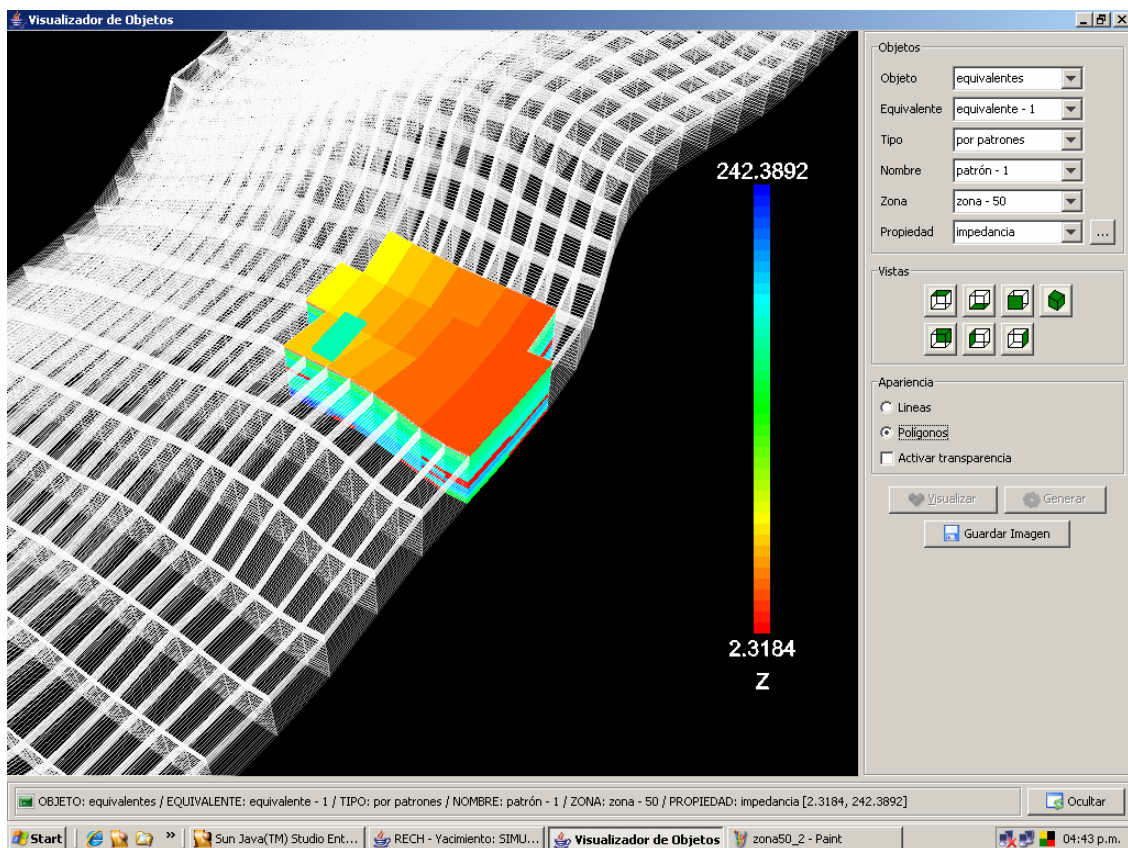


Figura 59. Distribución de Impedancia de la **zona-50**, perteneciente al patrón de búsqueda **patrón-1**, del **equivalente-1** de TELLO en la escala [2.3184, 242.3892] Ohmios/ULM.

Para hacer un acercamiento presione la tecla 'C', para hacer un alejamiento presione la tecla 'L', para realizar una traslación use las teclas de las flechas, y para realizar rotación utilice el MOUSE presionando el botón izquierdo sobre la figura. Realizando este procedimiento podemos ver más detalladamente la zona calculada.

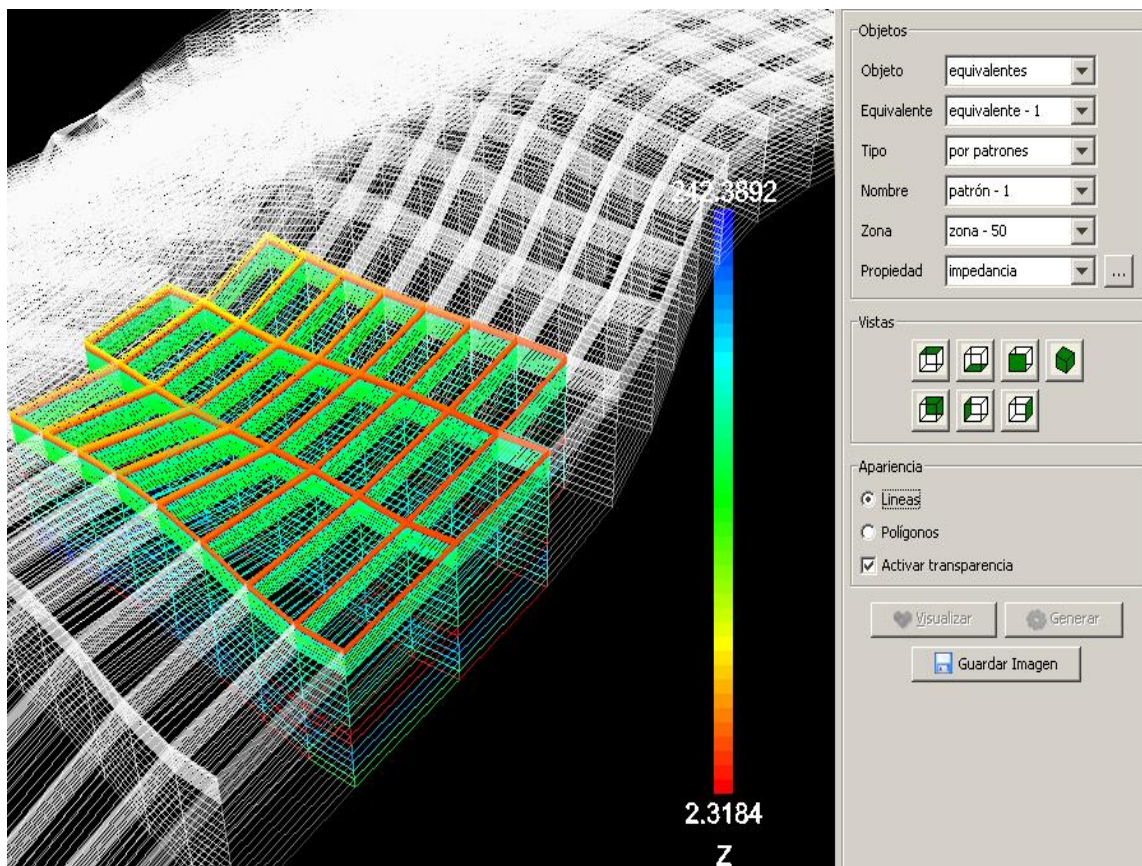


Figura 60. Zona 50 vista en forma detallada

Se puede ver que la mayor parte de la zona posee valores muy bajos de impedancia y que se encuentra dentro del rango de impedancia del patrón de búsqueda. Estas imágenes se pueden salvar en formato JPG para un análisis posterior. RECH ofrece esta funcionalidad adicional. El proceso de renderizado depende mucho de la máquina donde se está ejecutando RECH.

Notese que los lugares del yacimiento que poseen valores de impedancia bajos tienen valores de saturación de aceite bajos, lo cual significa también que los valores de saturación de agua son altos en esos sectores. Analizando esta relación de proporcionalidad se afirma la segunda hipótesis de la ley de Archie y la implementación del AMIE es consistente y sus resultados son válidos.

Realizando este proceso continuamente se puede tener una aproximación a la (s) zona (s) más óptima (s) de la formación y que es apta para aplicar la técnica de calentamiento eléctrico resistivo, más este tópico no se encuentra en los alcances del proyecto.

CONCLUSIONES

- ✚ Se diseñó y codificó el algoritmo de Parsing para la carga y extracción de datos de los archivos planos con enmallados tipo CORNER. En el proceso de extracción y análisis sintáctico de estos archivos se logró crear una estructura física de almacenamiento que permitió organizar los datos relevantes para el proceso de caracterización. Las propiedades petrofísicas y la geometría del modelo proporcionado por STARS son equivalentes a los resultados obtenidos por el parsing y las visualizaciones de las propiedades petrofísicas del yacimiento.
- ✚ El esquema relacional implementado en Postgres permite administrar la información del modelo geológico y los resultados arrojados por el AMIE. Adicionalmente se redujo la redundancia en el almacenamiento de los puntos que definen la geometría de las formaciones de estudio y los resultados del AMIE usando algunas relaciones del los SIG.
- ✚ Se Implementó el Algoritmo del Modelo de Impedancia Eléctrica propuesto por el Centro de Investigación del Gas y del Petróleo para caracterizar yacimientos eléctricamente. Este desarrollo facilita la modificación de los parámetros de entrada al AMIE por parte del usuario, ya que algunos son propios de cada yacimiento y medidos experimentalmente.
- ✚ Se usó una variante del algoritmo de búsqueda de los K-Vecinos para la selección de las zonas óptimas del yacimiento caracterizado. Este algoritmo se implementó haciendo énfasis en la definición de los intervalos de Impedancia y Saturaciones de Aceite, además del uso extensivo de los centroides de las entidades espaciales involucradas en las visualizaciones, obteniendo resultados óptimos y muy acertados.

- ✚ Se desarrolló una interfaz gráfica de usuario intuitiva que permite una experiencia de usuario considerable, adaptándose a las necesidades del lenguaje y procedimientos técnicos en la caracterización.
- ✚ La validación del AMIE estuvo sujeta a las hipótesis de la Ley de Archie y se verificó que las distribuciones de Porosidad y Saturaciones de Agua son inversamente proporcional a la resistividad DC de la roca.

CONCLUSIONES

- ✚ Esta versión de RECH sólo reconoce el enmallado tipo CORNER, que es el más flexible y que incluye al resto de enmallados soportados por el software STARS. Se recomienda que en futuras versiones se puedan implementar otros algoritmos que reconozcan los tipos de enmallados restantes.
- ✚ RECH no es un simulador de yacimientos como STARS, PETREL o IMEX. RECH es un caracterizador eléctrico de yacimientos que implementa el AMIE como algoritmo fundamental para el cálculo de los equivalentes. Futuras implementaciones de RECH pueden contemplar un conjunto de algoritmos para comparar los resultados arrojados entre ellos.
- ✚ Debido a que RECH está desarrollado bajo Java + Java3D y utiliza la arquitectura Cliente/Servidor, se demostró que la Plataforma Java no solo es usada en Internet, sino que también es una opción válida a la hora de desarrollar software científico.

7. BIBLIOGRAFÍA

7.1 SIMULACIÓN DE YACIMIENTOS

- ✚ Pérez Angulo Julio César, Cabarcas Simancas Manuel E. y Saray Ricardo Diego Antonio, CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO EN FONDO DE POZO PARA EL AUMENTO DEL FACTOR DE RECOBRO EN LOS CAMPOS TELLO Y LA HOCHA, Informe CER-MI-01(Mayo 2006).
- ✚ Calvin C. Mattax and Robert L. Dalton, RESERVOIR SIMULATION. Monograph Volume 13, SPE, Henry L. Doherty Series (1989).
- ✚ Turgay Ertekin, Jamal H. Abou-Kassem and Gregory R. King, BASIC APPLIED RESERVOIR SIMULATION. TextBook Series Volume 7, SPE, Henry L. Doherty Series (2001).

7.2 ARTÍCULOS

- ✚ E.R. Rangel-Germana, J. Schembrea, C. Sandberg, A.R. Kovscka (2003), ELECTRICAL-HEATING-ASSISTED RECOVERY FOR HEAVY OIL. Petroleum Engineering Department, Stanford University, Stanford, CA 94305-2220, USA., Tyco Thermal Controls, 300 Constitution Drive, Menlo Park, CA 94025, USA.
- ✚ Masatake Sato, Tatsuya Sato, Takashi Okabe, Kazumi Osato, Seiichi Yokomoto (2000), DEVELOPMENT OF GEOTHERMAL DATABASE SYSTEM-THE GEOCHEMISTRY OPTION, Geothermal Energy Research and Development Co., Ltd., Japan.
- ✚ J. L. Stevens, J. W. Pritchett, S. K. Garg, S. Nakanishi, K. Ariki, and S. Yamazawa (2000), DATABASE DEVELOPMENT FOR INTEGRATED RESERVOIR MODELING, Maxwell Technologies, Systems Division, 8888 Balboa Ave., San Diego, CA 92123-1506, USA., Electric Power Development Co., Ltd., 6-15-1 Ginza, Tokyo 104-8165, Japan., Mitsubishi Materials Corporation, 1-297 Kitabukuro-cho, Omiya, Saitama 330-8508, Japan., 4New Energy and Industrial Technology Development Organization, 3-1-1 Higashi Ikebukuro, Tokyo 170-6028, Japan.

- ✚ Jaime Jemuel C. Austria, Jr. (2003), DATABASE SYSTEM AND APPLICATIONS DEVELOPED FOR RESERVOIR MODELLING AND MONITORING OF GEOTHERMAL FIELDS IN THE PHILIPPINES.

