

**Interpretación Geológica  
de datos de Geofísica Aérea  
y Landsat TM**

**Area de la Puna  
Argentina**

---

# AREA DE LA PUNA ARGENTINA

INTERPRETACION GEOLOGICA DE DATOS  
DE GEOFISICA AEREA  
Y LANDSAT TM

Preparado para:

SEGEMAR  
SUBSECRETARIA DE MINERIA  
REPUBLICA ARGENTINA

Marzo de 1997

*Por*

*L. R Rankin y D. Triggs  
World Geoscience Corporation*



World Geoscience Corporation Limited  
65 Brockway Road, Floreat. W.A. 6014, Australia

---

# INDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>(i)</b>
<b>1. INTRODUCCION .....</b>	<b>1</b>
<b>2. ADQUISICION Y PROCESAMIENTO DE DATOS AEREOS .....</b>	<b>2</b>
<b>3. PROCESAMIENTO ESPECIALIZADO DE DATOS PARA LA INTERPRETACION.....</b>	<b>4</b>
3.1 REDUCCION AL POLO .....	4
3.2 PRIMERA DERIVADA VERTICAL .....	4
3.3 SECCIONES DE PSEUDOPROFUNDIDAD .....	5
3.4 MODELOS MAGNETICOS .....	5
<b>4. INTERPRETACION DE LANDSAT TM .....</b>	<b>7</b>
4.1 METODOLOGIA .....	7
4.1.1 Procesamiento de datos.....	7
4.1.2 Interpretación .....	8
4.2 RESULTADOS.....	9
4.2.1 Precámbrico - Cámbrico Inferior (P,LC,-p, P,LC,-q) .....	9
4.2.2 Cámbrico Superior - Grupo Mesón (C,-m) .....	9
4.2.3 Ordovícico - Grupo Santa Victoria .....	10
4.2.4 Intrusivos Pérmicos (Pi) .....	11
4.2.5 Sedimentos Pérmicos - Formación Cauchari (Pc) .....	11
4.2.6 Intrusivos Jurásico-Cretácicos (JKg, JKi, JKis) .....	11
4.2.7 Sistema "Rift" Salta (Sedimentos Cretácico-Terciarios (KT) y sedimentos Terciarios no diferenciados (Ts)).....	12
4.2.8 Volcanitas Terciario-Cuartarias (TQv, TQi) .....	14
4.2.9 Sedimentos Cuartarios .....	15
<b>5. MAPA INTERPRETATIVO DE LA GEOLOGIA SOLIDA .....</b>	<b>17</b>
5.1 LIMITACIONES DE LA GEOFISICA AEREA EN APLICACIONES DE MAPEO GEOLOGICO .....	17
5.2 CONCEPTO DEL MAPA INTERPRETATIVO DE LA GEOLOGIA SOLIDA .....	19
5.3 CARACTERIZACION DE LOS DATOS Y DESCRIPCION DEL MAPA INTERPRETATIVO DE LA GEOLOGIA SOLIDA .....	19
5.3.1 Margen del Cratón Pampeano (P,LC,-C,- - Sedimentos-metasedimentos Precámbricos a Cámbricos) .....	19

---

5.3.2	Orógeno Ocloyic (Secuencias sedimentario/intrusivas del Cámbrico Superior - Ordovícico Os) .....	19
5.3.3	Intrusivos Pérmicos (Pi) .....	22
5.3.4	Sedimentos Pérmicos - Formación Cauchari (Pc) .....	23
5.3.5	Sistema "Rift" Salta (Rocas intrusivas Jurásico-Cretácicas y rocas sedimentarias Mesozoicas-Cenozoicas). .....	23
5.3.6	Orogenia Andina (Volcanitas Terciario-Cuartarias (TQv)).....	26
5.3.7	Anomalías geofísicas no diferenciadas .....	27
<b>6.</b>	<b>MODELAMIENTO MAGNETICO .....</b>	<b>29</b>
6.1	INTRODUCCION .....	29
6.2	PARAMETROS REGIONALES .....	29
6.3	SOLUCIONES DE PROFUNDIDAD AL BASAMENTO .....	29
6.4	HIPOTESIS INICIAL .....	30
6.5	RESULTADOS.....	30
6.6	COMENTARIOS SOBRE LINEAS ESPECIFICAS .....	31
6.7	MAPA DE SOLUCIÓN TRIDIMENSIONAL EULER DE PROFUNDIDAD A LA FUENTE .....	33
<b>7.</b>	<b>DESARROLLO ESTRUCTURAL Y TECTONICO .....</b>	<b>35</b>
<b>8.</b>	<b>GEOLOGIA ECONOMICA.....</b>	<b>37</b>
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>39</b>
<b>10.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>40</b>

## LISTA DE FIGURAS Y MAPAS

### **FIGURAS**

- Figura 1: Diagrama de ubicación
- Figura 2: Mapas geológicos existentes (escala 1:200 000)
- Figura 3: modelos de perfiles magnéticos    a) Línea 27080  
   b) Línea 27212  
   c) Línea 27220
- Figura 4: Estructura del basamento de Argentina noroccidental (Mon y Salfity, 1995)
- Figura 5: Regiones estructurales del área de la Puna, basada en interpretación aéreo-magnética (basado en Chernicoff y otros, 1996)

### **MAPAS**

1. Mapa de interpretación geológica basado en imágenes Landsat TM (2 hojas) a escala 1:250,000.
2. Mapa de geología sólida (2 hojas) a escala 1:250.000
3. Mapa de solución tridimensional Euler de profundidad a la fuente (2 hojas) a escala 1:250.000

### **APENDICE**

Notas de terreno con mediciones de susceptibilidad magnética.

## **RESUMEN**

Este informe describe los resultados de una interpretación geológica basada en la integración de datos geofísicos aéreos (magnéticos y radiométricos) recientemente adquiridos, y datos Landsat TM, en la región de la Puna, en el noroeste de Argentina. A la vez se describen los procedimientos adoptados en la interpretación. El principal objetivo de este estudio fue proveer un marco geológico-geofísico para fomentar la evaluación del potencial minero de la región, y a la vez estimular la exploración en Argentina.

La interpretación se recopiló en base a imágenes Landsat (Rojo:Verde:Azul = 7:4:1) a escala 1:250.000, e imágenes magnéticas y radiométricas (datos de líneas espaciadas a 1km), integradas con mapas geológicos a escalas 1:400.000 y 1:200.000 disponibles.

La interpretación se recopiló en mapas de geología superficial (dos hojas) (de datos Landsat) y mapas de "geología sólida" (dos hojas), que detallan la distribución y el marco estructural de las principales unidades litológicas de la región, tanto en afloramiento como subyacentes a sedimentos cuaternarios superficiales. La interpretación se verificó con un trabajo de terreno limitado.

## **1. INTRODUCCION**

SEGEMAR (Servicio Geológico Minero Argentino) ha iniciado un proyecto para adquirir datos geofísicos aéreos a escala regional en áreas claves de Argentina. El proyecto tiene como intención la promoción activa de la exploración minera en Argentina y proveer al Gobierno e industria con datos geofísicos y geológicos de alta calidad para ampliar el conocimiento del potencial geológico y minero de las regiones. Este informe describe los resultados de una interpretación geológica que integra datos geofísicos aéreos, imágenes de datos satelitales e información geológica disponible en el área de investigación en la Puna, ubicada en Argentina noroccidental.

El proyecto de investigación de la Puna consistió en (i) un estudio geofísico aéreo que proporcionó datos magnéticos y radiométricos regionales con espaciamiento entre líneas de 1 km, y (ii) la interpretación de los datos del estudio integrados con mapeo geológico disponible y con la interpretación de datos Landsat TM. Las interpretaciones se realizaron a escala 1:250.000.

El área de estudio de la Puna está ubicada aproximadamente a 1400 km al noroeste de Buenos Aires (ver Figura 1). El área limita al norte con la frontera Argentino-Boliviana, al oeste con la frontera Argentino-Chilena, al este con la Cordillera Oriental y al sur con el paralelo de latitud 24°S. Desde el punto de vista geológico, la Puna es la extensión meridional del Altiplano Boliviano y consiste en una alta meseta, con alturas que varían entre 3,5 km y 4,7 km, sobre la cual se elevan picos volcánicos con alturas hasta de 6,8 km. La meseta de la Puna está ubicada al este de la Zona Volcánica Andina Central principal, un arco volcánico sobre la Placa Nazca, que se inclina moderadamente hacia el Este (Coira y otros, 1993). Extensa actividad volcánica de edad Mio-Pliocénica tuvo lugar a lo largo del margen NO de la meseta de la Puna y en líneas transversales que cruzan la meseta en dirección NO-SE.

