

INTEGRACIÓN NO LINEAL DE ATRIBUTOS SÍSMICOS Y DATOS DE POZO NO CONVENCIONALES: DIFRACCIÓN DE RAYOS X Y FACIES CLÁSTICAS

Claudio Larriestra⁽¹⁾, Daniel G. Poiré⁽²⁾, Roberto García⁽³⁾

(1) clarriestra@uolsinectis.com.ar

(2) poire@cig.museo.unlp.edu.ar

(3) rgarcia@capex.com.ar

Keywords: Gaussian Neural Network, X Ray data, Indicator curve, seismic-well data integration

Abstract

A multivariate non-linear model was built to integrate seismic data (amplitude attributes and pre-stack elastic inversion) with non conventional well data for Quintuco Formation and clastic sequences lying under Vaca Muerta Formation, in Agua del Cajon area, Neuquen basin, Argentina. The non-standard well data consist of continuous and discrete logs derived from mineralogical X ray diffraction analysis of cutting and sedimentological analysis from cores.

The X ray diffraction data consisted of calcite, dolomite, sulfate and clay content analysis over key wells for Quintuco Fm. with a sampling interval of 2 mts. average. The clastic curves was built by coding clastic facies using a numerical scale related to the paleoenvironment energy estimated for that facies.

A non- linear regression model was built using gaussian neural networks with seismic as input and well data as target. Model data agreement was tested via cross-validation, extracting a known data and re-estimating it using the remaining ones. The best models were selected from the highest correlation between actual and estimated data.

As a result, 3d cubes of estimated percentage of limestone and dolomite was obtained for Quintuco Fm. and a cube of clastic sequences for sub-Vaca Muerta beds. These cubes allowed the understanding of the geological and sedimentological history of the analyzed formations and the methodology showed the high potential value of cuantitativate and systematic analysis of cutting data.

INTRODUCCIÓN

La integración de datos sísmicos y de pozo ha sido motivo de numerosas investigaciones en los dominios de la soluciones determinísticas o geoestadísticas debido principalmente a la diferencia de resoluciones verticales y areales de los tipos de datos mencionados. El objetivo de dicha integración es generar un modelo que permita llevar la propiedad petrofísica representada en el perfil, a un volumen ajustado a la escala de la sísmica.

En general los registros utilizados son aquellos derivados de propiedades acústicas (perfil sísmico), densidad o incluso perfiles que representan otras propiedades (Gamma Ray, SP) y que son susceptibles de ser integrados con la sísmica 3D para generar volúmenes equivalentes de dichas propiedades.

En esta contribución se da a conocer un grupo de resultados en donde la curvas objetivo a integrar son productos de estudios no convencionales en la actividad petrolera y que están directamente relacionados a la roca. Los estudios referidos son el análisis mineralógico por difracción de rayos X (DRX) por un lado y las curvas indicadoras de facies clásticas por otro.

La condición estadística fundamental para emplear este tipo de datos es el muestreo continuo a la máxima resolución que permita su extracción, ya sea a partir de cutting (DRX) o de corona (curvas indicadoras de facies clásticas). De esta forma se obtienen registros composicionales continuos a una resolución de 2 metros promedio en el caso del cutting y curvas discretas de facies sedimentarias a una resolución de 10 cm en el caso de las coronas.

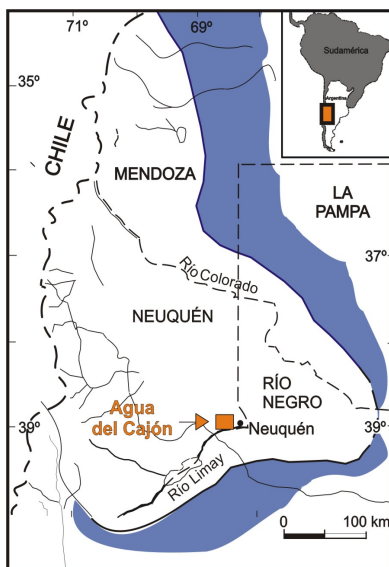


Fig. 1: Mapa de ubicación

La investigación se realizó en el bloque Agua del Cajón, Provincia de Neuquén, República Argentina (Fig. 1), ubicado en las cercanías de la Dorsal de Huincul de la Cuenca Neuquina. Las unidades analizadas fueron la sucesión carbonática mixta de la Formación Quintuco y unidades silicoclásticas subyacentes a la Formación Vaca Muerta. En el área, este "Sub-Vaca Muerta" puede incluir a las formaciones Tordillo, Lotena y Lajas dependiendo del esquema estratigráfico adoptado.

METODOLOGÍA

Con el objeto de llevar adelante esta investigación, se definieron 9 llaves a partir de la compilación de tramos de pozos distribuidos en el área. En cada llave se trató de combinar tramos de corona en buen estado con los cuttings de pozos completos, de manera de abarcar la mayor cantidad de columna litológica. Las coronas fueron analizadas por determinación de facies sedimentarias y difracción de rayos X. En cambio los cuttings

fueron tratados solo con técnicas de difracción de rayos X.