7.3 TÉCNICOS

- ✚ RIGAUX P., SCHOLL M. and VOISARD A. SPATIAL DATABASES WITH APPLICATIONS TO GIS. Morgan Kaufmann Publishers (2002).
- ✚ JACOBSON I, RUMBAUGH J, BOOCH G, UNIFIED MODELING LANGUAGE USER GUIDE, 2nd Edition, Addison-Wesley Object Technology Series (2000).
- ✚ JACOBSON, Ivar. BOOCH, Grady. RUMBAUGH, James. EL LENGUAJE UNIFICADO DE MODELADO. Editorial Addison Wesley. (1999).
- ✚ GAMMA E., HELM R., JOHNSON R. and VLISSIDES J. DESIGN PATTERNS ELEMENTS OF REUSABLE OBJECT-ORIENTED SOFTWARE, Addison-Wesley (2005).
- ✚ ELLIOTTE R. H., JAVA IO, Editorial O'Reilly. (2006).
- ✚ GEORGE R., JAVA DATABASE BEST PRACTICES, Editorial O'Reilly. (2003).
- ✚ ELLIOTT J., ECKSTEIN R., LOY M., WOOD D. Editorial O'Reilly. (2002).

7.4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GUÍA DE USUARIO STARS, Computer Modelling Group. Versión 2005.
- [2] GUÍA DE USUARIO IMEX, Computer Modelling Group. Versión 2005.
- [3] USER'S GUIDE BUILDER, Computer Modelling Group. Versión 2005.

7.5 SITIOS WEB

- ✚ <http://plata.uda.cl/minas/apuntes/Geologia/EXPLORAC/TEXT/070elect.htm>
- ✚ <http://157.92.29.203/aula-gea/recuyaci.html>
- ✚ http://www.portalplanetasedna.com.ar/el_petroleo.htm

- [✚ http://www.cmg.com](http://www.cmg.com)
- [✚ http://es.encarta.msn.com/encyclopedia_761576221_2/Petróleo.html](http://es.encarta.msn.com/encyclopedia_761576221_2/Petróleo.html)
- [✚ http://www.ilustrados.com/publicaciones/EpyFuEVVyFKfMowXlk.php](http://www.ilustrados.com/publicaciones/EpyFuEVVyFKfMowXlk.php)
- [✚ http://www.monografias.com/trabajos/petroleo2/petroleo2.shtml](http://www.monografias.com/trabajos/petroleo2/petroleo2.shtml)
- [✚ http://www.ingeominas.gov.co](http://www.ingeominas.gov.co)
- [✚ http://www.ingeominas.gov.co/option,com_glossary/func,display/letter,Y/Itemid,155/catid,82/page,1.htm](http://www.ingeominas.gov.co/option,com_glossary/func,display/letter,Y/Itemid,155/catid,82/page,1.htm)
- [✚ http://www.wikipedia.org/wiki/sig/Conductividad_el](http://www.wikipedia.org/wiki/sig/Conductividad_el)
- [✚ http://es.wikipedia.org/wiki/Proceso_Unificado](http://es.wikipedia.org/wiki/Proceso_Unificado)
- [✚ http://www.sun.com](http://www.sun.com)
- [✚ http://www.javahispano.com](http://www.javahispano.com)
- [✚ http://www.j3d.org](http://www.j3d.org)
- [✚ http://www.monografias.com/trabajos24/arquitectura-cliente-servidor/arquitectura-cliente-servidor.shtml](http://www.monografias.com/trabajos24/arquitectura-cliente-servidor/arquitectura-cliente-servidor.shtml)
- [✚ http://programacion.com/java/tutorial/3d/1/](http://programacion.com/java/tutorial/3d/1/)
- [✚ http://www.netpecos.org/docs/mysql_postgres/x15.html](http://www.netpecos.org/docs/mysql_postgres/x15.html)
- [✚ http://www.openecuador.org/modules/news/article.php?storyid=31](http://www.openecuador.org/modules/news/article.php?storyid=31)
- [✚ http://www.netbeans.org](http://www.netbeans.org)

8. ANEXOS

ANEXO A. MODELO ENTIDAD/RELACIÓN

El esquema relacional usado en RECH está dividido en 2 secciones:

- Los Datos Geológicos: Contiene los datos referente a la geometría y las propiedades petrofísicas de los modelos de yacimientos.
- Los Resultados del AMIE: Contiene el detalle de los equivalentes eléctricos calculados a los modelos de yacimientos estudiados en la aplicación.

Diagrama Entidad/Relación del Modelo Geológico

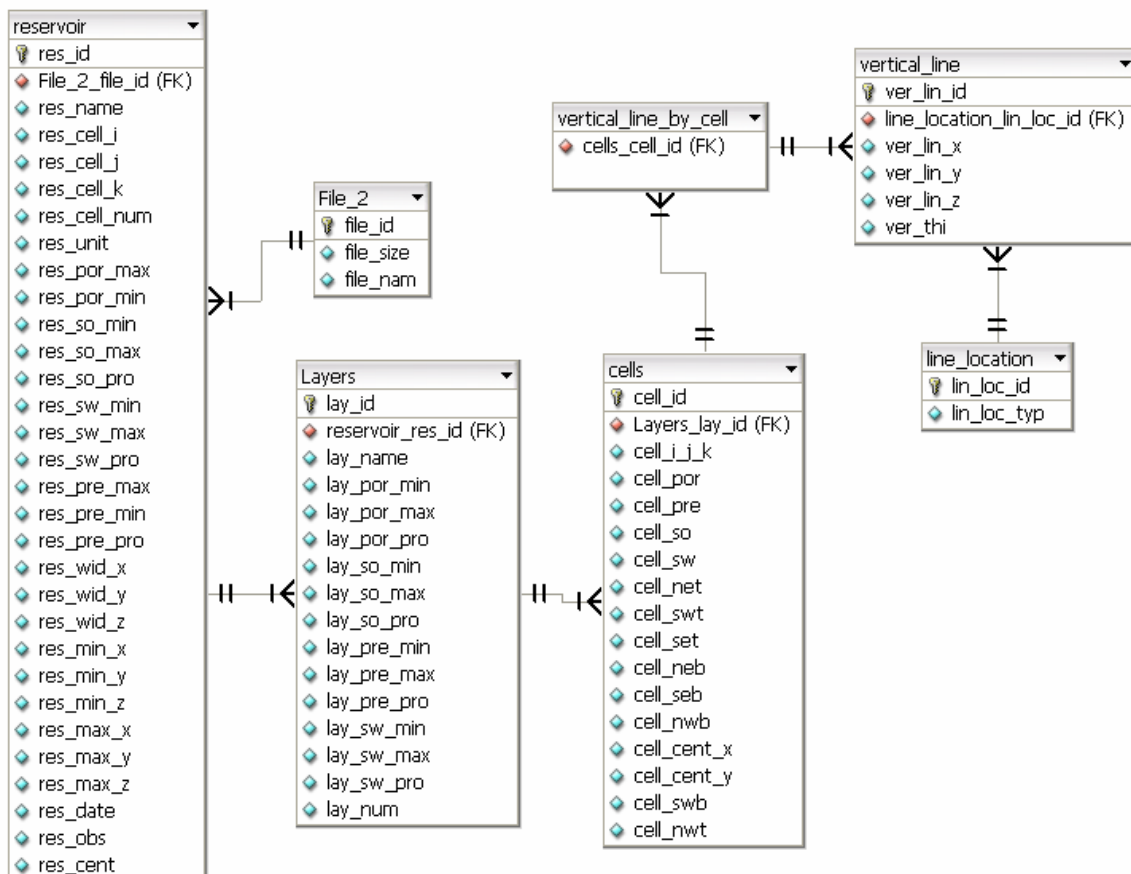
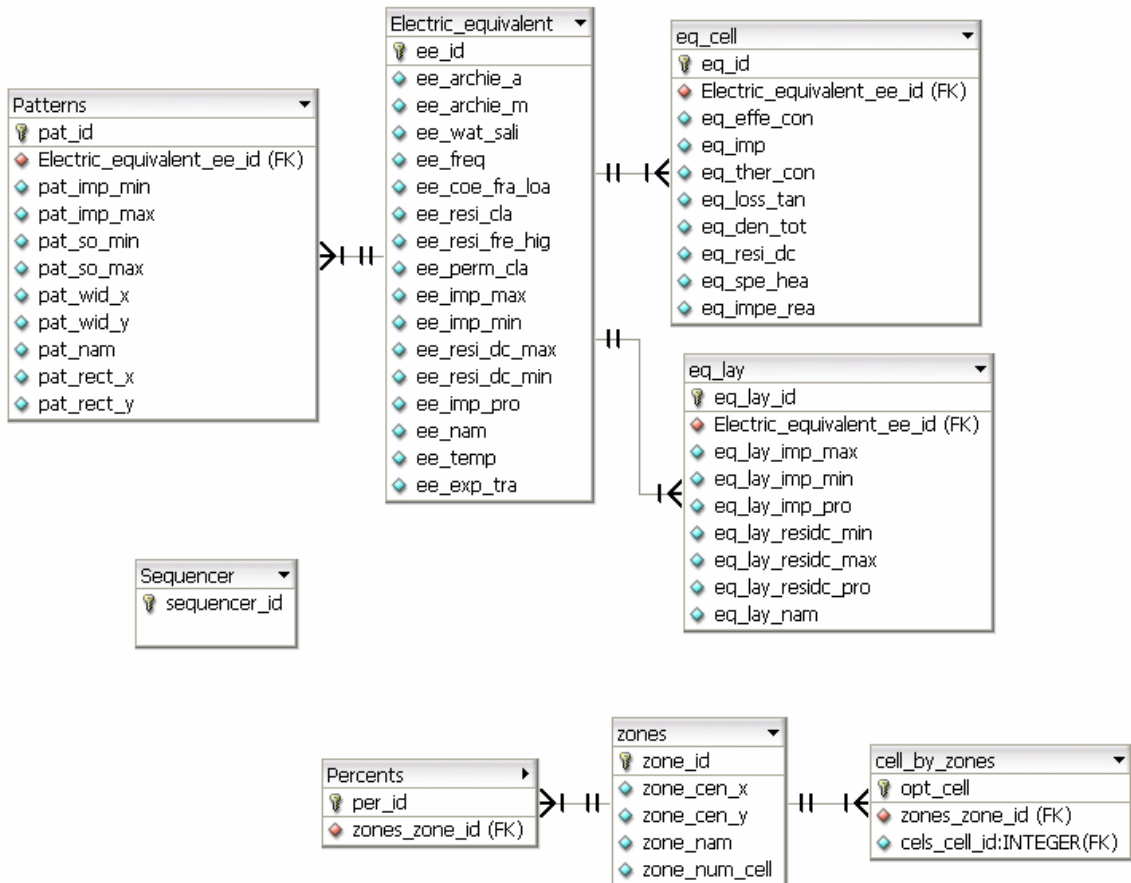


Diagrama Entidad/Relación del AMIE



ANEXO B. DICCIONARIO DE DATOS

A continuación se presenta el diccionario de datos en el cual se describe el nombre de cada tabla, atributo, con la respectiva descripción y el tipo de dato utilizado.

SEQUENCERS (TABLA 1)

NAME: NOMBRE DE LA SECUENCIA (VARCHAR(50)).

SEED: VALOR DE LA SEMILLA (INT8).

LASTUPDATE: ULTIMA ACTUALIZACIÓN DE LA SEMILLA (INT8).

PK = (SEED, LASTUPDATE)

LINE_LOCATION (TABLA 2)

LIN_LOC_ID: LLAVE PRIMARIA (INT8).

LIN_LOC_TYP: UBICACIÓN DE LAS LÍNEAS (CHAR(2)).

VERTICAL_LINES (TABLA 3)

VER_LIN_ID: LLAVE PRIMARIA (INT8).

VER_LIN_X: COORDENADA DEL LA LÍNEA EN X (FLOAT8).

VER_LIN_Y: COORDENADA DEL LA LÍNEA EN Y (FLOAT8).

VER_LIN_Z_SUP: PROFUNDIDAD SUPERIOR DE LA LÍNEA EN Z (FLOAT8).

VER_LIN_Z_INF: PROFUNDIDAD INFERIOR DE LA LÍNEA EN Z (FLOAT8).

VER_LIN_THI: GROSOR DE LA LÍNEA (FLOAT8).

RESERVOIRS (TABLA 4)

RES_ID: LLAVE PRIMARIA (INT8).

RES_NAME: NOMBRE DE CADA YACIMIENTO, ES UNA VARIABLE DE TEXTO (VARCHAR(100)).

RES_CELL_I: TAMAÑO DEL YACIMIENTO EN X (INT4).

RES_CELL_J: TAMAÑO DEL YACIMIENTO EN Y (INT4).

RES_CELL_K: TAMAÑO DEL YACIMIENTO EN Z (INT8).

RES_CELL_NUM: NUMERO DE CELDAS DEL YACIMIENTO (INT4).

RES_UNIT: UNIDADES DE MEDIDA EMPLEADAS EN EL YACIMIENTO (VARCHAR(100)).