Desde el punto de vista fisiográfico, la región consiste en varias cadenas montañosas angostas con direcciones que varían entre N-S y NNE-SSO, separadas por valles aluviales intermontanos alargados. Los valles se caracterizan por la presencia de grandes salinas o lagos de playa evaporítica. Las cadenas montañosas y valles lineares están coronados por altos picos volcánicos, con una altura máxima sobre el nivel del mar de 5705 metros en el Cerro Granada.

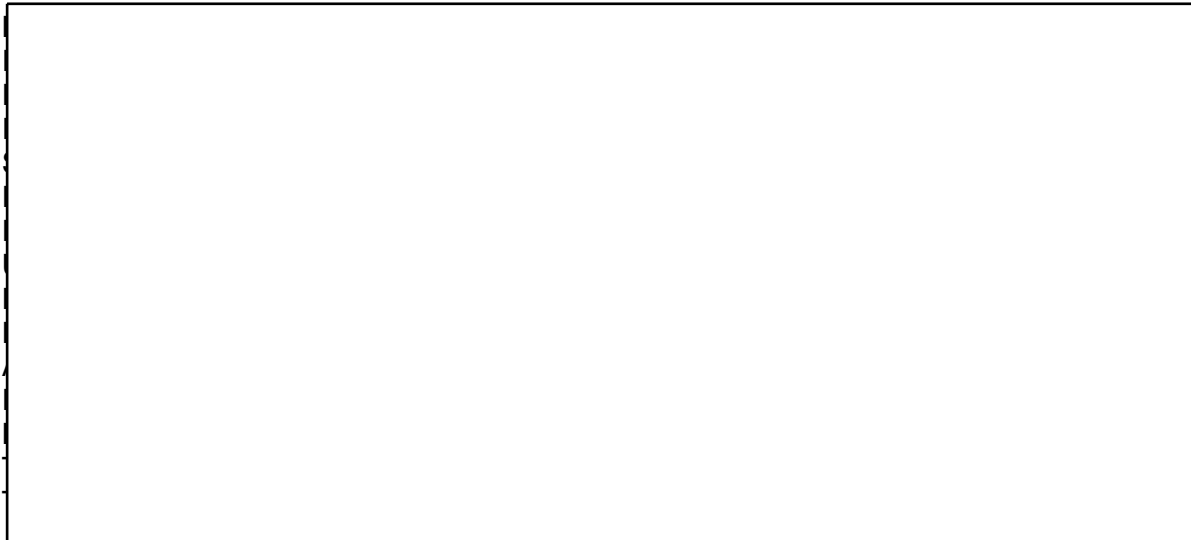
Los datos geológicos disponibles para el área de la Puna, cuando se llevó a cabo el estudio, consistían en las hojas de mapeo geológico 1:200.000 que a continuación se detallan (ver Figura 2): Hoja 1ab-Santa Catalina (Turner, 1965a); Hoja 2a-San Juan de Oro (Turner, 1967); Hoja 2b-La Quiaca (Turner, 1965ba); Hoja 3ab-Mina Pirquitas (Turner, 1982); Hoja 3c-Abra Pampa (Coira, 1979); Hoja 5a-Paso Huaitiquina (Schwab, 1980b) y Hoja 5b-Salar de Cauchari (Schwab, 1980a). También se hace referencia al mapeo del área Santa Ana - Cobres 1:50.000 de Zappettini (1989) y al Mapa Geológico regional a escala 1:400.000 de la Región Noroeste preparado por la Dirección General de Fabricaciones Militares. Posterior a la interpretación preliminar de los datos de la Puna se publicó un mapa de recopación geológica 1:500.000 de la Provincia de Jujuy (SEGEMAR, 1996).

## 2. ADQUISICION Y PROCESAMIENTO DE DATOS AEREOS

El relevamiento geofísico aéreo de la Puna, llevado a cabo por World Geoscience Corporation Ltd durante el período comprendido entre Diciembre de 1995 y Mayo de 1996, generó aproximadamente 40.000 kilómetros lineales de datos. La Tabla 1 resume las especificaciones del estudio, que fué planificado para que la dirección de las líneas de vuelo fuera aproximadamente paralela a la dirección topográfica de N-S a NNE-SSO, para lograr la mejor cobertura aérea posible en condiciones difíciles y de gran altura. La altura promedio sobre el terreno fue de 140 m. Se consideró que vuelos a menor altura sobre el terreno eran peligrosos debido al terreno escabroso y de gran altura.

El procesamiento de los datos magnéticos incluyó correcciones para factores diurnos, Campo de Referencia Geofísico Internacional (International Geophysical Reference Field (IGRF)), y de paralaje, y operaciones de nivelamiento de líneas y micronivelamiento. El procesamiento de los datos radiométricos se completó de acuerdo a las normas del informe de la Agencia Internacional de Energía Atómica (International Atomic Energy Agency (IAEA)) no. 323. Esto incluyó la eliminación de la radiación producida por el avión, la radiación cósmica, y la radiación de fondo de radón, y la aplicación de procesos de quite de energía, y la corrección de altura. El procesamiento da como resultado datos bien nivelados que el contratista usa en su programa de computación para producir una variedad de imágenes, curvas de intensidad y perfiles acumulativos, que se resumen en la Tabla 2. Los datos magnéticos fueron sometidos a procesos más avanzados que incluyeron Reducción al Polo (RAP) y Primera Derivada Vertical (1DV).

**TABLA 1:**  
**Especificaciones del Relevamiento Geofísico**

A large empty rectangular box with a black border, intended for the content of Table 1. The box is currently blank.



**TABLA 2:**  
**Lista de Imágenes derivadas de Datos Geofísicos**

Tipo de Mapa/Imagen	1:100.000	1:250.000
<b>Plan de vuelo</b> (Negro en película transparente estable)	32	2
<b>Curvas Blanco/Negro</b> (Negro en película transparente estable)		
Intensidad Magnética Total	32	2
Reducido al Polo Magnético	32	2
Secciones de Pseudoprofundidad 1 (Frecuencia Alta)	32	2
Secciones de Pseudoprofundidad 2 (Frecuencia Media)	32	2
Secciones de Pseudoprofundidad 3 (Frecuencia Baja)	32	2
Recuento Total	32	2
Potasio	32	2
Uranio	32	2
Torio	32	2
<b>Curvas a Color</b> (color en papel y laminado)		
Intensidad Magnética Total	32	2
Reducido al Polo Magnético	32	2
Secciones de Pseudoprofundidad 1 (Frecuencia Alta)	32	2
Secciones de Pseudoprofundidad 2 (Frecuencia Media)	32	2
Secciones de Pseudoprofundidad 3 (Frecuencia Baja)	32	2
Recuento Total	32	2
Potasio	32	2
Uranio	32	2
Torio	32	2
<b>Perfiles Acumulativos</b> (negro película transparente estable)		
Intensidad Magnética Total	32	2
Recuento Total	32	2
Potasio	32	2
Uranio	32	2
Torio	32	2
<b>Transparencias procesadas de Imágenes</b>		
Imagen Magnética Reducida al Polo - Color		4
Reducción al Polo, Primera Derivada Vertical - Blanco y negro		4
Reducción al Polo con Primera Derivada Vertical RAP - Color		4
Secciones de Pseudoprofundidad 1 (Frecuencia Alta) - Blanco y negro		4
Secciones de Pseudoprofundidad 2 (Frecuencia Media) - Blanco y negro		4
Secciones de Pseudoprofundidad 3 (Frecuencia Baja) - Blanco y negro		4
Potasio - Color		4
Uranio - Color		4
Torio - Color		4
Ternario - Color Rojo, Verde, Azul		4
<b>Negativos procesados de Imágenes</b>		
Imagen Magnética Reducida al Polo - Color		4
Reducción al Polo, Primera Derivada Vertical - Blanco y negro		4
Reducción al Polo con RAP Primera Derivada Vertical - Color		4
Secciones de Pseudoprofundidad 1 (Frecuencia Alta) - Blanco y negro		4
Secciones de Pseudoprofundidad 2 (Frecuencia Media) - Blanco y negro		4
Secciones de Pseudoprofundidad 3 (Frecuencia Baja) - Blanco y negro		4
Potasio - Color		4
Uranio - Color		4
Torio - Color		4
Ternario - Color Rojo, Verde, Azul		4

### **3. PROCESAMIENTO ESPECIALIZADO DE DATOS PARA LA INTERPRETACION**

Además de las imágenes y mapas estándar que se documentan en la Tabla 2, los datos de la Puna fueron tratados con técnicas especializadas de procesamiento. Las técnicas incluyen la Reducción al Polo y la Primera Derivada Vertical. Estas técnicas intensifican varios aspectos de los datos geofísicos, lo que permite una interpretación más precisa de tales datos.