Material estudiado - Llaves

Para los estudios en coronas y cutting se estudiaron 220 metros recuperados de corona, 1605 metros de cutting, los cuales involucraron 626 muestras para difracción de rayos X, involucradas en las 9 llaves. Cuatro llaves involucran a los calcáreos mixtos de la Formación Quintuco y cinco a los clásticos sub-Formación Vaca Muerta.

Curvas Indicadoras de Facies sedimentarias en coronas

En todas las coronas estudiadas se realizó la definición e identificación de facies sedimentarias sobre la base de la litología, textura y estructuras sedimentarias. Posteriormente se seleccionó un código apropiado para su denominación, de acuerdo a sus características netamente descriptivas, como lo son el tamaño de grano y la estructura sedimentaria.

Cabe recordar que se define como facies a un cuerpo de roca que puede ser identificado sobre la base de alguna característica particular. Cuando se hace referencia a los aspectos físicos de las rocas se utiliza el término litofacies, y aunque la definición de las mismas se sustente en aspectos netamente objetivos, también se definen en función de que representen un determinado proceso físico (Reading, 1986).

Para adjudicar a las facies sedimentarias un valor numérico que permita su tratamiento estadístico, se determinó una escala que contemple un ordenamiento de la energía inferida, de los agentes de transporte (Tabla 1).

Facies	Finas					Heterolíticas			Arenosas					Areno-guijosas		
	Fm	Fl	Htp	Ht	Hta	Sm	Shmd	Sp	St	Sh	SGm	SGp	SGh			
	10	12	13	14	15	20	22	22	24	26	30	32	34			

Facies	Gravosas										
	Gh	Gm	Gm (ø1)	Gm (ø2)	Gm (ø3)	Gm (ø4)	Gm (ø5)	Gm (ø6)	Gm (ø7)	Gm (ø8)	Gm (ø9)
	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50

Tabla 1: Escala numérica para representación de facies

De esta manera se obtiene una escala gradada ascendente, con saltos entre pelitas (finos), areniscas, areniscas guijosas y gravas, como se observa en la figura 2. El valor numérico de cada facies sedimentaria se representa cada 10 cm de corona y se lleva a una base de datos con dos columnas: profundidad (con un intervalo de 10 cm) y facies sedimentaria numérica.

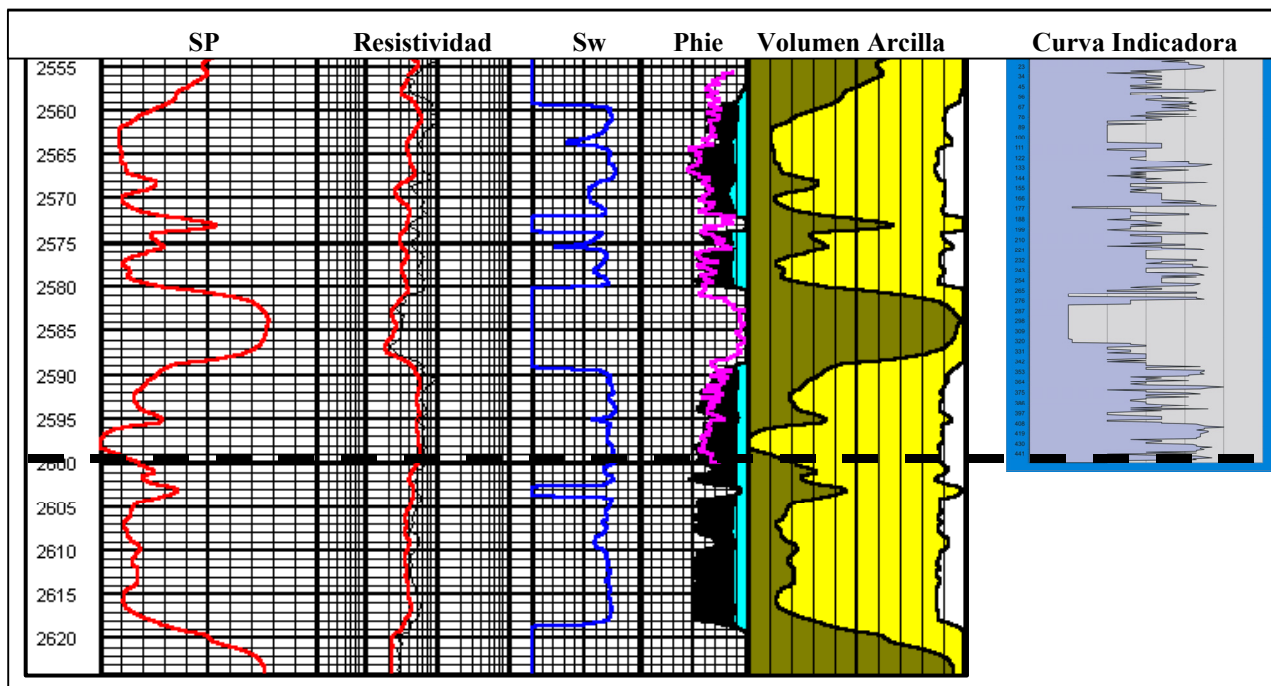


Fig. 2: Perfil tipo de la zona estudiada (Sub-Vaca Muerta) y Curva Indicadora de Facies Clásticas (en azul)

Difracción de Rayos X (DRX)

A través de la difracción de rayos X se estudió la composición mineralógica de muestras de corona y cutting, mediante los análisis de Roca Total y Muestras Orientadas.