RES_DATE: FECHA DE INGRESO DE REGISTRO (VARCHAR(100)).
RES_OBS: DESCRIPCIÓN BREVE DEL YACIMIENTO (VARCHAR(500)).
RES_POR_MIN: LA POROSIDAD MÍNIMA DEL YACIMIENTO (FLOAT8).
RES_POR_AVG: LA POROSIDAD PROMEDIO DEL YACIMIENTO (FLOAT8).
RES_POR_MAX: LA POROSIDAD MÁXIMA DEL YACIMIENTO (FLOAT8).
RES_SO_MIN: LA SATURACIÓN DE ACEITE MÍNIMA DEL YACIMIENTO (FLOAT8).
RES_SO_AVG: LA SATURACIÓN DE ACEITE PROMEDIO (FLOAT8).
RES_SO_MAX: LA SATURACIÓN DE ACEITE MÁXIMA DEL YACIMIENTO (FLOAT8).
RES_SW_MIN: LA SATURACIÓN DE AGUA MÍNIMA DEL YACIMIENTO (FLOAT8).
RES_SW_AVG: LA SATURACIÓN DE AGUA PROMEDIO DEL YACIMIENTO (FLOAT8).
RES_SW_MAX: LA SATURACIÓN DE AGUA MÁXIMA DEL YACIMIENTO (FLOAT8).
RES_PRE_MIN: LA PRESIÓN MÍNIMA DEL YACIMIENTO (FLOAT8).
RES_PRE_AVG: LA PRESIÓN PROMEDIO DEL YACIMIENTO (FLOAT8).
RES_PRE_MAX: LA PRESIÓN MÁXIMA DEL YACIMIENTO (FLOAT8).
RES_WID_X: GROSOR DEL YACIMIENTO EN X (FLOAT8).
RES_WID_Y: GROSOR DEL YACIMIENTO EN Y (FLOAT8).
RES_WID_Z: GROSOR DEL YACIMIENTO EN Z (FLOAT8).
RES_MIN_X: COORDENADA MÍNIMA DEL YACIMIENTO EN X (FLOAT8).
RES_MIN_Y: COORDENADA MÍNIMA DEL YACIMIENTO EN Y (FLOAT8).
RES_MIN_Z: COORDENADA MÍNIMA DEL YACIMIENTO EN Z (FLOAT8).
RES_MAX_X: COORDENADA MÁXIMA DEL YACIMIENTO EN X (FLOAT8).
RES_MAX_Y: COORDENADA MÁXIMA DEL YACIMIENTO EN Y (FLOAT8).
RES_MAX_Z: COORDENADA MÁXIMA DEL YACIMIENTO EN Z (FLOAT8).
RES_CENT_X: COORDENADA EN X DEL CENTROIDE DEL YACIMIENTO (FLOAT8).
RES_CENT_Y: COORDENADA EN Y DEL CENTROIDE DEL YACIMIENTO (FLOAT8).
RES_CENT_Z: COORDENADA EN Y DEL CENTROIDE DEL YACIMIENTO (FLOAT8).

FILES (TABLA 5)

RESERVOIRS_RES_ID: LLAVE FORÁNEA DE LA TABLA **RESERVOIRS** (INT8).
FILE_ID: LLAVE PRIMARIA (INT8).
FILE_SIZE: TAMAÑO DEL ARCHIVO (INT8).
FILE_NAME: NOMBRE DEL ARCHIVO (VARCHAR(100)).

LAYERS (TABLA 6)

RESERVOIRS_RES_ID: LLAVE FORÁNEA DE LA TABLA **RESERVOIRS** (INT8).
LAY_ID: LLAVE PRIMARIA (INT8).
LAY_NUM: IDENTIFICADOR DE LA CAPA (INT4).
LAY_NAME: NOMBRE DE LA CAPA (VARCHAR(15)).
LAY_POR_MIN: POROSIDAD MÍNIMA DE LA CAPA (FLOAT8).
LAY_POR_AVG: POROSIDAD PROMEDIO DE LA CAPA (FLOAT8).
LAY_POR_MAX: POROSIDAD MÁXIMA DE LA CAPA (FLOAT8).
LAY_SO_MIN: SATURACIÓN DE ACEITE MÍNIMA DE LA CAPA (FLOAT8).
LAY_SO_AVG: SATURACIÓN DE ACEITE PROMEDIO DE LA CAPA (FLOAT8).
LAY_SO_MAX: SATURACIÓN DE ACEITE MÁXIMA DE LA CAPA (FLOAT8).
LAY_SW_MIN: SATURACIÓN DE AGUA MÍNIMA DE LA CAPA (FLOAT8).
LAY_SW_AVG: SATURACIÓN DE AGUA PROMEDIO DE LA CAPA (FLOAT8).
LAY_SW_MAX: SATURACIÓN DE AGUA MÁXIMA DE LA CAPA (FLOAT8).
LAY_PRE_MIN: PRESIÓN MÍNIMA DE LA CAPA (FLOAT8).
LAY_PRE_AVG: PRESIÓN PROMEDIO DE LA CAPA (FLOAT8).
LAY_PRE_MAX: PRESIÓN MÁXIMA DE LA CAPA (FLOAT8).

CELLS (TABLA 7)

LAYERS_LAY_ID: LLAVE FORÁNEA DE LA TABLA **LAYERS** (INT8).
CELL_ID: LLAVE PRIMARIA (INT8).
CELL_I: COORDENADA DE LA CELDA EN DIRECCIÓN X (INT4).
CELL_J: COORDENADA DE LA CELDA EN DIRECCIÓN Y (INT4).
CELL_K: COORDENADA DE LA CELDA EN DIRECCIÓN Z (INT4).
CELL_POR: POROSIDAD POR CELDA (FLOAT8).
CELL_SO: SATURACIÓN DE ACEITE POR CELDA (FLOAT8).
CELL_SW: SATURACIÓN DE AGUA POR CELDA (FLOAT8).
CELL_PRE: PRESIÓN POR CELDA (FLOAT8).
CELL_NWT: COORDENADA DE LA CELDA EN LA DIRECCIÓN NOR-OESTE LA PARTE DE ABAJO (FLOAT8).
CELL_NET: COORDENADA DE LA CELDA EN LA DIRECCIÓN NOR-ESTE LA PARTE DE ARRIBA (FLOAT8).
CELL_SET: COORDENADA DE LA CELDA EN LA DIRECCIÓN SUR-ESTE LA PARTE DE ARRIBA (FLOAT8).
CELL_SWT: COORDENADA DE LA CELDA EN LA DIRECCIÓN SUR-OESTE LA PARTE DE ARRIBA (FLOAT8).
CELL_NWB: COORDENADA DE LA CELDA EN LA DIRECCIÓN NOR-OESTE LA PARTE DE ABAJO (FLOAT8).

CELL_NEB: COORDENADA DE LA CELDA EN LA DIRECCIÓN NOR-ESTE LA PARTE DE ABAJO (FLOAT8).

CELL_SEB: COORDENADA DE LA CELDA EN LA DIRECCIÓN SUR-ESTE LA PARTE DE ABAJO (FLOAT8).

CELL_SWB: COORDENADA DE LA CELDA EN LA DIRECCIÓN SUR-OESTE LA PARTE DE ABAJO (FLOAT8).

CELL_CENT_X: COORDENADA DEL CENTROIDE DE LA CELDA EN X (FLOAT8).

CELL_CENT_Y: COORDENADA DEL CENTROIDE DE LA CELDA EN Y (FLOAT8).

VERTICAL_LINES_BY_CELL (TABLA 8)

CELLS_CELL_ID: LLAVE FORÁNEA DE LA TABLA **CELLS** (INT8).

VERTICAL_LINES_VER_LIN_ID: LLAVE FORÁNEA DE LA TABLA **VERTICAL_LINES** (INT8).

LINE_LOCATION_LIN_LOC_ID: LLAVE FORÁNEA DE LA TABLA **LINE_LOCATION** (INT8).

ELECTRIC_EQUIVALENT (TABLA 9)

RESERVOIRS_RES_ID: LLAVE FORÁNEA DE LA TABLA **RESERVOIRS** (INT8).

EE_ID: LLAVE PRIMARIA (INT8).

EE_NAME: NOMBRE DEL EQUIVALENTE (VARCHAR(20)).

EE_FREQ: FRECUENCIA (FLOAT8).

EE_COE_TRA_LOA: COEFICIENTE DE TRANSPORTE DE CARGA (FLOAT8).

EE_EXP_TRA_LOA: EXPONENTE DE TRANSPORTE DE CARGA (FLOAT8).

EE_RESI_CLA: RESISTENCIA DE LA ARCILLA (FLOAT8).

EE_RESI_FRE_HIG: RESISTIVIDAD A ALTA FRECUENCIA (FLOAT8).

EE_PERM_CLA: PERMITIVIDAD DE LA ARCILLA (FLOAT8).

EE_WAT_SAL: SALINIDAD DEL AGUA (INT4).

EE_TEMP: TEMPERATURA (FLOAT8).

EE_ARCHIE_A: COEFICIENTE A DE LA LEY DE ARCHIE (FLOAT8).

EE_ARCHIE_M: EXPONENTE M DE LA LEY DE ARCHIE (FLOAT8).

EE_IMP_MIN: IMPEDANCIA MÍNIMA (FLOAT8).

EE_IMP_AVG: IMPEDANCIA PROMEDIO (FLOAT8).

EE_IMP_MAX: IMPEDANCIA MÁXIMA (FLOAT8).

EE_RESI_DC_MIN: RESISTENCIA EN DC MÍNIMA (FLOAT8).

EE_RESI_DC_AVG: RESISTENCIA EN DC PROMEDIO (FLOAT8).

EE_RESI_DC_MAX: RESISTENCIA EN DC MÁXIMA (FLOAT8).

ELEC_BY_LAYER (TABLA 10)

ELECTRIC_EQUIVALENT_EE_ID: LLAVE FORÁNEA DE LA TABLA **ELECTRIC_EQUIVALENT** (INT8).

LAYERS_LAY_ID: LLAVE FORÁNEA DE LA TABLA **LAYERS** (INT8).

EBL_ID: LLAVE PRIMARIA (INT8).

EBL_IMP_MIN: IMPEDANCIA ELÉCTRICA MÍNIMA EN LA CAPA (FLOAT8).

EBL_IMP_AVG: IMPEDANCIA ELÉCTRICA PROMEDIO EN LA CAPA (FLOAT8).

EBL_IMP_MAX: IMPEDANCIA ELÉCTRICA MÁXIMA EN LA CAPA (FLOAT8).

EBL_RESI_DC_MIN: RESISTENCIA EN DC MÍNIMA EN LA CAPA (FLOAT8).

EBL_RESI_DC_AVG: RESISTENCIA EN DC PROMEDIO EN LA CAPA (FLOAT8).

EBL_RESI_DC_MAX: RESISTENCIA EN DC MÁXIMA EN LA CAPA (FLOAT8).

ELEC_BY_CELL (TABLA 11)

ELECTRIC_EQUIVALENT_EE_ID: LLAVE FORÁNEA DE LA TABLA **ELECTRIC_EQUIVALENT** (INT8).

CELLS_CELL_ID: LLAVE FORÁNEA DE LA TABLA **CELLS** (INT8).

EBC_ID: LLAVE PRIMARIA (INT8).

EBC_EFFE_CON: CONDUCTIVIDAD EFECTIVA (FLOAT8).

EBC_IMP: IMPEDANCIA ELÉCTRICA (FLOAT8).

EBC_THER_CON: CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (FLOAT8).

EBC_LOSS_TAN: COEFICIENTE DE DISPERSIÓN DIELECTRICA (FLOAT8).

EBC_DEN_TOT: DENSIDAD DE MASA TOTAL (FLOAT8).

EBC_RESI_DC: RESISTENCIA EN DC (FLOAT8).

EBC_SPE_HEA: CALOR ESPECÍFICO (FLOAT8).

EBC_PERM: PERMITIVIDAD (FLOAT8).

PATTERNS (TABLA 12)

ELECTRIC_EQUIVALENT_EE_ID: LLAVE FORÁNEA DE LA TABLA **ELECTRIC_EQUIVALENT** (INT8).

PAT_ID: LLAVE PRIMARIA (INT8).

PAT_NAM: NOMBRE DEL PATRÓN (VARCHAR(15)).

PAT_IMP_MIN: RANGO DE IMPEDANCIA MÍNIMO (FLOAT8).

PAT_IMP_MAX: RANGO DE IMPEDANCIA MÁXIMO (FLOAT8).

PAT_SO_MIN: RANGO DE SATURACIÓN DE ACEITE MÍNIMO (FLOAT8).

PAT_SO_MAX: RANGO DE SATURACIÓN DE ACEITE MÁXIMO (FLOAT8).

PAT_WID_X: ANCHO EN X (FLOAT8).

PAT_WID_Y: ANCHO EN Y (FLOAT8).
PAT_RECT_X: DIMENSIÓN DEL PATRÓN DE BÚSQUEDA EN X (INT4).
PAT_RECT_Y: DIMENSIÓN DEL PATRÓN DE BÚSQUEDA EN Y (INT4).
PAT_NUM_ZON: CANTIDAD DE ZONAS QUE POSEE ESTE PATRÓN (INT4).