#### **3.1 REDUCCION AL POLO**

La técnica de Reducción al Polo (RAP) se aplicó a los datos grillados de Intensidad Magnética Total, para lo cual se utilizó el programa de computación del contratista. RAP es un proceso numérico bien establecido (Milligan y Gunn, 1997), que transforma la inclinación del vector de magnetización aparente de un campo a aquella del polo (por ejemplo  $I=90^\circ$ ). De esta manera, el procedimiento transforma las anomalías magnéticas dipolares en anomalías monopolares que se centran sobre los cuerpos que las originan. A pesar de que la presencia de un vector de magnetización residual puede invalidar matemáticamente la transformación del valor máximo de la anomalía, la presencia de magnetización residual no causó problemas en la interpretación de los datos, o en la reducción al polo de la grilla de intensidad magnética total.

La ventaja de la RAP es que por lo general la respuesta máxima se localiza sobre el “centro” del cuerpo magnético que la produce, y que el gradiente máximo ocurre cerca de los “bordes” del cuerpo. De esta manera la representación total de los datos, ya sea en forma de imágenes o curvas, es más clara y permite una mejor correlación entre la posición de un cuerpo rocoso y su “firma” magnética. La RAP es más efectiva en latitudes magnéticas de menos de  $30^\circ$ .

Los datos RAP son muy útiles y necesarios para el trabajo de terreno. La localización de unidades específicas con respecto a las respuestas magnéticas es mucho más precisa si los datos se reducen al polo y el valor máximo de la anomalía se localiza sobre el centro del cuerpo.

#### **3.2 PRIMERA DERIVADA VERTICAL**

La Primera Derivada Vertical (1DV) se aplicó a los datos grillados de la RAP de la Intensidad Magnética Total. Para esto se utilizó el programa de computación del contratista. La 1DV de un campo magnético es una aproximación a un punto en donde el campo cambia en la dirección vertical. La función se calcula en el ámbito Fourier o en el ámbito espacial (Milligan & Gunn, 1997). El ámbito espacial adopta un operador de convolución. El tamaño del “kernel” o ventana que usa el operador de convolución, afecta la longitud de onda del resultado de la 1DV. Un “kernel” de tamaño pequeño acentúa las anomalías de longitud de onda corta más que un “kernel” más grande. El cálculo de la 1DV en el ámbito Fourier utiliza la totalidad de la grilla, y teóricamente es una aproximación más correcta de la derivada vertical. Este método elimina los efectos de la longitud de onda de la anomalía y mantiene el componente de alta frecuencia.

La 1DV para el área de la Puna se aplicó en el ámbito Fourier. Con estos datos se generaron imágenes de la 1DV en blanco y negro, y de la 1DV con un sobrepuesto de la IMT a color, utilizadas en la interpretación geológica.

La imagen en blanco y negro de la 1DV tiene la ventaja de realzar los distintos patrones magnéticos y caracteres de las unidades de rocas, y las estructuras que afectan las diferentes unidades. La 1DV es una técnica de mucho valor y es la base para el marco estructural y para diferenciación litológica regional que se recopilan en la interpretación.

### 3.3 SECCIONES DE PSEUDOPROFUNDIDAD

La técnica de Secciones de Pseudoprofundidad intenta extraer la respuesta magnética de diferentes niveles estructurales en secciones sedimentarias y de basamento. La distribución del material magnético en la sección controla las rebanadas de profundidad falsas efectivas que se pueden extraer. Las rebanadas de profundidad falsa no pueden interpretarse como secciones de profundidad, debido a la geometría no uniforme de un cuerpo magnético y la ambigüedad intrínseca en técnicas de potencial de campo.

La técnica intenta separar grupos de respuestas magnéticas de frecuencias diferentes, creando imágenes de cada grupo en forma de "Secciones de Pseudoprofundidad". Por convención la imagen de la frecuencia más alta (la fuente menos profunda) se denomina Secciones de Pseudoprofundidad 1.

La técnica no se utiliza en estudios magnéticos de profundidad exacta. El método es efectivo porque examina como la orientación de la litología y la estructura varían como funciones de la profundidad. Dentro de una sección sedimentaria se puede identificar en forma típica dos o tres rebanadas, en las cuales la más profunda está asociada con el "basamento" magnético.

Para los datos de la Puna se procesaron tres rebanadas en profundidad. Debido a la naturaleza regional de los datos y la respuesta magnética baja de la mayoría de las unidades y estructuras, las rebanadas no fueron útiles en la interpretación geológica a escala 1:250.000 de la región.

### 3.4 MODELOS MAGNETICOS

Se crearon modelos de los datos magnéticos a través del uso del programa de computación Encom ModelVision™ versión 1.30™. El programa ModelVision™ permite tomar datos magnéticos lineales, que se extraen ya sea de una grilla, ó de las líneas de vuelo, y ponerlos en un modelo particular. El programa ModelVision™ crea polígonos, cilindros horizontales, elipsoides, esferas, cuerpos tabulares y prismas hundidos, y da al operador la flexibilidad de cambiar el tamaño, la orientación, la profundidad y la susceptibilidad magnética. La respuesta magnética modelada se calcula para el modelo elegido tomando en consideración la posición geográfica global del modelo, y por consecuencia el campo magnético de la Tierra en donde se obtuvieron los datos. El programa requiere un número de parámetros para calcular los modelos. Para el área de la Puna se utilizó una intensidad de campo magnético de 23.741 nanoTesla, una inclinación de  $-17^{\circ}$  y una variación de  $-4^{\circ}$ .

Para calcular las soluciones de profundidad a la fuente, el contratista usó un algoritmo Werner modificado. Las soluciones de profundidad Werner se utilizan como puntos de referencia de profundidad absoluta en donde ocurren a lo largo de las líneas seleccionadas. Esto demuestra el uso y la aplicabilidad de las soluciones de profundidad para proveer un punto de referencia para los modelos magnéticos. Las soluciones Werner se dividen en soluciones de tipo dique y de contacto, que reflejan la estructura de la geología. Cambios en la derivada vertical generan las soluciones dique. Las soluciones de contacto se calculan a través de variaciones en la derivada horizontal de los datos de campo magnético total.

Las soluciones de profundidad se clasifican de acuerdo a las posiciones laterales en relación a los afloramientos sedimentarios y volcánicos conocidos, o a soluciones de mayor profundidad. Los resultados se trazaron a escala 1:250.000. Estas profundidades se utilizaron como una guía para el ápice del bloque durante el proceso de modelamiento.

## 4. INTERPRETACION DE LANDSAT TM

La integración de datos de sensores remotos a la interpretación de la geofísica aérea es muy valiosa, si se considera que detalles de las estructuras y subdivisiones litológicas mapeables no siempre son obvias o no pueden ser determinadas en los datos geofísicos, debido al amplio espacio entre líneas y a la baja resolución de las líneas

Para el área de la Puna en particular, se recopiló una interpretación de Landsat TM 1:250.000 como un primer paso para la interpretación geofísica, debido a la naturaleza amplia y regional del relevamiento (espaciamiento entre líneas de 1 km), y al hecho del paralelismo de las líneas de vuelo con una gran proporción de las estructuras regionales del área, lo que dificulta la resolución geológica de estas estructuras.

### 4.1 METODOLOGIA

#### 4.1.1 Procesamiento de datos

Las escenas Landsat TM para el área de la Puna se obtuvieron después de una investigación inicial para seleccionar las mejores imágenes para construir un mosaico. Las siguientes escenas fueron proporcionadas por EOSAT en Washington:

<b>Escena</b>	<b>Fecha de captura</b>
231/75	11/9/86
232/75	25/7/86
231/76	10/3/86
232/76	25/7/86
232/77	1/10/86

Las imágenes se rectificaron geográficamente con puntos de control de terreno seleccionados de mapas topográficos 1:250.000 de la República Argentina. Las imágenes fueron transformadas a la proyección compatible Gauss Krugger, con el datum Campo-Inchauspe : meridiano central 66°O. Se utilizó un modelo de ajuste cuadrático (segundo orden), con un proceso de muestreo de dato adyacente.

Después de la rectificación, las escenas individuales se integraron en mosaicos similares a la serie de hojas mapas 1:250.00 de la República Argentina. Antes de la preparación de los mosaicos, se igualaron los histogramas de las imágenes para permitir la producción de imágenes continuas. La técnica de igualación consiste en el análisis de áreas comunes de las escenas a integrarse en mosaicos. Se extrae la mediana y la desviación normal de cada área en común. La escena a igualar se transforma por medio de una fórmula basada en las 3 bandas TM seleccionadas.

Después de la preparación del mosaico, se extrajo cada una de las hojas pertinentes 1:250.000. Para aumentar al máximo la información de los mapas, cada escena individual se intensificó linealmente y se expandió el histograma. Debido a esto, hay ciertas diferencias en color entre las escenas.