La técnica de Roca Total consiste en el análisis por difracción de rayos X de una muestra representativa del total de la roca. La misma se obtiene moliendo un trozo de roca hasta la obtención de un polvillo muy fino (malla 230 ASTM), que se coloca en un portamuestras de aluminio y se compacta uniformemente, obteniéndose una superficie lisa y regular para ser expuesta a los rayos X. De esta manera se identifican todos aquellos componentes minerales de una roca, que se encuentren en una proporción mayor al 3 %.

Los análisis de Muestra Orientada para arcillas, se realizan sobre el polvillo obtenido, pero llevándolo previamente a suspensión en agua destilada. Luego se lleva el preparado a un vibrador ultrasónico durante 5 minutos, para que el material muy fino (menor a 4 micrones) quede en suspensión. Después de un tiempo determinado y de acuerdo a la ley de Stokes, se extrae la muestra con pipeta de la sección subsuperficial de la suspensión y se la lleva a un portaobjetos para su secado a temperatura de laboratorio. De esta manera los argilominerales se sedimentan lentamente sobre el mismo, adquiriendo una orientación preferencial según el plano (001). Esta muestra es denominada *natural*.

Para realizar la identificación y cuantificación de las arcillas, también se realizan dos ensayos más sobre muestras denominadas *glicolada* y *calcinada*. La primera se obtiene exponiendo el preparado natural a los vapores de etilenglicol, durante veinticuatro horas. La calcinada se logra colocando el preparado natural en estufa, a 550 grados centígrados durante dos horas.

Cabe destacar que el sistema se encuentra informatizado a través de una interfase, de modo que todos los diagramas de DRX son llevados a archivos compatibles con los programas relacionados a graficación y tratamiento de datos.

Una vez interpretados los difractogramas y reconocidos los minerales presentes en cada muestra según normas y procedimientos internacionales, se realiza su análisis semi-cuantitativo y se vuelcan los resultados en las tablas composicionales correspondientes.

A partir de las mismas se grafica la distribución en cada pozo de los minerales de la roca total y argilominerales. Con respecto a los componentes de la roca total, se pueden realizar distintos tipos de gráficos de acuerdo a los resultados. Por ejemplo en las sucesiones carbonáticas mixtas con presencia de sulfatos de la Formación Quintuco, se ha visto conveniente desarrollar gráficos de distribución en el pozo de:

a) Roca Total, b) Silicoclástico-Carbonático-Sulfato, c) Calcita vs. Dolomita, y d) Calcita-Dolomita-Siderita-Yeso-Anhidrita e) Arcillas (Fig. 3).