ZONES (TABLA 13)

PATTERNS_PAT_ID: LLAVE FORÁNEA DE LA TABLA **PATTERNS** (INT8).
ZONE_ID: LLAVE PRIMARIA (INT8).
ZONE_NAME: NOMBRE DE LA ZONA (VARCHAR(15)).
ZONE_CEN_X: CENTROIDE DE LA ZONA EN X (FLOAT8).
ZONE_CEN_Y: CENTROIDE DE LA ZONA EN Y (FLOAT8).
ZONE_CEN_Z: CENTROIDE DE LA ZONA EN Z (FLOAT8).
ZONE_NUM_CELL: NUMERO DE CELDAS EN LA ZONA (INT4).
ZONE_PERC: PORCENTAJE DE EFICIENTE DE LA ZONA (FLOAT8).

CELLS_BY_ZONE (TABLA 14)

ZONES_ZONE_ID: LLAVE FORÁNEA DE LA TABLA **ZONES** (INT8).
CELLS_CELL_ID: LLAVE FORÁNEA DE LA TABLA **CELLS** (INT8).
CBZ_OPT_CELL: INDICA SI LA CELDA ES OPTIMA O NO (INT4).

PERCENTS (TABLA 15)

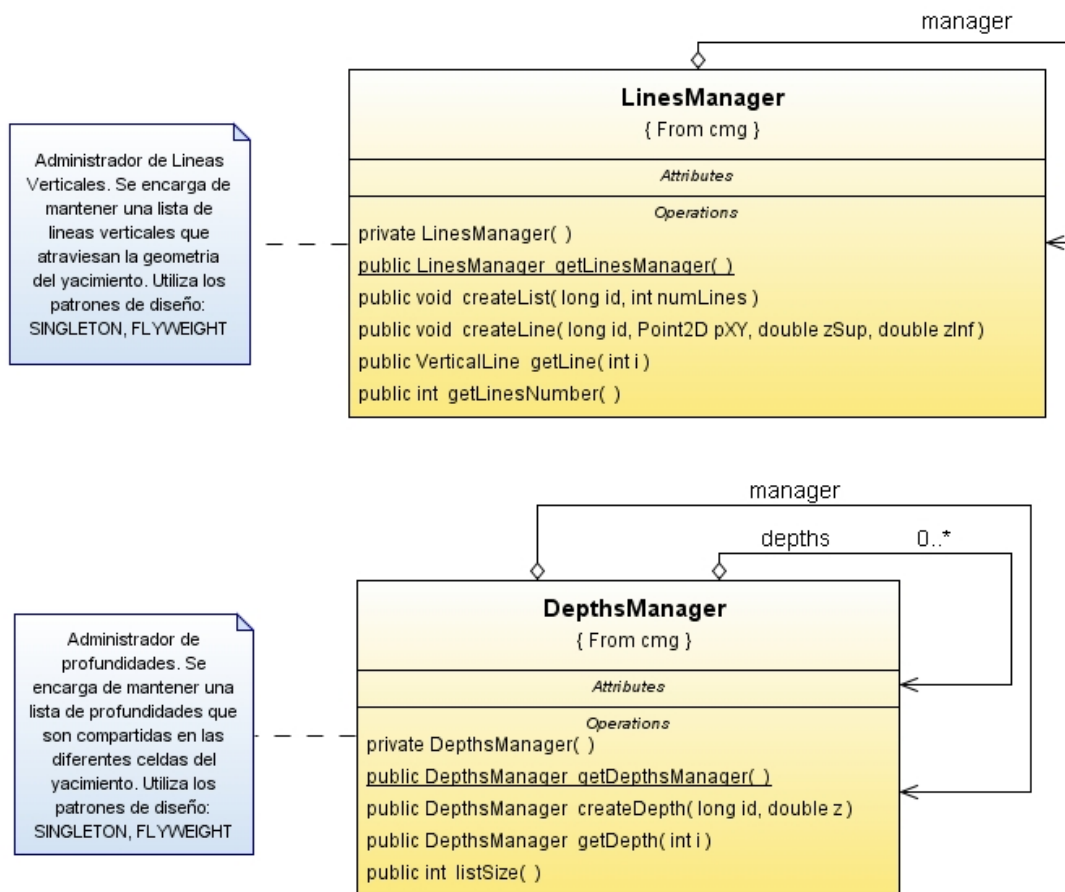
ZONES_ZONE_ID: LLAVE FORÁNEA DE LA TABLA **ZONES** (INT8).
LAYERS_LAY_ID: LLAVE FORÁNEA DE LA TABLA **LAYERS** (INT8).
PER_ID: LLAVE PRIMARIA (INT8).
PER_VAL: INDICA EL VALOR DEL PORCENTAJE PARA ESTA CAPA (FLOAT8).

ANEXO C. DIAGRAMAS DE CLASES

A continuación se presentan los Diagramas de Clases de cada paquete que conforman las bases de RECH

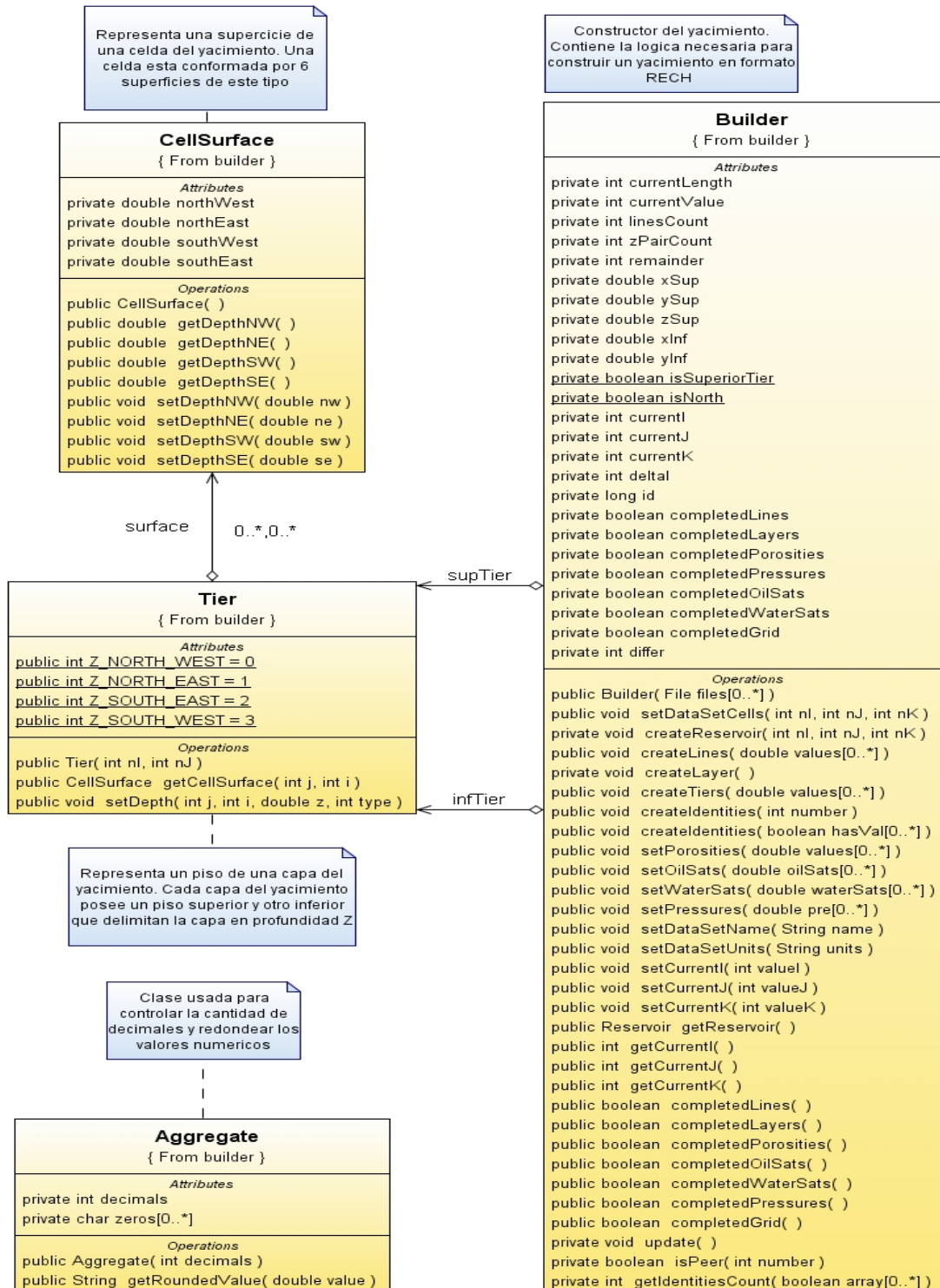
Paquete: `com.cigp.cmg`

Paquete que controla la creación líneas verticales y lista de profundidades usadas para la creación del modelo geométrico del yacimiento.



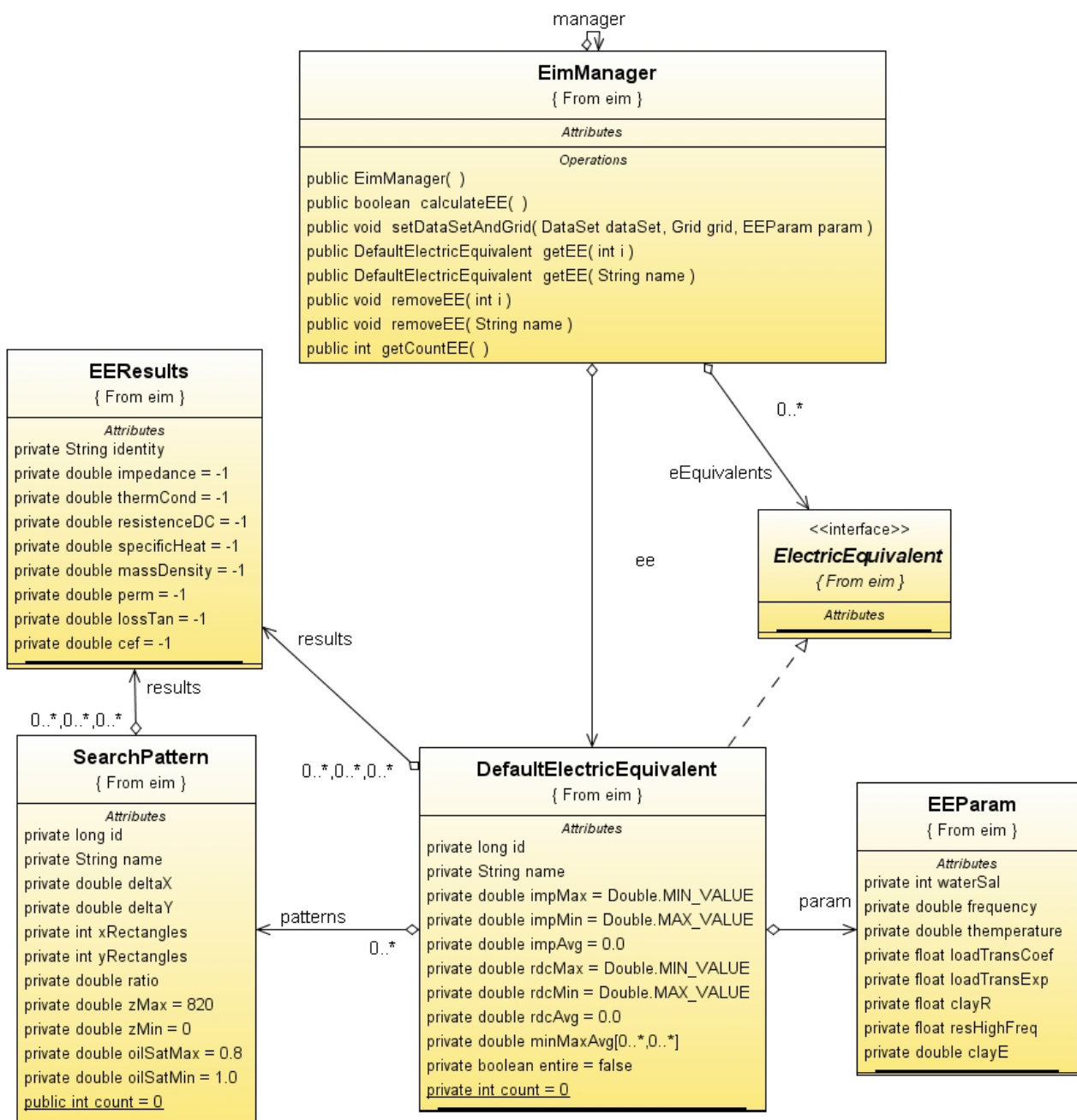
Paquete: `com.cigp.builder`

Paquete encargado de la construcción de las capas y la malla que representa al yacimiento en el espacio tridimensional.