Para obtener la mejor resolución posible las escenas se transfirieron a película fotográfica.

Para la interpretación de imágenes se utilizaron las bandas TM 7:4:1 en modalidad Rojo, Verde, Azul (R:V:A). Esta combinación de bandas provee, en forma típica, una excelente resolución estructural/espacial junto a información espectral de tipo geológica.

#### 4.1.2 Interpretación

El método de interpretación se diseñó para facilitar la visualización de la estructura regional a través de anotación meticulosa de todos los elementos estructurales visibles en las imágenes. Este método ha sido usado en otros terrenos complejos (Nash y otros, 1996). En orden de importancia, se puso atención a la anotación de foliación y/o trazas de estratificación (que se expresan a través de la erosión diferencial de rocas foliadas/estratificadas), fracturas y/o trazas de fallas (valles y quebradas lineales que han sido erosionadas en forma selectiva), indicaciones litológicas (que generalmente se manifiestan en cambios en vegetación (raros en la Puna), textura, color, cubierta de suelos, etc), bordes de afloramientos, elementos principales de drenaje, aluvio, y la distribución del regolito y coluvio.

Para obtener el máximo de información de todas las imágenes, se adoptó el siguiente procedimiento:

- 1) Se anotaron las direcciones preferenciales de estratificación y foliación, y con especial detalle las curvaturas y dislocaciones de las direcciones.
- 2) Se marcaron las trazas de fracturas y fallas (éstas se distinguen por lo general debido a dislocaciones o cambios abruptos en la actitud de estratos o trazas de foliación)
- 3) Se interpretaron contactos litológicos en áreas de afloramiento, en base a características texturales y geomorfológicas, y de color.
- 4) Se interpretaron trazas de ejes de plegamiento en base a direcciones preferenciales de estratificación y foliación.
- 5) Se trazaron los contactos de afloramientos y sedimentos cuaternarios.

A continuación los mapas fueron corregidos, coloreados, anotados y digitalizados. Se obtuvieron capas separadas de datos vectoriales para permitir el trazado o la manipulación de los diferentes aspectos de los datos,. Se utilizó el programa de computación Microstation<sup>TM</sup> para el trazado de los mapas finales, los que se dibujaron como trazados electroestáticos de todas las coberturas digitales. Los archivos Microstation<sup>TM</sup> .dgn se pueden incorporar fácilmente a los sistemas de mapeo SIG (Arcview<sup>TM</sup>, Mapinfo<sup>TM</sup>).

## 4.2 RESULTADOS

La interpretación de los datos Landsat TM se recopiló a escala 1:250.000 y se presenta en dos hojas. Para proveer un control litológico, se integró el marco litológico/estructural al mapeo geológico disponible (a escalas 1:400.000 y 1:200.000)

El área consiste de varios terrenos geológicos diferentes, cada uno con expresiones geológicas y geomorfológicas notables. Considerando la escala de la interpretación la región se puede subdividir en:

### 4.2.1 Precámbrico-Cámbrico Inferior (P,LC,-p, P,LC,-q)

El sector sureste del área consiste en colinas con dirección N-S a NNE-SSO compuestas de rocas sedimentarias marinas de edad precámbrica a cámbrico inferior (Formación Puncoviscana). En las imágenes, los afloramientos son típicamente grises, gris-café o de color oxidado. La dirección N-S está en general disectada por un drenaje perpendicular a la dirección de la estratificación. La estratificación varía de rudimentaria a bien estratificada.

Un afloramiento de granito/ granito gneis precámbrico (Formación Quesera - P,LC,-p) ocurre en las rocas Precámbricas. El afloramiento es masivo a débilmente fracturado y tiene la forma de una "lágrima".

P,LC,-p consiste en secuencias marinas sedimentarias (areniscas, pizarras, filitas, conglomerados), típicamente con metamorfismo de grado bajo (facies de esquistos verdes). El plegamiento de P,LC,-p en la dirección N-S a NNE-SSO es evidente.

Las unidades Precámbricas-Cámbricas están restringidas al SE del área. Hacia el Oeste, cerca del Cerro Potrerillo, P,LC,-p tiene un contacto de falla con las secuencias Ordovícicas de la "Faja Eruptiva de la Puna Oriental" (abreviada **FEO**).

### 4.2.2 Cámbrico Superior - Grupo Mesón (C,-m)

En el SE de la región de la Puna (que bordea la Cordillera Oriental) las rocas Precámbricas están intercaladas con secuencias sedimentarias del Grupo Mesón (C,-m) del Cámbrico Superior. Estas rocas varían típicamente de escasa a bien estratificadas, con afloramientos que contienen cordones bajos, formados por horizontes menores resistentes a la erosión. En las imágenes Landsat TM el color de las rocas varía de gris a gris-café.

Los contactos se han derivado en forma predominante de los mapas litológicos existentes, ya que es difícil distinguir entre las secuencias C,-m y P,LC,-p en las imágenes Landsat TM.

### 4.2.3 Ordovícico - Grupo Santa Victoria (Os)

Una de las principales características geomorfológicas de la región es la presencia de varias cadenas montañosas lineales con dirección N-S al NNE-SSO, separadas por valles intermontanos superimpuestos por formas fisiográficas volcánicas terciarias. Las cadenas montañosas se componen principalmente de rocas sedimentarias Ordovícicas interestratificadas del Grupo Santa Victoria. Estas rocas consisten en sedimentos marinos interestratificados - arenisca, cuarcita, pizarra, limonita y unidades calcáreas menores.

En las imágenes TM, las rocas se observan bien estratificadas con buzamientos de moderado a empinado. Los horizontes individuales resistentes a la erosión forman cordones angostos. En el noroeste y oeste, la estratificación no se distingue bien, y esto refleja posiblemente un alto porcentaje de bandas de pizarras blandas dentro de los estratos. El color de los afloramientos varía de gris-café a rojo-café y naranja. La estratificación revela un alto grado de deformación, con abundante plegamiento apretado (¿a localmente de tipo isoclinal?), y con fallamiento paralelo a la estratificación, que refleja un episodio principal de deformación compresiva (faja de plegamiento /cizalla). En forma local, estas cizallas contienen sistemas de venas de cuarzo a gran escala, que pueden ser cuidadosamente discriminados en las imágenes.

Las investigaciones previas (Bahlburg, 1990) indican que **Os** varía de los sedimentos marinos de plataforma en la base de la secuencia hacia el Este donde se depositó traslapando el margen occidental del Cratón Pampeano. Hacia el oeste y en la parte superior de la secuencia, los sedimentos varían a turbiditas de cono submarino de aguas profundas, provenientes de los Cratones Pampeano (Este) y Arequipa (Oeste). En los datos TM estos cambios de facies no se reflejan en la expresión geomorfológica regional de las unidades.

Sin embargo, un subdominio tectono/estratigráfico principal se puede mapear en las imágenes: rocas sedimentarias Ordovícicas con intercalaciones volcánicas e intruidas por numerosos granitoides de grano grueso, sintectónicos a postectónicos (**Osg**), se extienden N-S a través del área, desde la Sierra de Cochinoca en el norte a la Sierra del Cobre en el sur. Este subdominio se conoce como la "Faja Eruptiva de la Puna Oriental" (**FEO**). Al norte de los centros volcánicos en Coranzuli, la **FEO** se desvía de la dirección N-S hacia la dirección SO y se bifurca en dos cordones montañosos. Al sur de las volcanitas Terciarias (cerca de Susques), la **FEO** consiste en dos cordones montañosos paralelos con un espaciamiento de 10 km.

Dentro de la **FEO**, los granitos porfíricos sintectónicos a postectónicos se presentan en forma típica como afloramientos serranos, escabrosos, de masivos a bien bandeados (foliados), típicamente de color naranja a rojo café oxidado. Observaciones de terreno indican que el granito intruye los sedimentos Ordovícicos en forma de capas concordantes a la foliación  $S_1$ , que es casi paralela a la estratificación. Los sedimentos de los alrededores están típicamente afectados por una aureola metamórfica. La composición del granito sugiere como fuente la fundición parcial de la pila sedimentaria.



Los sedimentos Ordovícicos de la **FEO** también contienen cantidades menores de volcanitas ácidas sinsedimentarias y volcanitas máficas (¿espilíticas?). No está claro si las volcanitas máficas representan material oceánico relacionado a una temprana extensión, o si son parte de una serie bimodal de volcanismo de arco de colisión. Los horizontes volcánicos son generalmente delgados y con la excepción del oeste de la Sierra del Cobre (Huancar), no se diferencian a escala regional (la discriminación en las imágenes a escala 1:250.000 es escasa o no existente). La naturaleza de la **FEO** ha sido objeto de constante debate en la literatura (ver Coira y otros, 1982, Bahlburg, 1990): el autor está de acuerdo con la interpretación de que la faja es un arco volcánico del Ordovícico Superior.