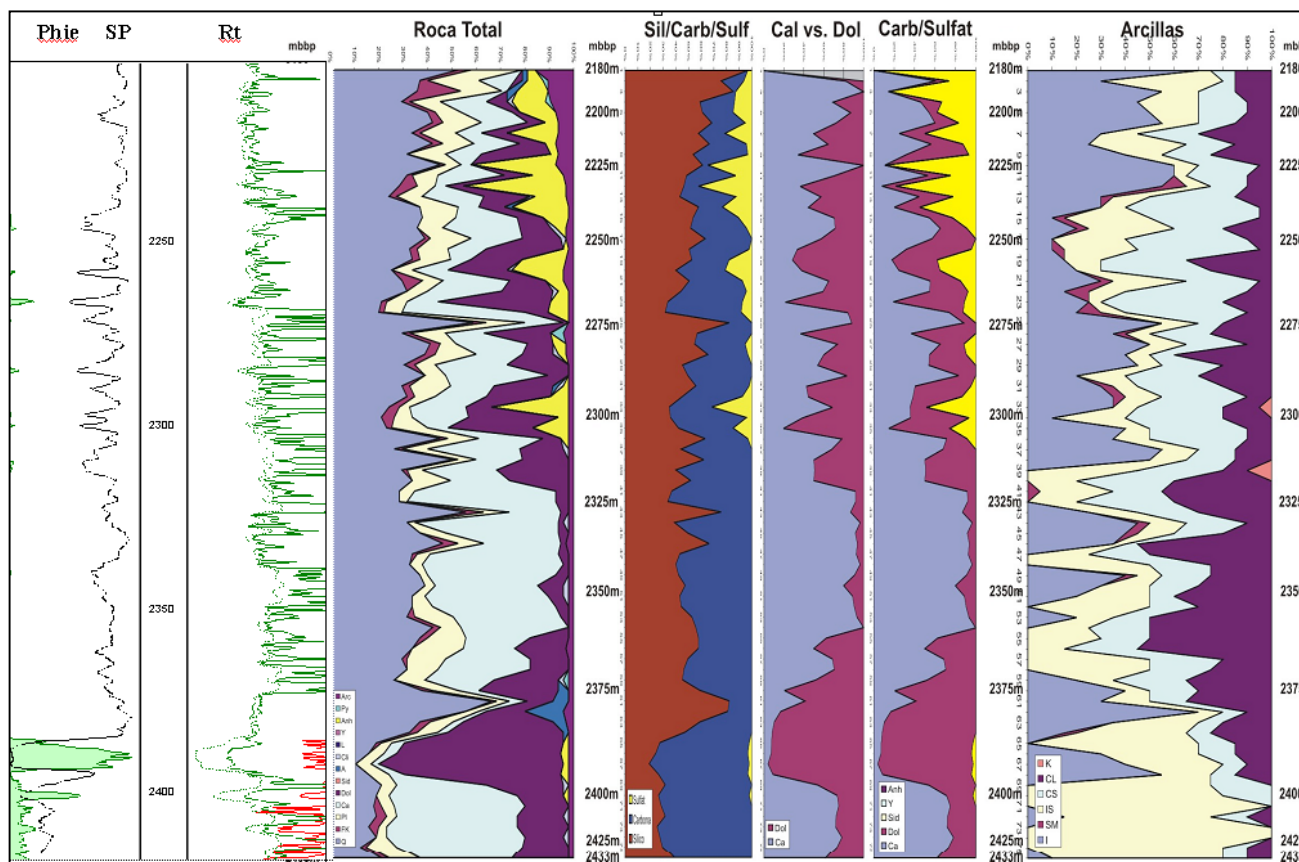


Fig. 3: Perfil tipo de la zona estudiada (Formación Quintuco) y perfiles composicionales (DRX)

Integración de datos Sísmicos y de Pozo

La integración consiste en la construcción de un modelo de regresión no lineal a partir de la selección del grupo de atributos sísmicos (principalmente atributos de amplitud e inversión elástica) que mejor ajusten a los registros litológicos detallados mas arriba.

La selección de atributos se realiza mediante la técnica estándar de Regresión Múltiple de a Pasos. Una vez establecida la combinación óptima de atributos se procede al refinamiento de la estimación mediante algoritmos No Lineales, propagándose dicho modelo al resto del cubo sísmico.

La metodología empleada se compone tres etapas, a saber: a) Análisis Exploratorio de Datos para la determinación de las combinaciones óptimas que mejor ajustan a los perfiles litológicos, b) Perfeccionamiento del ajuste logrado mediante Métodos No Lineales (Redes Neuronales), c) Análisis del Modelo tridimensional en tiempo.

Análisis Exploratorio de Datos

Consiste en la investigación de relaciones lineales entre los registros construidos y los atributos sísmicos que se puedan extraer para la ventana en tiempo asociada a la zona de interés. Los registros deben tener un comportamiento normal gaussiano a los efectos de facilitar la regresión. Regresión Lineal Múltiple de a pasos: Este método de regresión es una variante del Mínimos Cuadrados clásico, donde la selección del conjunto de variables independientes que mejor correlacionan con el objetivo se define por agrupación de pares, tripletes, etc., de atributos. Este esquema aditivo va definiendo el conjunto de atributos que mejor correlación observa con el objetivo. El modelo lineal multivariado se logra cuando las diferencias cuadradas entre el objetivo medido y el estimado son mínimas. Para cada tiempo t la variable objetivo es estimada por el modelo lineal:

$$O(t) = w_0 + \sum_{i=1}^m w_i At_i(t)$$

Donde $O(t)$ es el objetivo y los $At_i(t)$ son los m atributos y donde los pesos w_i son calculados minimizando la expresión:

$$E^2 = 1/n \sum_{i=1}^n \left[O_i - \left(w_0 + \sum_{j=1}^m w_j At_{ji} \right) \right]^2$$

Donde O es el objetivo a estimar, At son los atributos sísmicos, w_0 y w_j son los coeficientes calculados, m es el número de atributos y n el número de puntos considerados.

El cálculo se realiza para la todo el conjunto de atributos, seleccionándose el atributo que mejor correlaciona, luego con este y el resto se forman pares que a su vez son correlacionados con el objetivo eligiéndose el mejor par de correlación. Posteriormente se forman tripletes y así sucesivamente hasta definir el conjunto de atributos que mejor estiman el objetivo. Si bien no es la combinación matemáticamente óptima, es suficiente a los efectos de definir las relaciones más importantes entre los atributos y el objetivo.

Regresión Múltiple con Convolución: Dada la imposibilidad de asegurar la correspondencia exacta para un determinado tiempo t , entre el dato duro (de pozo) y los atributos sísmicos por un lado, además de la imprecisión en profundidad (y tiempo) del dato de pozo (DRX de cutting) por otro, es que se decide utilizar la variante de Regresión Múltiple con convolución de los atributos sísmicos.

Para cada tiempo t la variable objetivo es estimada por el modelo lineal múltiple con convolución:

$$O(t) = w_0 + \sum_{i=1}^m w_i * At_i(t)$$

Donde $O(t)$ es el objetivo y los $At_i(t)$ son los m atributos y donde los w_i son operadores de convolución ($*$ denota convolución) calculados minimizando la expresión:

$$E^2 = 1/n \sum_{i=1}^n \left[O_i - \left(w_0 + \sum_{j=1}^m w_j * At_{ji} \right) \right]^2$$

Donde O es el objetivo a estimar, At son los atributos sísmicos, w_0 y w_j son los operadores de convolución, m es el número de atributos y n el número de puntos considerados

Estimación con Redes Neuronales

Son métodos no lineales de estimación cuyo fundamento es la detección de relaciones entre los datos mediante procesos iterativos de minimización de diferencias, entre el dato objetivo estimado y el medido. La aplicación de esta metodología consta de varias etapas, a saber: a) Entrenamiento de la red, b) Validación de la red y c) Aplicación de la red construida al volumen sísmico.