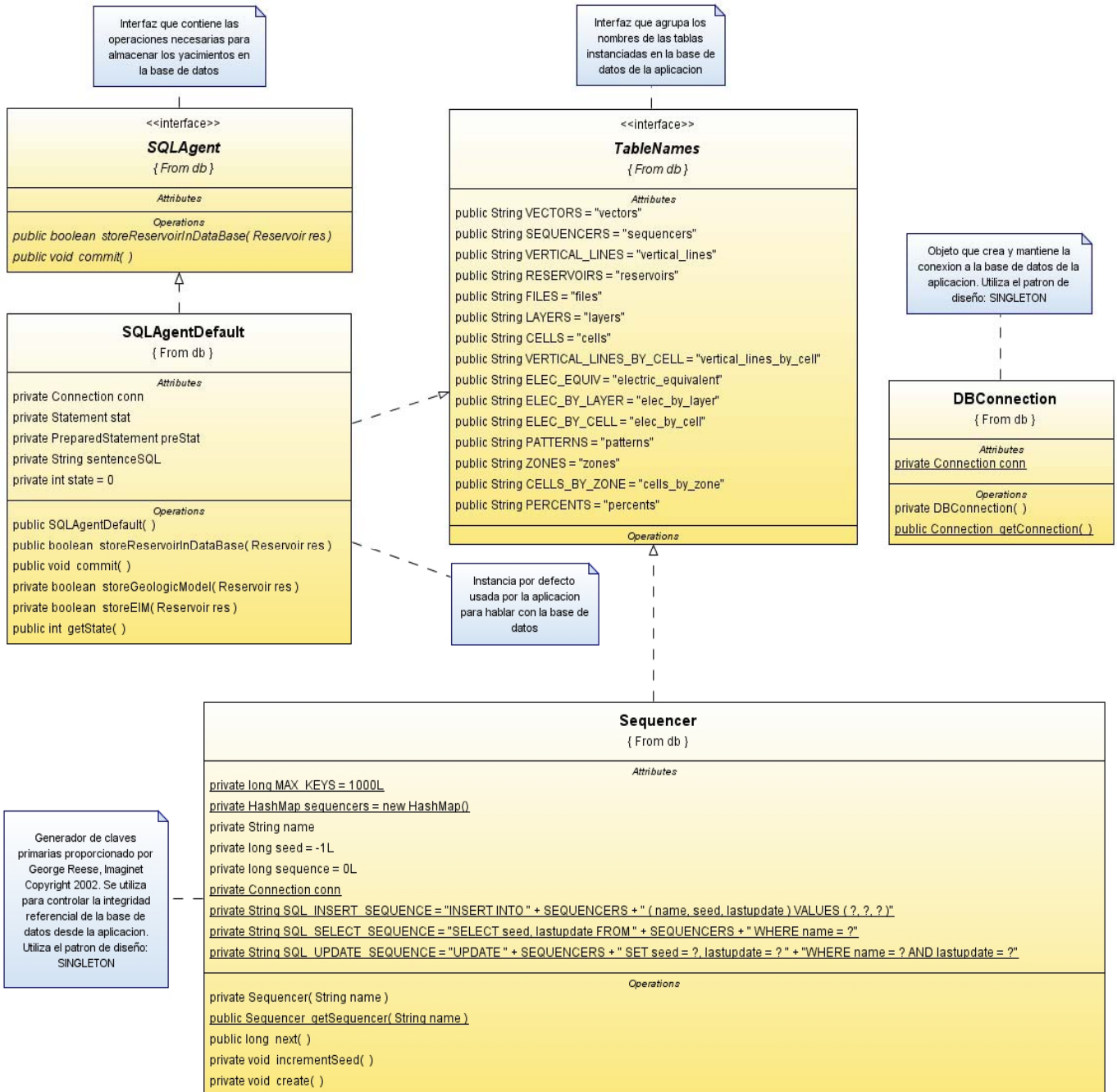
Paquete: `com.cigp.eim`

Paquete encargado de implementar el Algoritmo del Modelo de Impedancia Eléctrica.



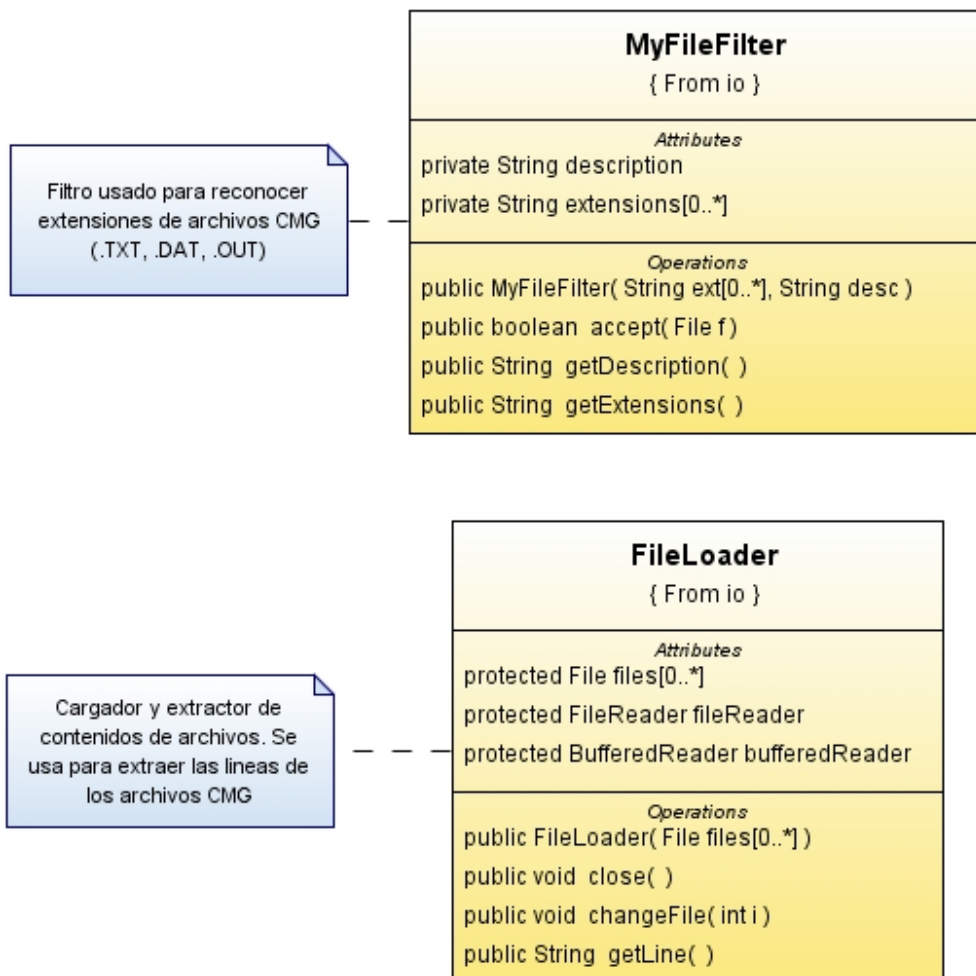
Paquete: `com.cigp.db`

Paquete encargado de la conexión a la base de datos y del soporte a de las operaciones SQL usadas en la aplicación.



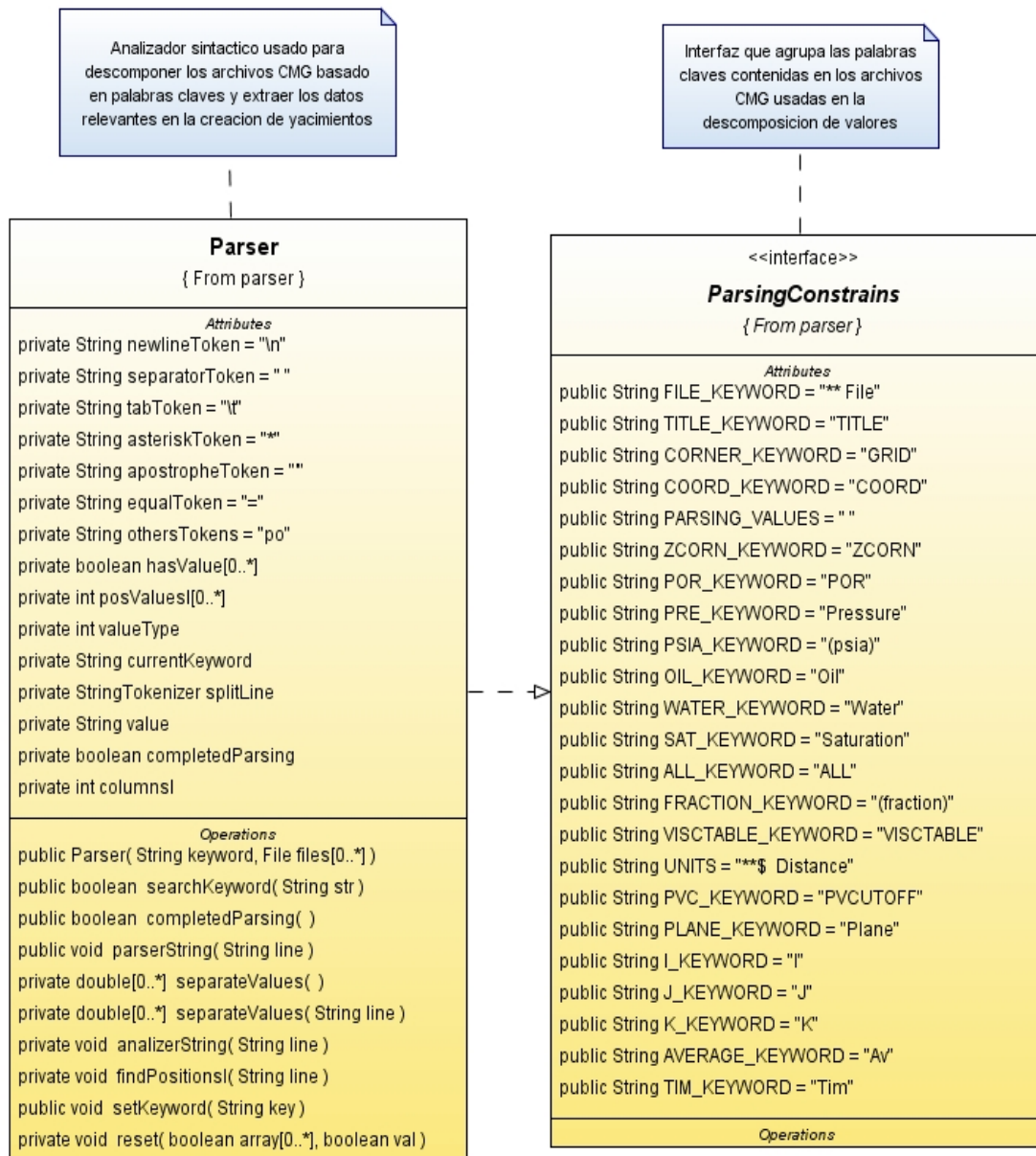
📁 Paquete: `com.cigp.io`

Paquete usado para filtrar los archivos CMG del resto de archivos cargados en la aplicación.



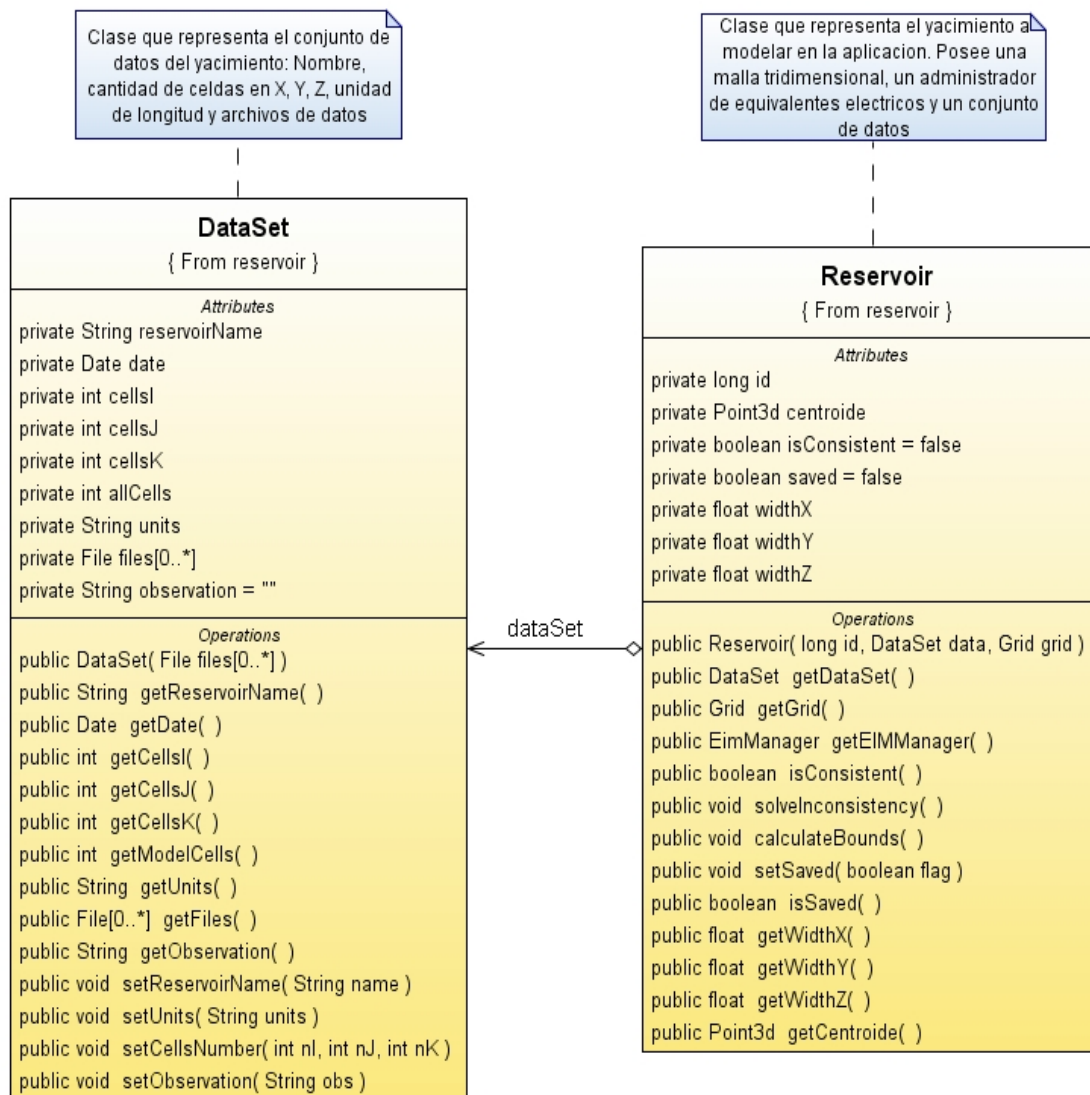
📁 Paquete: `com.cigp.parser`

Paquete encargado del análisis sintáctico de los archivos CMG.