#### 4.2.4 Intrusivos Pérmicos (Pi)

Se han mapeado como intrusivos Pérmicos dos afloramientos de granitoides en los límites noroeste y suroeste del principal batolito granitoide (**JKg** ; ver 4.2.6), al oeste de la Laguna de Guayatayoc (SEGEMAR, 1996). Estos afloramientos son dioríticos a monzoníticos, y en las imágenes Landsat TM se observan un poco más oscuros que los granitoides **JKg** más jóvenes que los rodean.

Es posible que ocurran en la región otros afloramientos, no reconocidos, de intrusivos del Paleozoico tardío.

#### 4.2.5 Sedimentos Pérmicos - Formación Cauchari (Pc)

En el sur de la región de la Puna y al este del Salar de Cauchari una secuencia delgada de sedimentos clásticos rojizos ó un amarillo naranja (Formación Cauchari) está cubierta y/o tiene un contacto de falla, hacia el Este, con los sedimentos del Grupo Salta del Cretáceo. Los sedimentos de la Formación Cauchari están moderadamente bien estratificados, con cordones bajos formados por capas resistentes a la erosión.

#### 4.2.6 Intrusivos Jurásico-Cretácicos (JKg, JKi, JKis)

Al norte de Salinas Grandes, una serie de granitoides Jurásico-Cretácico e intrusivos alcalinos se emplazan en el basamento Precámbrico-Paleozoico. Los intrusivos alcalinos están probablemente relacionados con el rifting Cretácico inicial del Sistema Rift Salta, en tanto que los intrusivos calcalinos se interpretan como relacionados a la subducción de la Placa Pacífico. La restricción de los intrusivos a la mitad oriental del área de estudio, sugiere que el margen del Cratón Pampeano Precámbrico es una estructura de control en el desarrollo del rift.

- JKg.** Un afloramiento de granito a granodiorita con un área de 20km por 15km ocurre inmediatamente al oeste de la Laguna de Guayatapoc. En afloramiento el granitoide es de grano grueso y de color rojo-rosado a gris claro. En las imágenes Landsat TM, el granito se diferencia como un afloramiento escabroso, de masivo a fracturado, de color crema pálido a café oscuro. A lo largo del margen occidental el granito intruye intrusivos intermedios del Paleozoico superior. A lo largo del margen oriental hay significativos afloramientos bajos de greisen, ricos en turmalina-cuarzo-feldespatos, comunmente asociados con mineralización de Wolframio. En la imagen a escala regional los afloramientos de greisen no se diferencian de los de granito.
- JKi.** En la región de la Sierra Aguilar, los granitoides de grano medio a grueso intruyen los sedimento Ordovícicos. En las imágenes Landsat TM los granitoides se diferencian típicamente como colinas accidentadas con afloramientos masivos, fracturados con colores que varían de gris a crema-café. A lo largo del contacto intrusivo con **Os**, se encuentra una zona de contacto de color café oscuro.
- JKis.** En la región del Cerro Rangel se observa una lámina lacolítica de 2 km de ancho de granito riebeckítico en forma concordante en los sedimentos **Os**. En el margen oriental de la Sierra del Cobre, el intrusivo aparece como una serie de colinas accidentadas y bajas con dirección NNE-SSO. En las imágenes TM la sienita se observa bien estratificada y de color rojo-café oxidado.

Los diques de carbonatitas con espesores de 5 a 10 m y con direcciones NE-SO y NNO-SSE, ocurren a través del margen oriental de la Sierra del Cobre (Zappettini, 1989). Sin embargo los diques no se distinguen en las imágenes TM a escala regional. Se interpreta que las carbonatitas están asociadas con intrusivos Cretácicos relacionados con el rift.

#### **4.2.7 Sistema “Rift” Salta (Sedimentos Cretácico-Terciario (KT) y sedimentos Terciarios no diferenciados)**

En toda la región, rocas sedimentarias Ordovícicas están intercaladas tectónicamente (plegadas y cizalladas) con sedimentos que varían de continentales a marinos que fueron depositados en cuencas “rift”, que se originaron en el Cretáceo (con inversión compresional en el Terciario). Las secuencias sedimentarias se dividen en el Grupo Salta de edad Cretácico - Terciaria (**KTs**) y sedimentos Terciarios no diferenciados más jóvenes (**Ts**).

#### **Grupo Salta KTs**

El Grupo Salta representa una secuencia de sedimentos que varían de continentales a marinos depositados en fosas tectónicas rift con dirección N-S, que ocurrieron hacia el Este a largo de la Cordillera Central, y a lo largo de la región de la Puna. En la región de la Puna los sedimentos incluyen areniscas-pizarras y calizas marinas, además de capas características de arenisca-pizarra-limonita de origen continental.

En la imágenes Landsat las rocas sedimentarias se distinguen como capas bien estratificadas de color gris claro a oscuro, con manteos empinados. El plegamiento apretado es común. Los sedimentos están típicamente cizallados y plegados en forma apretada con **Os** (y P,LC,-C al sur). En el área de estudio de la Puna el Grupo Salta incluye las siguientes unidades mapeadas previamente:

Subgrupo Pirgua  
Subgrupo Balbuena  
F. Lecho  
F. Yacoraite  
Subgrupo Santa Barbara

### **Sedimentos Terciarios no diferenciados (Ts)**

Posterior a la sedimentación del Grupo Salta que se relaciona con el rift, las cuencas de deposición se invirtieron durante la compresión Orogénica Andina y se asocian con la deposición de una serie de sedimentos que varían de marinos a continentales, junto a sedimentos intercalados volcánicos y volcánoclasticos contemporáneos. Las secuencias fueron depositadas discordantemente sobre secuencias Paleozoicas y Cretácico-Terciarias.

En las imágenes Landsat, los sedimentos Terciarios se observan como capas bien estratificadas que varían desde color naranja a café rojo. Los estratos son blandos y generalmente forman colinas redondeadas, bajas, con algunos cordones menores formados por capas con pendientes fuertes y resistentes a la erosión. Los sedimentos forman planos con una trama de drenaje dendrítico en áreas de buzamiento suave. Los contactos con el basamento Paleozoico varían desde fallas normales (reactivadas durante el ¿Cuartario?) a fallas de cizalla con inclinaciones que varían de abrupto a moderado.

Los centros de deposición de los sedimentos parecen estar controlados por estructuras obvias de pilar-fosas tectónicas, de dirección N-S a NNE-SSO (invertida), que se iniciaron en el Cretáceo, y también por corredores estructurales oblicuos NO-SE, que parecen haber actuado como fallas de transferencia durante y después de la sedimentación.

Los sedimentos Terciarios en la región de la Puna incluyen las siguientes unidades previamente mapeadas:

- Grupo Pastos Grandes
- Formación Pastos Chicos
- F. Cerro Morado
- F. Peñas Coloradas
- F. Trinchera
- F. Log Log

#### 4.2.8 Volcanitas Terciarias -Cuartarias (TQv)

El comienzo de la Orogenia Andina compresional E-O, fue acompañada por la inversión y sedimentación de la cuenca Terciaria, y volcanismo que se extendió desde la sedimentación Terciaria a la Reciente.

Esta prolongada historia de volcanismo ha sido la causa de las características geomorfológicas más espectaculares en la región de la Puna.

Las volcanitas típicamente varían entre andesitas a dacita-riodacitas y riolitas menores Terciarias con flujos Cuartarios de basalto café-negro no evidente en el terreno (por ejemplo, en Tuzgle). Las volcanitas varían en apariencia, a saber:

**TQv1:** Las facies volcano-Caldera - brechas, piroclásticos y flujos laminares, y comúnmente con domos resurgentes de dacita. Las principales estructuras de caldera se manifiestan como estructuras grandes (de más de 50 km de ancho) circulares y compuestas, que consisten en bordes de caldera, acantilados, depresiones (que ocasionalmente son actualmente lacustres), y domos masivos redondeados y colinas que representan domos dacíticos resurgentes.

Importantes estructuras circulares de colapso de caldera están en el Cerro Vicuñaahuasi, Nevado San Pedro - Pairique (noroeste), y en los Cerros Coranzuli, Granada y Morado (región nor-central). Los Cerros Granada (al norte) y Tuzgle (al sur) representan conos estratovolcánicos comúnmente asociados con las calderas. Las rocas sedimentarias Ordovícico-Terciarias forman por lo general los bordes periclinados y volcados de las calderas y los domos dacíticos.