Entrenamiento

Una red neuronal es una relación matemática que permite describir un conjunto de datos en función de otro. Estas relaciones pueden ser no-lineales de forma desconocida. En la etapa de entrenamiento del algoritmo se estudia la relación en un conjunto de datos donde se conoce tanto la variable medida (datos sísmicos) como el objetivo (variable relacionada a la roca). En esta etapa la red neuronal aprende la relación entre ambos tipos de datos.

Validación

El segundo paso es la validación de la red, es decir su aplicación sobre datos con resultado conocido a priori. La validación permite cuantificar el error de estimación (diferencias cuadradas entre el dato real y el estimado) y definir el conjunto óptimo de datos sísmicos que mejor contribuyen a la estimación.

Aplicación del Modelo

El tercer y último paso es la aplicación de la red construida sobre el volumen sísmico completo.

Para aplicar este tipo de algoritmos en la integración de datos (sísmica y pozos) se debe definir cuidadosamente la ventana de aplicación o interés. Existen dos razones para ello:

- Son algoritmos que consumen mucho tiempo de procesamiento, tanto en la etapa de entrenamiento como en las de validación y aplicación.
- La relación, en general no lineal, entre los conjuntos de datos puede ser variable con el tiempo, por lo tanto es conveniente concentrar el esfuerzo en la zona de interés.

Bajo el término general de redes neuronales se incluye un vasto conjunto de algoritmos de estimación no lineal. Uno de los problemas centrales de estos métodos es el de sobreentrenamiento, cuyo principal efecto es el de terminar estimando ruido. Los algoritmos empleados, resultantes de distintas variantes de las redes neuronales, fueron:

Ensamble de Redes Neuronales (NNE)

Consiste en la definición al azar de diferentes subconjuntos de puntos dato generados por ‘bootstrap’ (muestreo con reemplazo) a partir de los datos originales. Cada predictor se optimiza individualmente a través de métodos estándar como perceptron multicapas (Masters, 1995, Mc Cormak, 1991) y el ensamble final realiza un promedio convenientemente pesado de las predicciones individuales. El desvío estándar de las estimaciones da una noción de la incertidumbre asociada a la estimación final. En este sentido este algoritmo tiene un componente estadístico asociado que permite apreciar el grado de dispersión de los resultados, a diferencias del resto que produce un resultado único (Granitto, et al. 2001, Pina et al., 2001).

Redes Neuronales Gaussianas

Se utiliza un conjunto inicial de n datos para entrenar, $[At_{1i}, At_{2i}, \dots, At_{mi}, O_i]$ donde At_{ji} son los m atributos sísmicos y O_i los valores del objetivo correspondientes a cada tiempo i. Para un nuevo dato con atributos sísmicos $x = [At_{1x}, At_{2x}, \dots, At_{mx}]$, el nuevo valor del objetivo es estimado por:

$$\hat{O}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n O_i \exp(-D(x, x_i))}{\sum_{i=1}^n \exp(-D(x, x_i))}, \quad D(x, x_i) = \sum_{j=1}^m \left(\frac{x_j - x_{ij}}{\sigma_j} \right)^2$$

donde $D(x, x_i)$ es la distancia entre el nuevo punto y los puntos del conjunto de entrenamiento. Esta distancia es calculada en el espacio multidimensional definido por los atributos, y está escalada por sus varianzas σ_j , que pueden ser diferentes para cada uno de los atributos. De este modo, la diferencia entre los valores estimados por el conjunto de entrenamiento, permite definir el error de predicción

como: $E_v(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_m) = \sum_{i=1}^m (O_i - \hat{O}_i)^2$ (Masters, 1995)

RESULTADOS

Estimación de Facies Clásticas (Sub-Vaca Muerta)

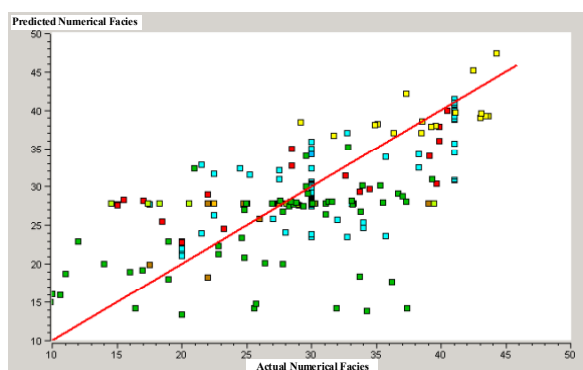


Fig. 4: Curvas Indicadoras de Facies Medidas versus Estimadas

A partir del cubo generado se analizó en detalle la variabilidad de las facies clásticas, mediante cortes verticales y extrayendo promedios por ventana del cubo de facies. La figura 5 es el promedio de facies clásticas para todo el intervalo. En la misma puede observarse que las facies clásticas van disminuyendo su

En la figura 4 se observa el producto final de la aplicación del modelo de redes neuronales gaussianas con las que se obtuvieron mejores resultados. La correlación entre las curvas indicadoras de facies clásticas medidas versus las calculadas por el modelo no lineal, es de 0,7. Esta correlación es producto del proceso de validación cruzada, en el que se extrae cada curva indicadora dato y se la estima con el resto los datos que conforman el modelo (pozos y sísmica). Los atributos que mayor contribución aportan a la estimación final son la impedancia P, la polaridad aparente y la segunda derivada de la amplitud.