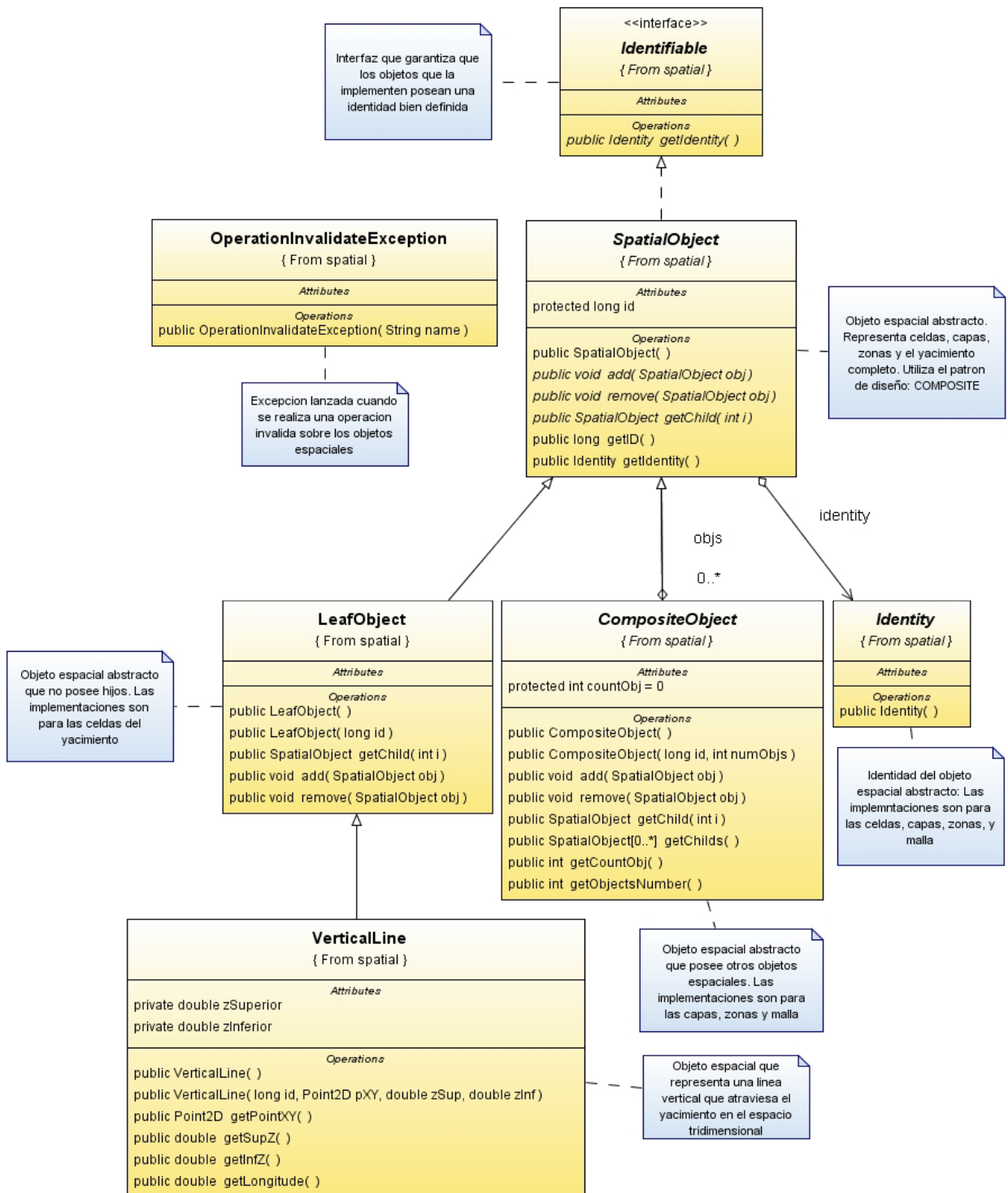
Paquete: **com.cigp.reservoir**

Paquete encargado de representar el modelo yacimiento y sus datos relevantes.



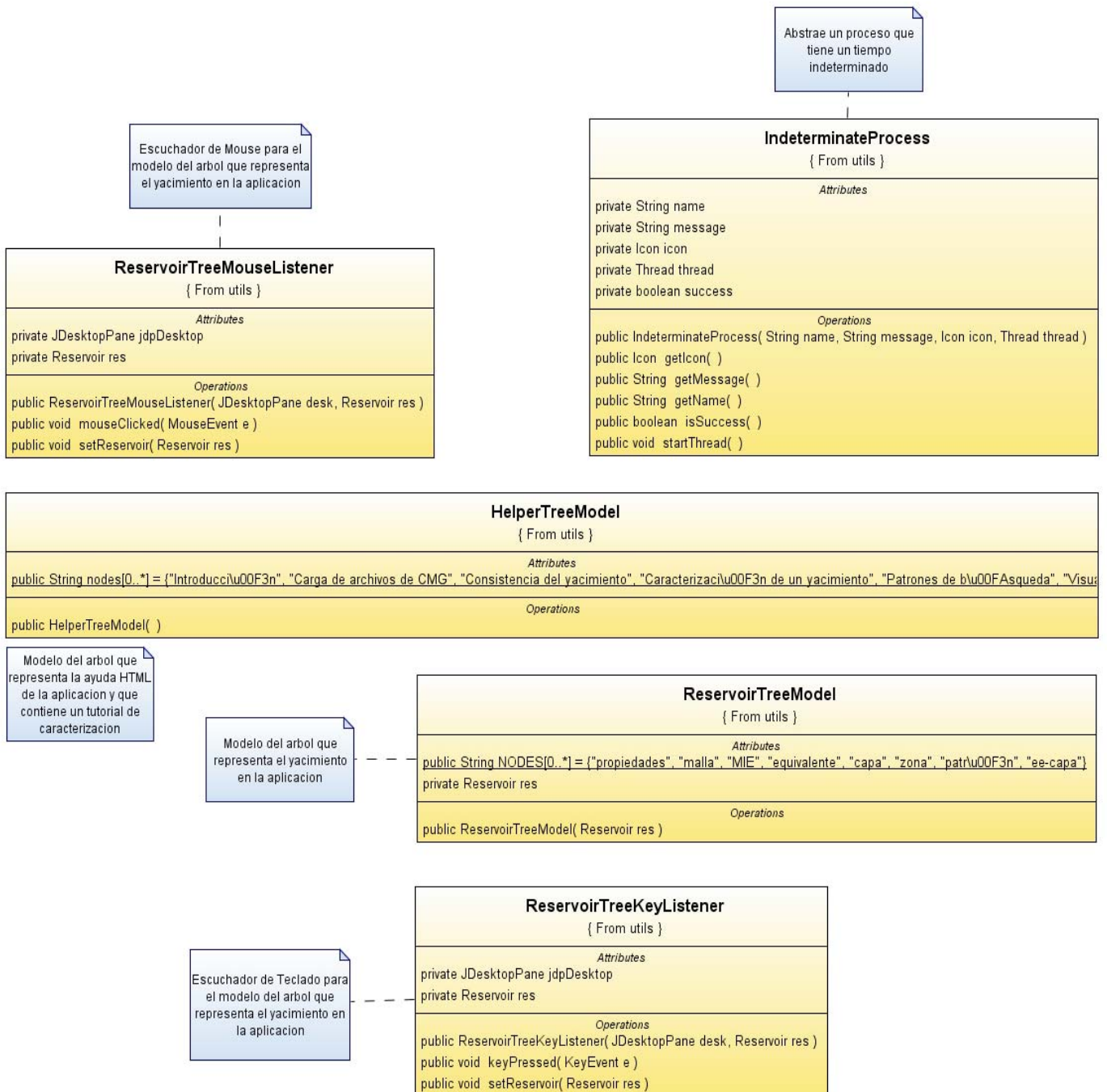
Paquete: com.cigp.spatial

Paquete encargado de representar los objetos del yacimiento (Celdas, Zonas, Capas, Malla).