Los domos dacíticos (por ejemplo, el Pan de Azúcar, Cerro León y Cerro Redondo (región de la Laguna de Pozuelos), Huaira-Huasi - Cerro Turi Lari Grande (región del Salar de Olaroz)) se observan típicamente como colinas domicas circulares a elípticas (de color gris pálido a rosado-naranja o café-rojo) y por lo general están fuertemente fracturadas. Colinas accidentadas y redondeadas están formadas por brechas, piroclásticos localizados y flujos de lava, con colores que varían desde el gris pálido - oliva, naranja, café-rojo al café oscuro.

La gran variedad de colores representa no solo una variación composicional primaria, sino también una variación en las condiciones de oxidación durante y después del emplazamiento de los domos.

**TQv2:** Facies distales - en la región de la Laguna Pozuelos las volcanitas tufaceas bandeadas se intercalan con sedimentos y flujos volcanoclásticos de tipo lahar. Chernicoff y otros (1996), han interpretado que estas unidades representan parte de una secuencia volcánica asociada con una caldera oculta debajo de la Laguna de Pozuelos. En terreno, estas volcanitas y sedimentos volcanoclásticos se presentan en los sedimentos como capas de color gris pálido a blanco. En las imágenes TM las unidades se observan como capas de color gris-naranja, bien estratificadas y con inclinación de leve a moderada.

**TQi:** Ignimbrita. Ellas se observan en un área extensa de los sectores norte y central de la región. La ignimbrita consiste en extensas láminas estratificadas de piroclásticos que varían de dacíticos a riodacíticos de grano medio a grueso. Las láminas tiene espesores de hasta 100m, e incluyen capas gruesas (> 10m). Las láminas cubren discordantemente las secuencias del Terciario al Precámbrico. En las imágenes Landsat TM, la ignimbrita se distingue típicamente como mesetas de albedo alto, rosado, blanco y naranja (a veces verde oliva), y también como láminas delgadas y colinas extensamente erosionadas. Conos de transición y erosión de tipo región yerma son comunes. Los afloramientos principales de ignimbrita están afectados comúnmente por un bandeamiento o fracturas E-O a NO-SE. En la región del Cerro Coranzuli, las numerosas depresiones circulares compuestas y fracturas indican posiblemente la presencia de chimeneas volcánicas ocultas.

Los contactos entre la ignimbrita y los piroclásticos brechosos/proximales asociados con grandes calderas volcánicas en general no se distinguen. Esto posiblemente se deba al traslape lateral de las unidades y a la erosión de las ignimbritas.

#### 4.2.9 Sedimentos Cuaternarios

Los valles intermontanos N-S que separan las rocas desde Precámbricas a Terciarias de la región contienen sedimentos aluviales, fluviales y lacustrinos cuaternarios.

**Qa:** Sedimentos aluviales. Los afloramientos Terciarios-Precámbricos están bordeados por conos aluviales mezclados (incluyendo conos de talud proximales), que se funden en una peneplanicie aluvial, y por sedimentos coluviales (y suelos). En las imágenes Landsat TM, los sedimentos aluviales se observan en los valles intermontanos como láminas de color gris pálido a café pálido, horizontales o con inclinación leve. El color de los sedimentos varía localmente en forma significativa, dependiendo del origen de los materiales. El drenaje de los conos aluviales es típicamente excavado, y varía de perpendicular en los cordones montañosos a dendrítico.

**Qf:** Las corrientes y los ríos confinados que drenan hacia el centro de los valles están asociados con conos aluviales de transición. En algunos lugares estos se transforman en ríos grandes anastomosados. Los canales contienen sedimentos fluviales que incluyen conglomerados, gravas y arena. En las imágenes Landsat TM, los sedimentos fluviales se observan como canales estrechos de albedo alto.

**Qs:** Evaporitas. En los valles intermontanos existen extensas salinas continentales, que reciben todo el drenaje en esta región desértica. Las salinas son típicamente elongadas N-S a lo largo de los valles. En el sudeste las Salinas Grandes se orientan ENE-OSO. Las salinas están formadas por carbonatos, cloruros, boratos y sulfatos evaporíticos de grano fino a medio, y están bordeadas por limo con abundantes sales evaporíticas y dunas eólicas regresivas menores.

En las imágenes Landsat, las salinas se observan como depresiones de albedo alto a bajo, que varían de blanco-azul a negras. Las áreas negras corresponden por lo general a los bordes mapeados de las salinas (ver mapas topográficos 1:250.000), pero la correlación no es constante. La interpretación geológica muestra que el área de los sedimentos evaporíticos de la salina es más grande que el área actual, y esto refleja las dimensiones anteriores de las salinas.

**QI:** Lagos recientes en los valles intermontanos. En las imágenes Landsat TM estos se observan como regiones de albedo bajo.

## 5. MAPA INTERPRETATIVO DE LA GEOLOGIA SOLIDA

La siguiente sección describe el concepto global, la metodología y los resultados de la integración de la interpretación de Landsat TM con los datos magnéticos y radiométricos con el fin de producir el mapa interpretativo final de la Geología Sólida. Un mapa de Geología Sólida se diseña y produce con el propósito de representar las unidades de interés de una región, extendiendo los afloramientos a regiones donde están ocultos por materiales superficiales o por unidades que se consideran sin interés para dicho propósito.

En el caso del área de la Puna, el mapa de Geología Sólida se preparó para presentar todas las diferentes secuencias de rocas que se conocen a través de mapeo superficial y que se extienden debajo de los sedimentos cuaternarios superficiales.

### 5.1 LIMITACIONES DE LA GEOFISICA AEREA EN APLICACIONES DE MAPEO GEOLOGICO

En general la evaluación e interpretación del conjunto de datos de geofísica aérea permite mejorar el conocimiento geológico y geofísico del área donde se efectuó el relevamiento. Sin embargo, el nivel de detalle y la discriminación geológica están afectados por un número de limitaciones fundamentales, que no disminuyen los beneficios y las conclusiones del estudio.

- 1) La posible resolución que se obtiene de los datos magnéticos y radiométricos en un relevamiento aéreo. La altura de vuelo de >130m limita la resolución del relevamiento de la Puna. No se puede resolver las dimensiones de las unidades magnéticas con un ancho menor de 130m, o que tengan una separación de menos de 130m. El espaciamiento entre líneas de 1km también restringe la resolución del estudio de la Puna, debido a que cuerpos con un ancho menor de 1km y de magnetismo débil se observan como anomalías de 1-línea. La dirección de las líneas de vuelo también es un factor limitante en la resolución geológica. Las líneas de vuelo son paralelas o casi paralelas a la principal dirección preferencial de la estructura geológica de la región. Esto significa que debido al amplio espaciamiento entre las líneas, gran parte del detalle geológico a escala pequeña no se resuelve.
- 2) La velocidad de registro de los datos magnéticos y radiométricos es otro parámetro del vuelo que influencia la posible resolución. Las mediciones magnéticas a lo largo de las líneas de vuelo se registran cada 0.1 segundos, lo que corresponde aproximadamente a cada 7m en el terreno. Las mediciones radiométricas se suman a intervalos de 1 segundo, y esto corresponde a 70m en el terreno aproximadamente. De esta manera las imágenes radiométricas tienen una resolución menor que las imágenes magnéticas correspondientes.