Finalmente el modelo es aplicado al cubo sísmico entre los horizontes de interés generándose un cubo de facies clásticas para los términos de Sub-Vaca Muerta.

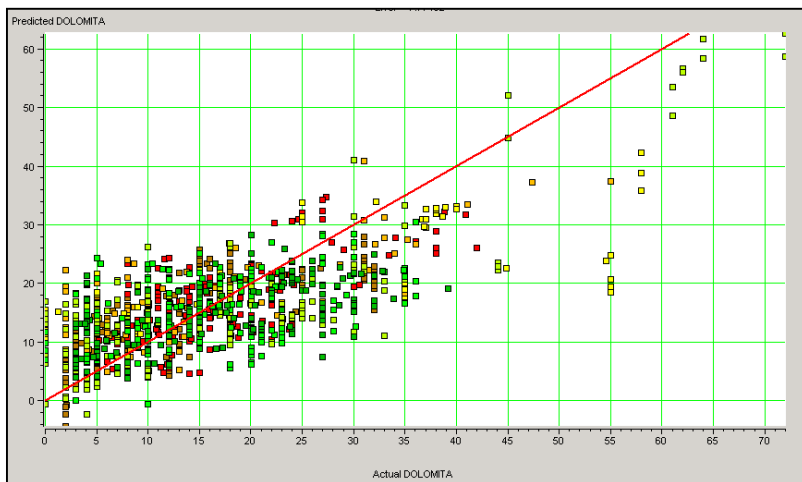


Fig. 7: Porcentaje de Dolomita medido (DRX) vs. estimado

En el área cercana a la dorsal la dolomita se distribuye en forma mas homogénea en toda la columna, mientras que en la parte noroccidental se restringe a dos niveles de los cuales el más conspicuo esta ubicado en el Quintuco inferior.

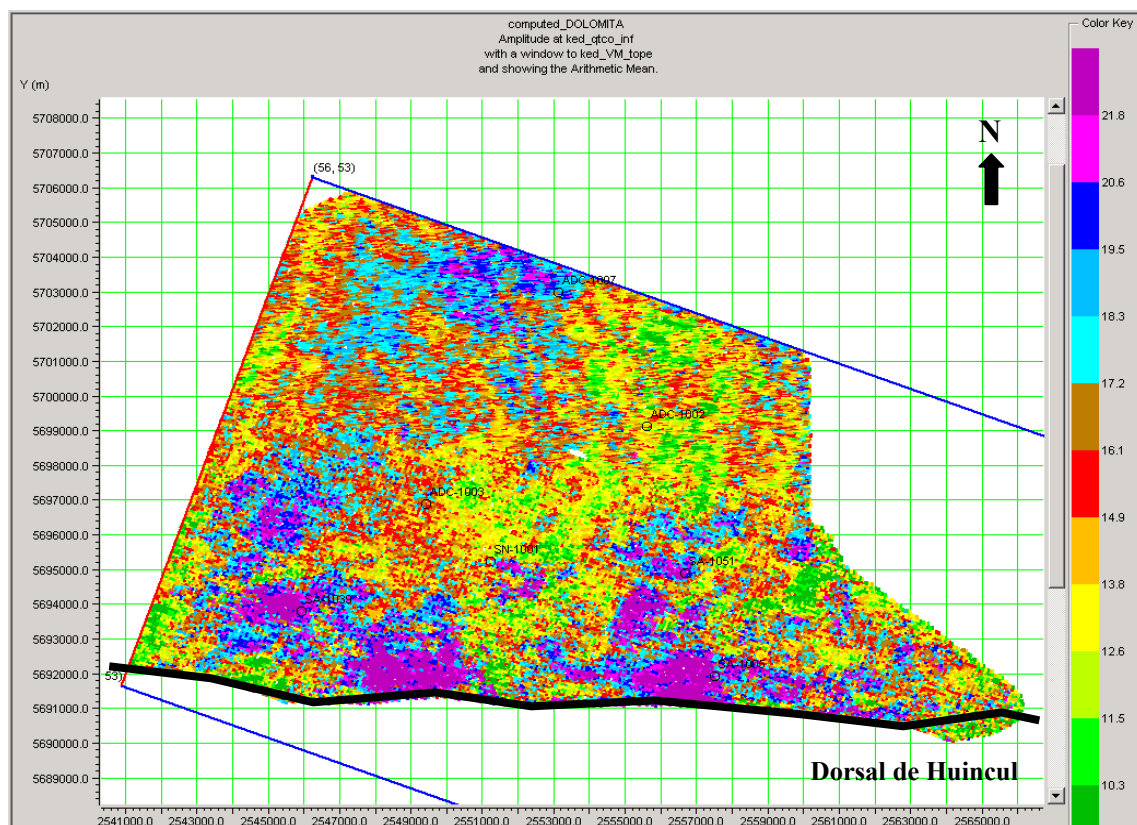


Fig. 8: Mapa de Porcentaje Promedio de Dolomía

De igual forma se obtuvo un cubo de porcentaje de calcita a partir de la aplicación de un modelo no lineal con la participación de los atributos impedancia P, frecuencia ponderada con la amplitud, Lambda Rho y Mu Rho.