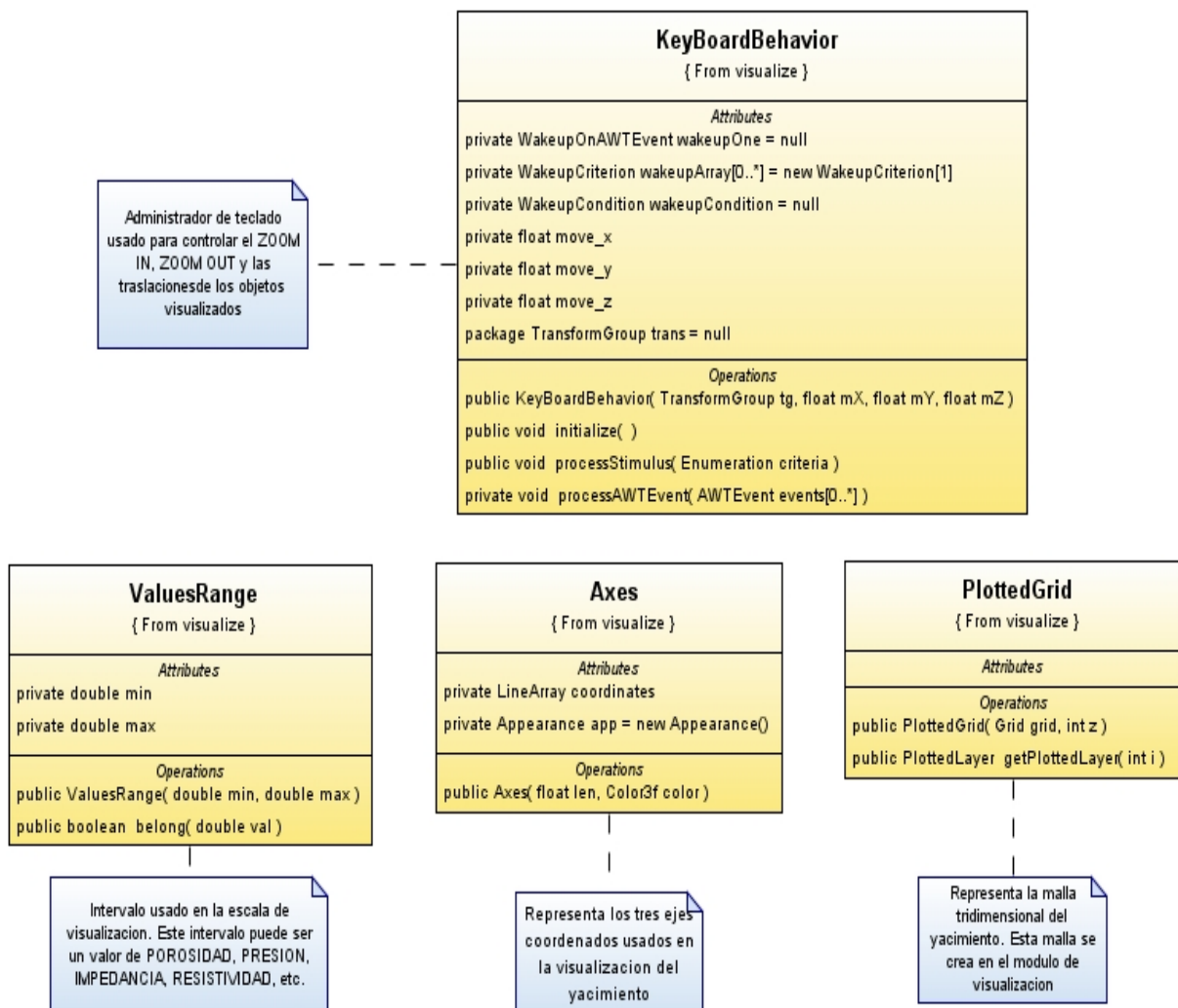
Paquete: `com.cigp.utils`

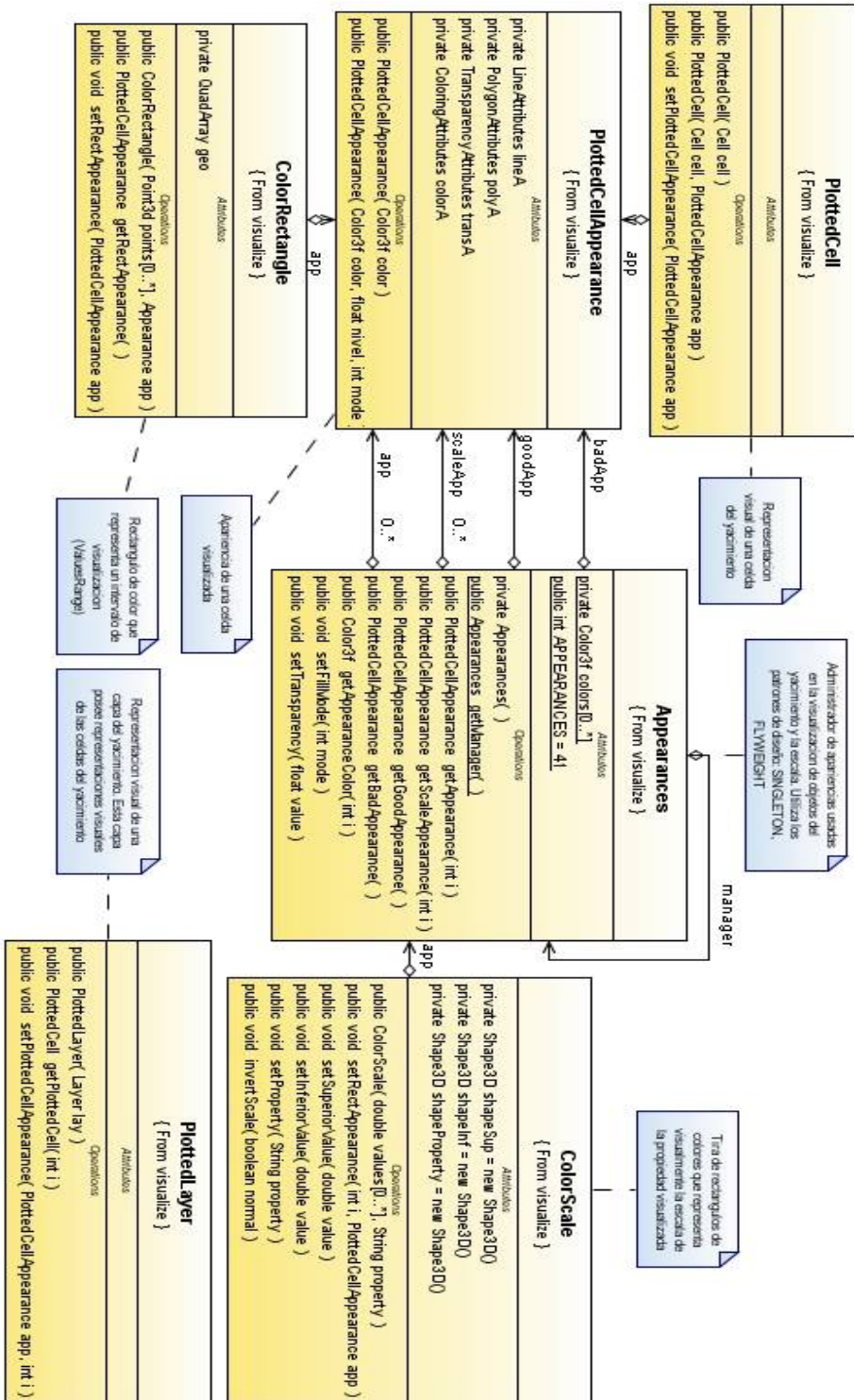
Paquete de objetos utilitarios usadas extensivamente en la aplicación.



Paquete: `com.cigp.visualize`

Paquete encargado de representar los objetos del yacimiento en el módulo de visualización. Proporciona funcionalidad a nivel de Mouse y Teclado.

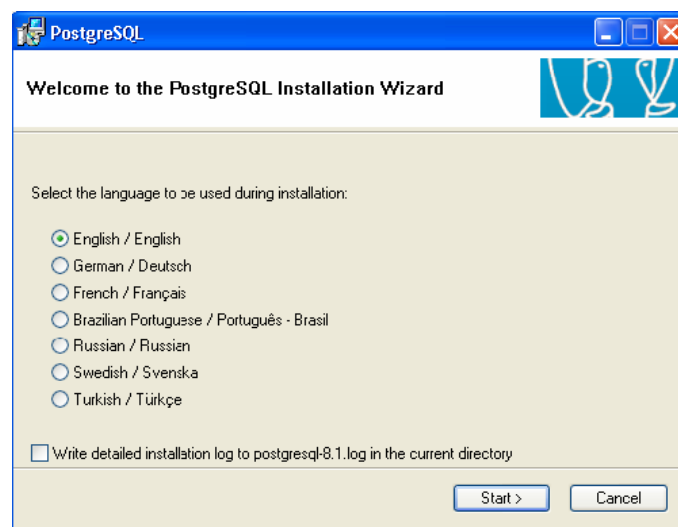




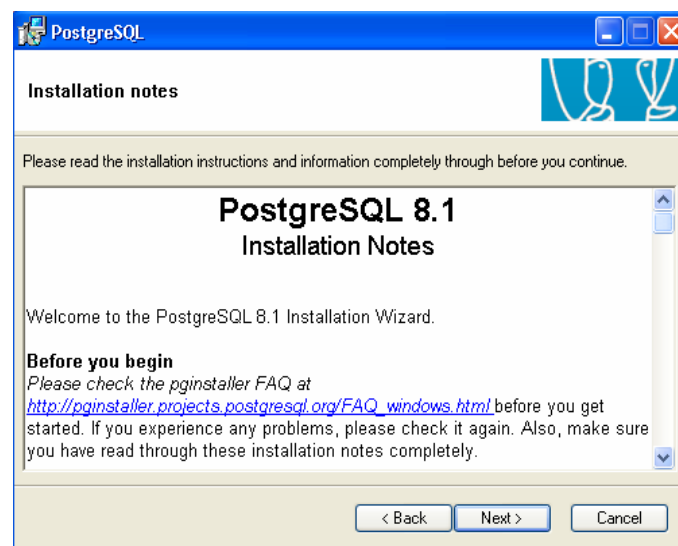
ANEXO D. INSTALACIÓN DE POSTGRES

Antes de ejecutar RECH, se debe tener instalada el Sistema Manejador de Bases de Datos Postgres 8.1 usando el esquema público 'rech'. En esta sección detallamos el proceso de instalación de Postgres y el esquema 'rech'.

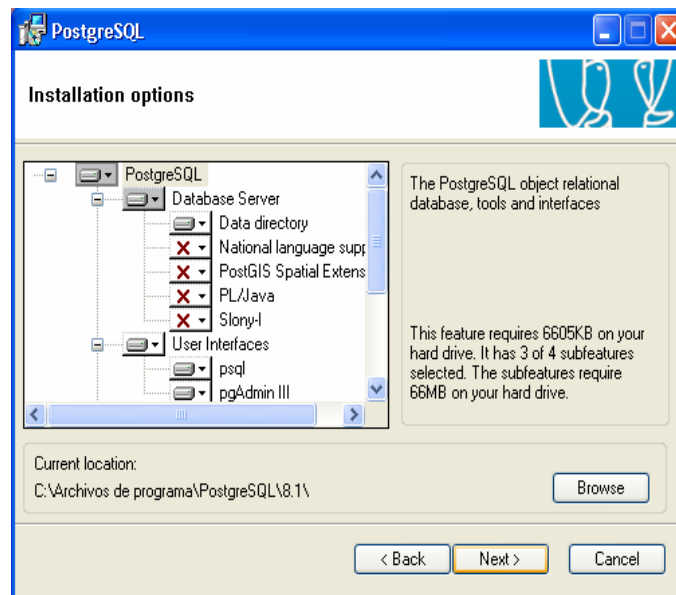
Ejecutamos el archivo **postgresql-8.1.setup** y seleccionamos idioma en el que se va a mostrar el programa de instalación.



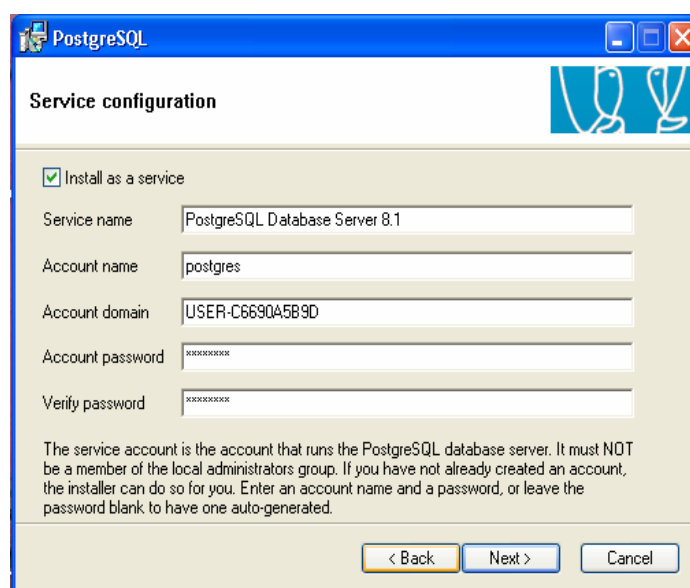
Se aceptan los términos y condiciones y damos clic en **Next>**.



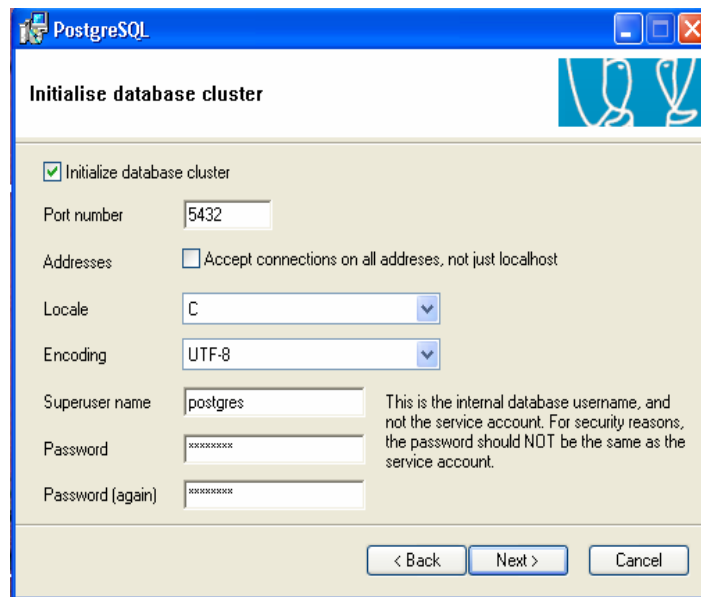
Se habilitan las opciones de el entorno de comandos **psql** y de la interfaz grafica **pg_admin**.



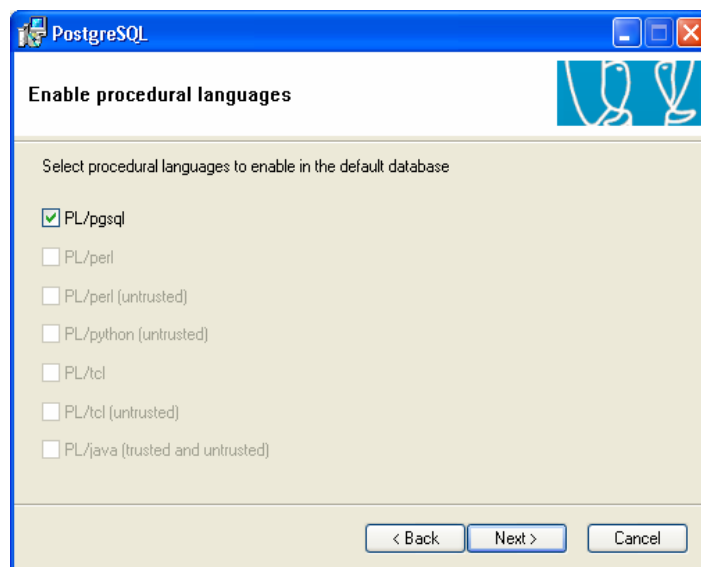
Se crea un nombre de cuenta y un password, aunque ya aparece por defecto un nombre de cuenta (postgres) y se puede dejar así.