- 3) Las características magnéticas están relacionadas con el grado de magnetización, y éste está influenciado por la concentración y distribución de los minerales magnéticos, principalmente magnetita (Clark, 1997). La definición de la litología geológica normal o tipo de roca por medio de parámetros geológicos amplios, no siempre es una guía adecuada de la concentración de minerales magnéticos. Los factores tales como la presión original, las condiciones de temperatura, la disponibilidad de oxígeno, el ambiente de deposición, el historial diagenético posterior, metamorfismo, la alteración y la meteorización, tienen gran influencia en la formación, preservación y destrucción de los minerales magnéticos. En las unidades de rocas presentes en el área de la Puna, hay ejemplos de unidades que se observan uniformes en terreno, pero que presentan una gran variación en intensidad magnética. En el caso contrario, el hecho de que existan unidades de rocas que difieren en forma significativa y que en esencia tienen el mismo carácter magnético pone de manifiesto que la "firma" magnética no es única. Las secuencias sedimentarias del Precámbrico al Terciario fueron las más difíciles de distinguir debido a que la "firma" no magnética es idéntica a la "firma" débilmente magnética.
- 4) En aquellos lugares en que la dirección de magnetización en las rocas no es paralela al campo moderno de la Tierra, la magnetización residual puede resultar en la introducción de complejidades en cualquier interpretación magnética. En el área de la Puna, hay varias áreas donde las rocas con susceptibilidades altas coinciden con zonas de intensidad de campo magnético negativo en los datos aéreos. Estas áreas de conflicto aparente pueden indicar la presencia de residuos. La magnetización residual puede tener varios orígenes: - químico, detrítico, isotermal y termal. Las rocas ígneas a medida que se enfrían pasan por el punto Curie - o sea la temperatura a la cual la magnetita retiene una proporción de la intensidad magnética, inclinación y declinación al momento del enfriamiento. Todas las rocas volcánicas Terciarias - Cuaternarias han pasado por el punto Curie durante su enfriamiento, y potencialmente podrían preservar vectores magnéticos residuales. La subdivisión magnético-litológica de las volcanitas en el mapa de Geología Sólida probablemente refleja diferentes composiciones y edades de extrusión .
- 5) Rayos Gama - los componentes activos de los datos radiométricos son altamente susceptibles de ser absorbidos por sedimentos superficiales. Si el registro es predominantemente residual y contiene material detrítico de la roca subyacente, la "firma" radiométrica será similar a la del substrato. En el caso opuesto, el aluvio transportado y los depósitos lagunares en valles intermontanos ocultan la "firma" radiométrica del substrato. Los datos radiométricos son susceptibles a la altitud de vuelo debido a que la atmósfera absorbe los rayos gama en forma muy efectiva. La interpretación litológica de las imágenes Ternarias (K:U:Th) a escala regional no es apropiada en el área de la Puna, debido a la combinación de altitud de vuelo, terreno accidentado, el gran porcentaje del aluvio transportado y los sedimentos lagunares, y el muestreo a lo largo de las líneas. Estos datos se utilizan en forma más efectiva como datos de perfil de líneas de vuelo. Para la interpretación de la geología sólida regional, los datos del canal-Potasio se presentan en una imagen procesada para mostrar un máximo de 5% de los valores, realizando de esta manera los sistemas de alteración con un posible contenido alto de potasio (comúnmente asociados con varios estilos de mineralización). Esta interpretación es cualitativa y no suministra una interpretación cuantitativa del porcentaje de Potasio (% K) .



## **5.2 CONCEPTO DEL MAPA INTERPRETATIVO DE LA GEOLOGIA SOLIDA**

La escala de las características y el estilo de las subdivisiones litológicas que se presentan en un mapa de Geología Sólida, derivado de la integración del mapeo geofísico y de terreno y mapeo de sensores remotos, dependen principalmente del espaciamiento entre líneas de los datos y de la respuesta geofísica de las diversas unidades de rocas.

Un relevamiento magnético detallado (espaciamiento entre líneas de 200m o menos) puede proveer detalles a pequeña escala para el mapeo geológico superficial, y permitir el mapeo detallado de unidades subsuperficiales. En el caso opuesto, los datos de espaciamiento amplio se interpretarían mejor como datos a escala regional, que muestran estructuras y zonas estructurales regionales, y secuencias magnetolitológicas que representan un híbrido entre grupos litológicos y subdominios tectónicos. Esto es particularmente cierto para el área de la Puna, en donde la principal dirección estructural es paralela a los datos de espaciamiento amplio, y la variación en la "firma" magnética de muchos de los grupos litológicos presentes en el área es limitada o no existe.

Por lo tanto la integración de la interpretación detallada de Landsat TM de la geología superficial, permite en la gran mayoría de los casos la descripción de las estructuras simplificadas a escala regional y secuencias tectono-litológicas amplias, en vez de litologías individuales. La descripción de estas secuencias bajo cobertura cuaternaria es en parte difícil, y algunos de los límites son subjetivos. En las volcánicas Terciarias-Cuaternarias, los datos magnéticos también permiten la descripción de intrusivos magnéticos previamente desconocidos (ocultos), de estructuras de chimenea volcánica/hidrotermal y subdivisiones magneto-litológicas.

De esta manera el mapa regional de la Geología Sólida ofrece una descripción regional cabal del marco tectónico/litológico de la región de la Puna y se preparó para ser usado conjuntamente con el mapa de Geología de Landsat TM.

## **5.3 CARACTERIZACION DE LOS DATOS Y DESCRIPCION DEL MAPA INTERPRETATIVO DE LA GEOLOGIA SOLIDA**

Como se explica anteriormente, la integración de la geología superficial con los datos geofísicos del relevamiento de la Puna resulta en la simplificación y generalización de ciertas estructuras, y en particular de las secuencias de unidades de rocas descritas. Las diferentes secuencias magnético-litológicas del mapa y sus características magnéticas globales se describen a continuación.

La geología de la región de la Puna, en su forma más simple, puede ser considerada en términos de una serie de dominios tectono-estratigráficos (Mon y Salfity, 1995). De Este a Oeste estos dominios incluyen el margen del Cratón Pampeano (Precámbrico-Cámbrico), la Faja Orogénica Oclóyic (Cámbrico Superior-Ordovícico), el Sistema Rift Salta (Mesozoico-Terciario) y la Faja Orogénica Andina del Cenozoico y su volcanismo. Estas subdivisiones tectónicas se describen en mayor detalle en la Sección 7 de este informe.

### **5.3.1 Margen del Cratón Pampeano (P,LC,–C,– - Sedimentos-metasedimentos Precámbricos a Cámbricos)**

Esta secuencia está formada por sedimentos que varían desde metasedimentos de bajo grado (facies de esquistos verdes) a sedimentos no metamorfoseados de la Formación Puncoviscana. La secuencia que se muestra en el mapa de Geología Sólida también puede contener intercalaciones volcánicas desconocidas, y áreas no determinadas de secuencias sedimentarias Ordovícicas. La secuencia varía típicamente de no magnética a moderadamente magnética. Una serie de altas magnéticas amplias de tipo regional se superponen a la respuesta magnética poco profunda en el SE de la región. Este cuerpo se describe como una serie de posibles intrusivos Jurásico-Cretácico, pero que puede estar relacionado con rocas cristalinas magnéticas ocultas del Cratón Pampeano. Una asociación similar se ha observado en el relevamiento de la Precordillera San Juan-La Rioja entre secuencias Precámbricas y fuentes magnéticas profundas (Nash, en prep). El granito de la Formación Quesera del Precámbrico (P,LC,–q) tiene una “firma” magnética fuerte.

### **5.3.2 Orógeno Ocloyic (Secuencias sedimentario/intrusivas del Cámbrico Superior-Ordovícico Os)**

Las secuencias de tipo faja plegada/cizallada del Cámbrico Superior-Ordovícico de la región de la Puna, son típicamente no magnéticas a débilmente magnéticas, con horizontes marcadores no magnéticos que permiten el trazado de estructuras en detalle. En la **FEO**, las volcanitas sinsedimentarias y los granitoides sintectónicos tienen “firmas” que varían de no magnéticas a débilmente magnéticas idénticas, y no pueden ser diferenciados en los datos geofísicos a escala regional. Por lo tanto, el terreno Paleozoico incluye sedimentos marinos del Grupo Mesón y Grupo Santa Victoria y volcanitas sinsedimentarias y los granitoides sintectónicos a postectónicos. En estos subdominios no es posible la resolución detallada de la deformación de pliegues apretados/cizallas debido al espaciamiento entre líneas de 1km y a la dirección N-S del relevamiento.

Sin embargo, en base a las características litológicas previamente investigadas (mapas de facies de Bahlburg, 1990), y a la presencia de importantes estructuras limitantes, el terreno Paleozoico ha sido subdividido en 5 subdominios litológico/tectónicos. Los subdominios están parcialmente en contacto uno con el otro, y en parte separados por secuencias sedimentarias Mesozoico-Terciarias, y cubiertos por volcanitas Terciario-Cuartarias.