En la figura 10 se ilustra la correlación entre el porcentaje de calcita medido versus el estimado por el modelo, cuyo valor es de 0,68. En el mapa de distribución media de calcita (Fig. 11) se ve reflejado una zona de mayor concentración de caliza en la parte central del área, mientras que en la zona de la Dorsal los porcentajes disminuyen notablemente.

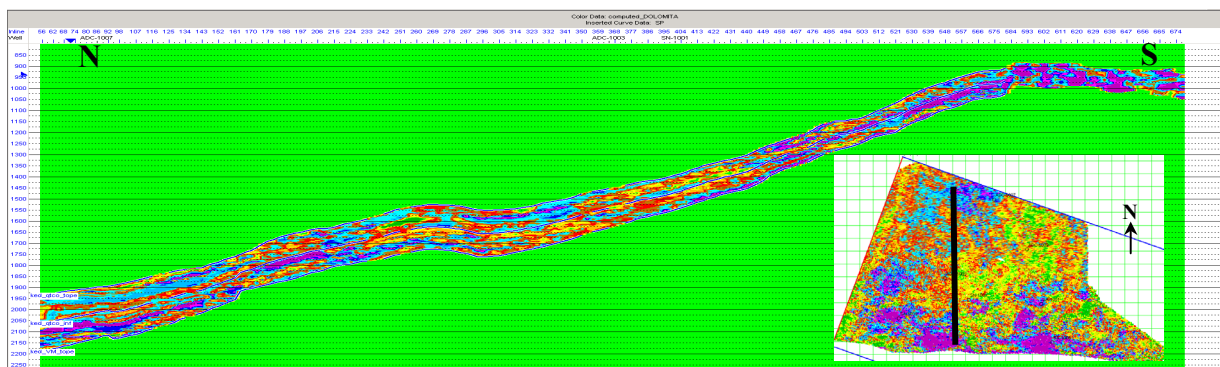


Fig. 9: Corte norte-sur al cubo de porcentaje de Dolomita

En un corte norte-sur (Fig. 12) practicado al cubo de porcentaje de calcita se resalta la disminución de calizas hacia la Dorsal y su preponderancia en la parte central del bloque Agua del Cajón.

CONCLUSIONES

Los modelos No Lineales permitieron realizar una efectiva integración de datos de pozo no convencionales con diversos tipos de atributos sísmicos. Esta integración se materializó en la construcción de cubos de Facies Clásticas y Porcentaje de Minerales Calcáreos a la resolución vertical de la sísmica.

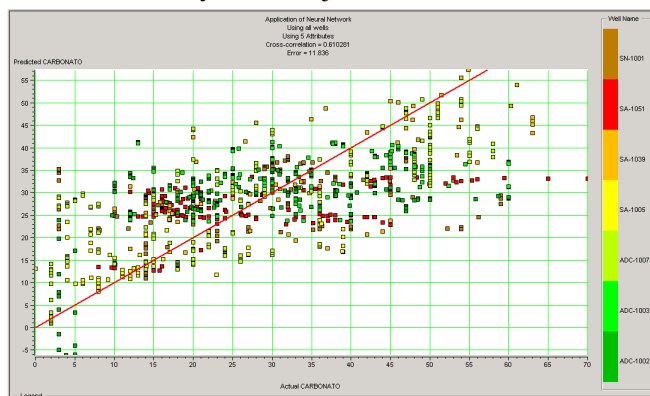


Fig. 10: Porcentaje de Calcita medida vs. estimada

El análisis de Facies Clásticas permite modelar su distribución espacial y confirmar la fuerte influencia de la Dorsal de Huincul sobre la depositación de las unidades subyacentes a la Formación Vaca Muerta.

Para los términos carbonáticos mixtos de la Formación Quintuco, el análisis de los cubos de porcentaje permiten inferir la distribución areal y estratigráfica de las distintas rocas carbonáticas. Nuevamente se destaca la probable influencia de la Dorsal de Huincul en el incremento de los niveles dolomíticos, aunque existen otras regiones al norte del bloque donde las dolomías están acotadas tanto areal como verticalmente, a zonas restringidas.

Por otra parte la metodología descripta plantea la revalorización de la información de cutting que sin duda constituye el muestreo más numeroso realizado durante las etapas de exploración y desarrollo de yacimientos. Dichos datos, debidamente analizados e integrados al resto de la información (perfiles y sísmica) pueden resultar esenciales para el modelado geológico de los reservorios.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la compañía CAPEX S.A. el apoyo brindado para la realización del presente trabajo.