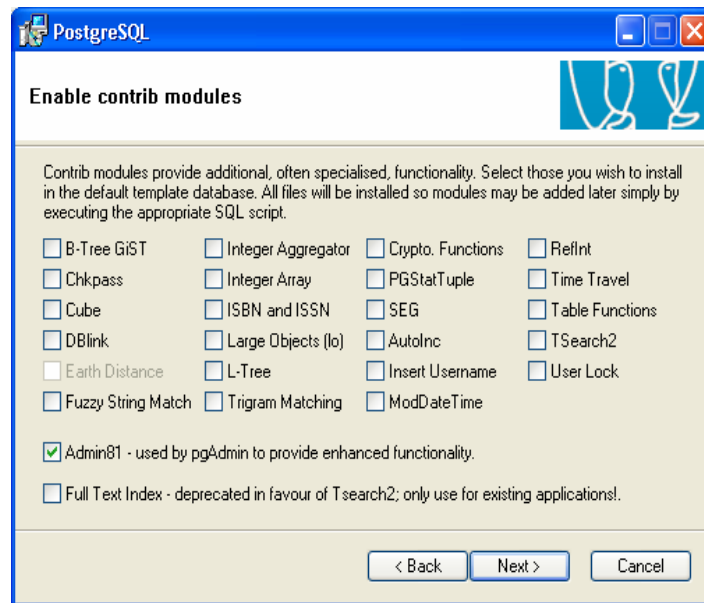
En esta sección es de vital importancia establecer el superusuario y el password a 'postgres' para no tener que configurar el archivo **connect.PROPERTIES** de RCH. Luego damos clic en **Next>**.



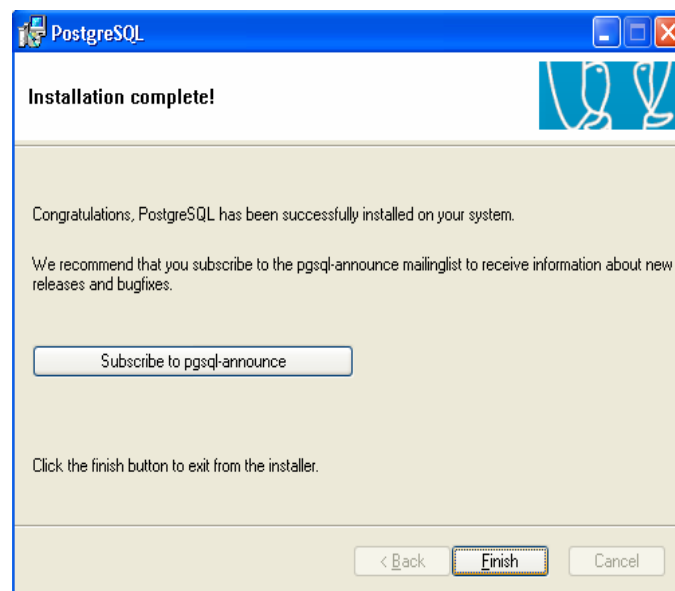
Se habilita la opción del lenguaje procedural de postgresql PL/pgsql y damos clic en **Next>**.



También se pueden habilitar otras herramientas que trae Postgres, pero no son necesarias en este caso.



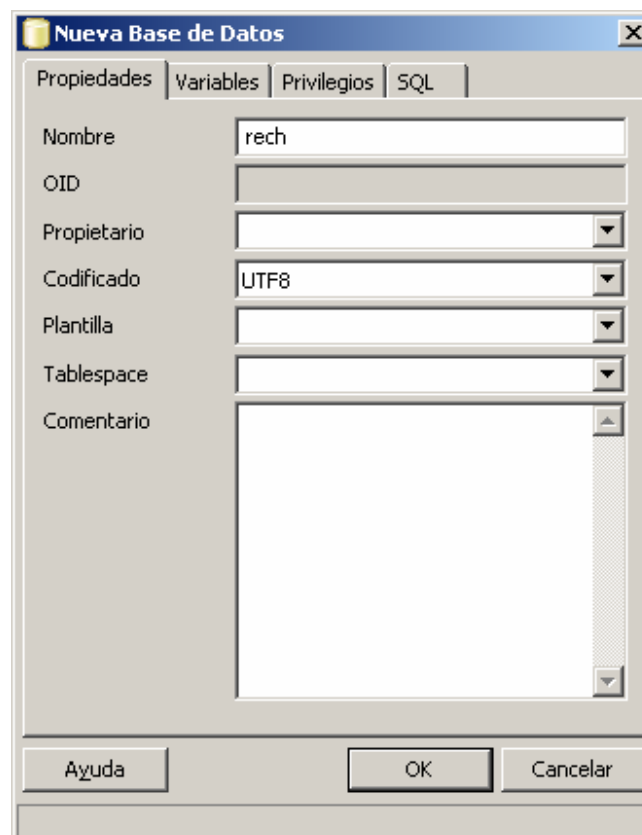
Con este mensaje se completa la instalación.



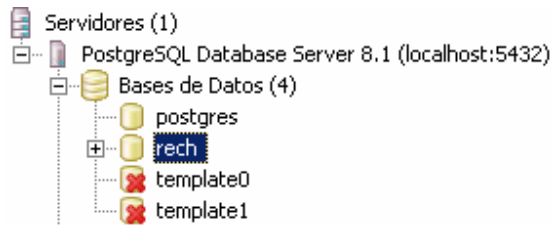
Luego de tener instalada Postgres en el equipo procedemos a crear la base de datos que administra RECH externamente. Se debe crear una nueva base de datos dando clic en editar, nuevo objeto, nueva base de datos.



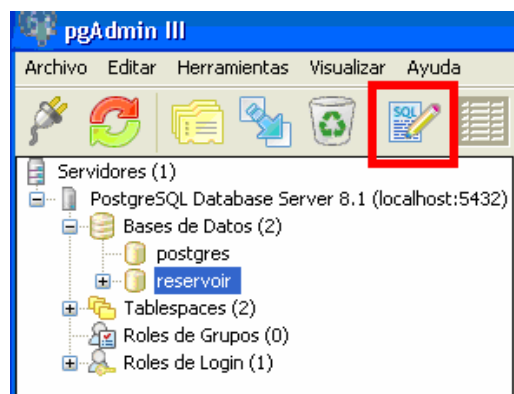
Colocamos el nombre de **rech** y damos clic en **OK**.



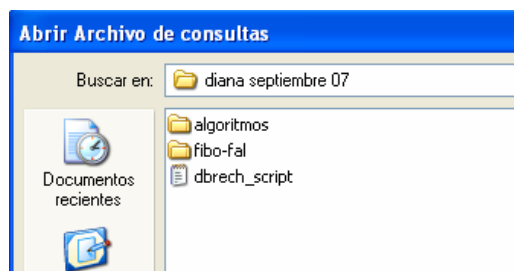
Luego aparece la base de datos creada en el árbol izquierdo de pgAdmin.



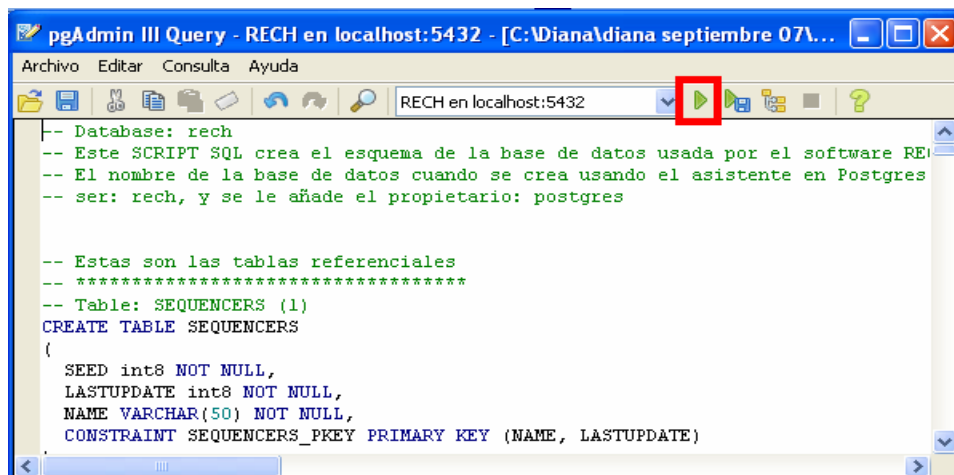
Nos dirigimos al editor de SQL.



Buscamos el script que crea las tablas y relaciones de la base de datos.



El contenido del script es como sigue.

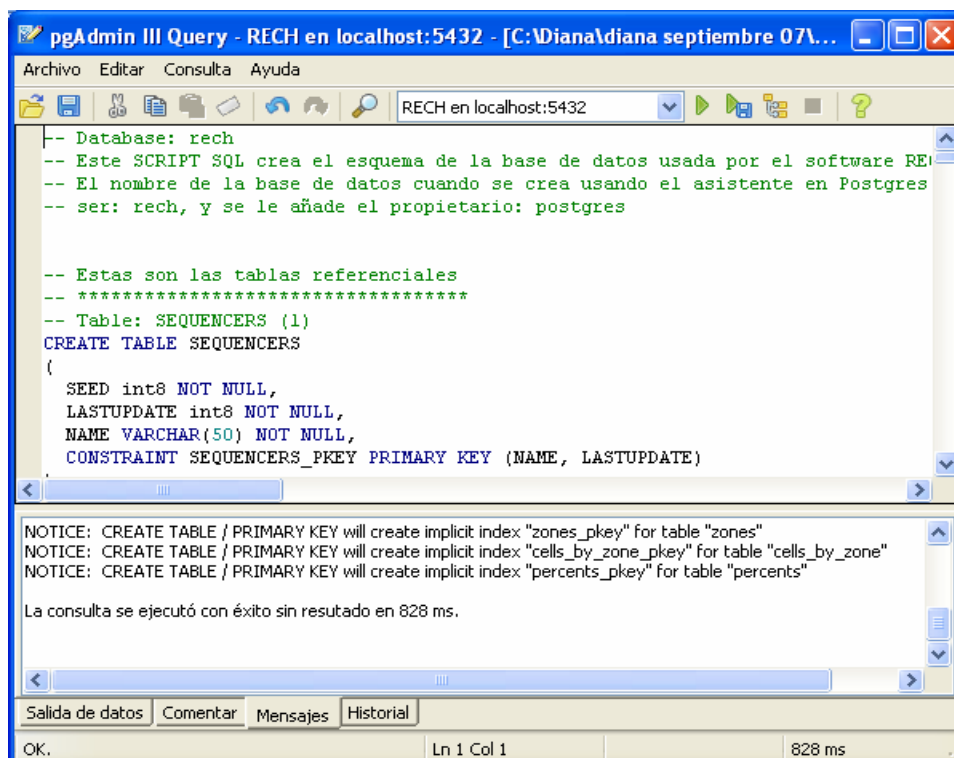


```

pgAdmin III Query - RECH en localhost:5432 - [C:\Diana\diana septiembre 07\...
Archivo  Editar  Consulta  Ayuda
RECH en localhost:5432
-- Database: rech
-- Este SCRIPT SQL crea el esquema de la base de datos usada por el software RECH
-- El nombre de la base de datos cuando se crea usando el asistente en Postgres
-- ser: rech, y se le añade el propietario: postgres

-- Estas son las tablas referenciales
-- *****
-- Table: SEQUENCERS (1)
CREATE TABLE SEQUENCERS
(
  SEED int8 NOT NULL,
  LASTUPDATE int8 NOT NULL,
  NAME VARCHAR(50) NOT NULL,
  CONSTRAINT SEQUENCERS_PKEY PRIMARY KEY (NAME, LASTUPDATE)
)
  
```

Ejecutamos el script y este procedimiento crea la base de datos usada por RECH. El resultado arrojado por el script debe verse como sigue.



```

pgAdmin III Query - RECH en localhost:5432 - [C:\Diana\diana septiembre 07\...
Archivo  Editar  Consulta  Ayuda
RECH en localhost:5432
-- Database: rech
-- Este SCRIPT SQL crea el esquema de la base de datos usada por el software RECH
-- El nombre de la base de datos cuando se crea usando el asistente en Postgres
-- ser: rech, y se le añade el propietario: postgres

-- Estas son las tablas referenciales
-- *****
-- Table: SEQUENCERS (1)
CREATE TABLE SEQUENCERS
(
  SEED int8 NOT NULL,
  LASTUPDATE int8 NOT NULL,
  NAME VARCHAR(50) NOT NULL,
  CONSTRAINT SEQUENCERS_PKEY PRIMARY KEY (NAME, LASTUPDATE)
)

NOTICE: CREATE TABLE / PRIMARY KEY will create implicit index "zones_pkey" for table "zones"
NOTICE: CREATE TABLE / PRIMARY KEY will create implicit index "cells_by_zone_pkey" for table "cells_by_zone"
NOTICE: CREATE TABLE / PRIMARY KEY will create implicit index "percents_pkey" for table "percents"

La consulta se ejecutó con éxito sin resultado en 828 ms.

Salida de datos  Comentar  Mensajes  Historial
OK.  Ln 1 Col 1  828 ms
  
```