BIBLIOGRAFIA CITADA EN EL TEXTO

- Granitto, P., Verdes, P., Navone H., Ceccatto A., Curia D., Larriestra C., 2001. Modelling of Sonic Logs in Oil Wells with Neural Networks Ensembles, JAIIO 2001, 30° International Conference of the Argentine Computer Science and Operational Research Society, Buenos Aires, Argentina, 2001.
- Masters, T., 1995. Advanced algorithms for neural networks: John Wiley & Sons, Inc
- McCormack, M., 1991. Neural computing in geophysics. The Leading Edge, Vol. 10, Nro.1, 11-15
- Pina, L., Granitto, P., Verdes, P., Navone, H., Ceccatto, H., Curia, D., Larriestra, C. 2001. Modeling of Sonic Logs with Neural Networks Ensembles, AAPG HEDBERG CONFERENCE *New Technologies and New Play Concepts in Latin America*, Nov. 4-9, 2001, Mendoza, Argentina

Reading, H. G., 1986. Facies. en H. G. Reading (eds) Sedimentary Environments and Facies. 2nd. ed. Blackwell, Oxford, :1-14.

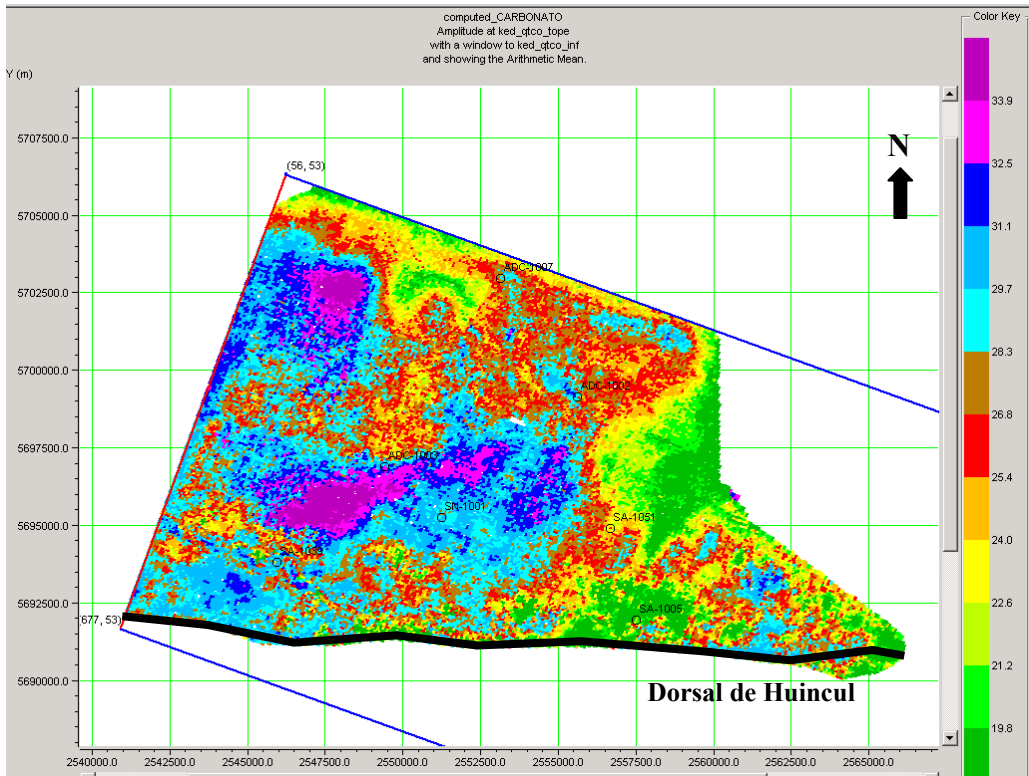


Fig. 11: Mapa de Porcentaje Promedio de Calcita

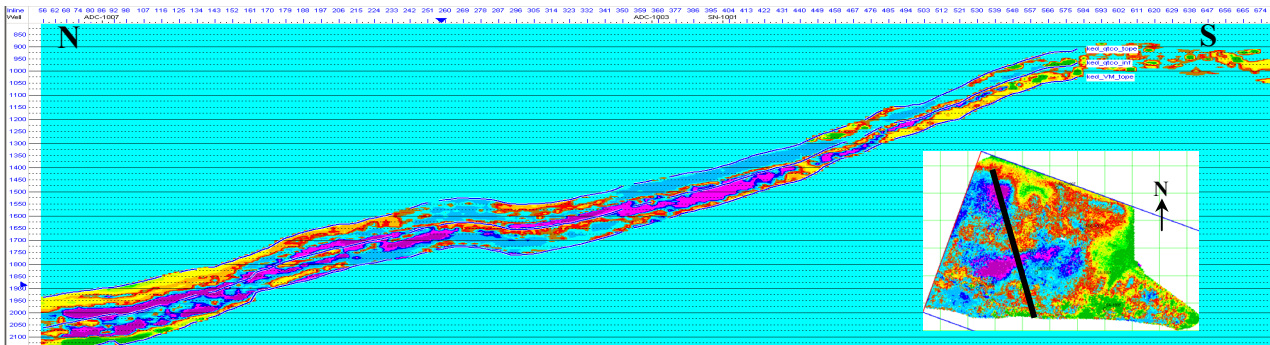


Fig. 12: Corte norte-sur al cubo del Porcentaje de Calcita