- Os1: Sierra Aguilar - región de la Cordillera Oriental.** Este subdominio incluye unidades de plataforma de areniscas-pizarras que originalmente cubrían las secuencias Precámbrica-Cámbrica en el margen del Cratón Pampeano en forma discordante. Las facies de plataforma varían a turbiditas de cono submarino de aguas profundas hacia la parte superior de la secuencia y hacia el oeste. La deformación posterior ha intercalado **Os1** tectónicamente con la secuencia Precámbrica-Cámbrica. El subdominio tiene una intensidad magnética alta, amplia, regional y elevada, lo que refleja material magnético profundo. Esta anomalía magnética regional se correlaciona posiblemente con el basamento cristalino del margen continental original del Cratón Pampeano. Se deduce que el margen occidental de **Os1** está formado por la superposición de la extensión occidental de este gradiente, con una zona de falla principal N-S en la secuencia **Os**. Se interpreta que el subdominio se extiende como una rebanada tectónica estrecha al oeste de las Salinas Grandes, en donde está en contacto con **PcC** y **Os3** a través de una falla de cizalla.
- Os2: Región La Quiaca.** Este subdominio tiene direcciones N-S en el norte del área a NE-SO en el sector central, donde está cubierto por volcánicas magnéticas Terciarias. Las turbiditas de cono submarino de aguas profundas varían de no magnéticas a débilmente magnéticas dominan el subdominio. El margen oriental lo forma el contacto de falla N-S a NE-SO con **Os1**. El margen occidental, en el extremo norte de la región, lo forma el contacto con **Os3** a lo largo de una zona de falla principal con dirección N-S. El subdominio tiene una intensidad magnética regional moderada, lo que sugiere que el basamento cristalino Precámbrico tiene un espesor reducido en profundidad (sin embargo, no se puede separar un claro gradiente magnético para estimar la profundidad del "basamento").
- Os3 "Faja Eruptiva de la Puna Oriental" (FEO).** El subdominio se caracteriza en afloramientos por la presencia de interestratificaciones de volcánicas sinsedimentarias y granito sintectónico a postectónico y granito gneisico. La secuencia igneo/sedimentaria es de débil a moderadamente (local) magnética. Hacia el norte el subdominio se orienta en dirección N-S, y limita hacia el oeste con sedimentos **Os2** y **KT**, a través de contacto de falla, y al oeste con sedimentos **KT** por medio de contacto fallados. Las directrices magnéticas débiles, que se observan en forma parcial en datos Landsat TM, y paralelas a las fallas limítrofes cambian a NE-SO hacia el sector central, en donde el subdominio, que aparentemente se bifurca en dos fajas, está oscurecido por las volcánicas magnéticas **TQv**. La evidencias de fallas reactivadas en las volcánicas superpuestas expresa la continuidad de algunas de estas fallas principales. Hacia el sur de las volcánicas, una zona N-S de volcánicas magnéticas oscurece las dos fajas bifurcadas del subdominio. Este subdominio representa un arco magmático principal en la pila de las sedimentos Ordovícicos, y se interpreta como un arco volcánico (Coira y otros, 1993) que se inicio durante la convergencia de los Cratones Iquique y Pampeano al final del Ordovícico.

**Os4: Faja Rinconada-Carahuasi.** Las turbiditas de cono submarino de aguas profundas, con un gran porcentaje de pizarras, dominan este subdominio. La secuencia típicamente varía de no magnética a débilmente magnética, con un gradiente de intensidad magnético regional en general de bajo a moderado. Hacia el este una cuenca sedimentaria **KT** superpuesta y deformada oscurece el contacto con **Os3**. El límite oeste se interpreta como la extensión occidental de un gradiente magnético regional amplio, que esta superimpuesto por una textura magnética “moteada” poco profunda. Los sedimentos **KT** superpuestos oscurecen el contacto con **Os5** hacia el este.

La extensión meridional del subdominio cambia abruptamente a la dirección NO-SE a lo largo de una aparente falla regional, dextral, con desplazamiento de rumbo. Esta falla influencia las volcánitas Terciarias, pero puede ser el reflejo de un margen tectónico preexistente (Paleozoico) con **Os4**.

**Os5: Minas Pirquitas - Faja Sierra de Lina.** Turbiditas de cono submarino de aguas profundas, con intercalaciones menores de arenisca en una secuencia rica en pizarras, dominan este subdominio. Este subdominio tiene en el norte una dirección N-S, pero a diferencia de los subdominios Paleozoicos, tiene una dirección NNO-SSE tanto en el oeste como en el sur. Una concentración de cizallas y plegamiento intenso (evidente en imágenes Landsat e indicados en los datos magnéticos) han intercalado rebanadas tectónicas de sedimentos **KT** más jóvenes (esto ocurre en todos los subdominios, pero es más marcado en **Os5**). Las volcánitas magnéticas **TQv** se superponen y oscurecen en gran parte la parte septentrional y occidental del subdominio. Hacia el sur el subdominio tiene un contacto de falla (orientación NO-SE) con las volcánitas **TQv**. Evidencia, suministrada por Bahlburg (1990), de una secuencia sedimentario-volcánica de arco volcánico hacia el oeste en Chile, sugiere que la falla NO-SE en el sur del subdominio puede ser el reflejo de un contacto tectónico primario en las secuencias Paleozoicas. El subdominio típicamente varía de no magnético a débilmente magnético.

### 5.3.3 Intrusivos Pérmicos (Pi)

En la región de Tusaquillas, los “stocks” pérmicos de dioríticos a monzoníticos tienen un carácter magnético variable. Los stocks dioríticos en el extremo sur de los afloramientos de granito cretácico son moderadamente magnéticos, y según los datos se pueden interpretar como una serie de centros intrusivos múltiples. Los afloramientos en el extremo norte del granito no poseen una “firma” magnética substancialmente distinta del granito cretácico que los rodea. Los intrusivos pérmicos parecen no tener “firmas” magnéticas únicas o características, y en consecuencia es posible que los afloramientos de estas rocas que no se han identificado en terreno como pérmicas, no estén separadas en el mapa de Geología Sólida de la amplia serie intrusiva Mesozoica.

### 5.3.4 Sedimentos Pérmicos - Formación Cauchari (Pc)

La Formación Cauchari aflora como una angosta faja N-S de sedimentos deformados al este de la Laguna Cauchari. En los datos magnéticos los sedimentos varían de débilmente magnéticos a no magnéticos, y no se distinguen de las secuencias sedimentarias Paleozoicas a Mesozoico-Terciarias de la región. En el mapa de Geología Sólida, la extensión de esta secuencia representa los límites tectónicos de los sedimentos restringidos por fallas evidentes en los afloramientos. Es posible que esta formación se extienda debajo de la superficie, pero no puede ser mapeada a esta escala utilizando la geofísica.

### 5.3.5 Sistema “Rift” Salta (Rocas intrusivas Jurásico-Cretácicas y rocas sedimentarias Mesozoico-Cenozoicas)

Rifting regional N-S en el Mesozoico, junto al emplazamiento de intrusivos y deposición sedimentaria reactivó el terreno compuesto Paleozoico-Precámbrico. Los intrusivos fueron emplazados en forma predominante durante el Jurásico-Cretáceo, aunque se han reconocido intrusivos menores de finales del Paleozoico en el área. A esta escala, las “firmas” magnéticas de los varios intrusivos no son características de las series de edades diferentes. Los intrusivos Mesozoicos descritos en el mapa pueden incluir intrusivos Paleozoicos no reconocidos como tales.

#### (a) Intrusivos alcalinos (JKi, JKis, JKim+, JKim-)

Estos consisten en una serie de intrusivos de composición variable, desde granitoides a piroxenitas. Los intrusivos tienen generalmente < 10km de ancho o de longitud.

**JKi** consiste en monzonita a diorita, que afloran como un cuerpo principal en la región de la Sierra Aguilar, donde intruye sedimentos Ordovícicos. El depósito Pb/Ag de las Mina Aguilar ocurre en la zona de contacto. La “firma” magnética del cuerpo es no magnética a débilmente magnética, superpuesta por un alto gradiente regional evidente en los datos magnéticos. La “firma” magnética tiene una textura “moteada”. Es posible que la unidad incluya relictos de las rocas sedimentarias intruídas y otras fases intrusivas menores. Los datos magnéticos no distinguen los contactos con los sedimentos adyacentes. Esto se debe posiblemente a un greisen transicional o a una zona de alteración: los contactos provienen de la interpretación de Landsat TM y se han modificado de acuerdo a trazas directrices en los datos de IMT/RAP 1DV.

**JKis** consiste en un lacolito de sienita gris blanco pálido mapeado en terreno, y que se interpretó de los datos Landsat TM. La sienita típicamente varía de no magnética a débilmente magnética y su orientación es similar a la de las líneas de vuelo. Debido a esto y a lo angosto del cuerpo, el lacolito no aparece en los datos magnéticos regionales. Los límites se han adoptado de la interpretación Landsat TM.

**JKim+** consiste en una serie de intrusivos fuertemente magnéticos, que varían de diorita (que contiene la mina Abra de la Mina de Pb/Ag/Ba) a piroxenita y hornblendita bandeadas ( un cuerpo pequeño que intruye sedimentos Ordovícicos 15km al oeste de Susques). Las “firmas” magnéticas varían de polar a dipolar. La mayoría de las “firmas” magnéticas de los intrusivos son amplias, lo que indica que los intrusivos están emplazados debajo del nivel superficial actual. La mayoría de los intrusivos se concentran en dos corredores NO-SE en el SE de la región (cerca de Cobres - Esquina Grande y Abadón Castro Tolay). El cuerpo magnético oculto (gradiente magnético difuso, amplio) que ocurre en el sudeste de la región se describe como un posible intrusivo **JKim+**. El cuerpo se describe con un ancho menor que el de la anomalía magnética, para reflejar en forma realista el cuerpo que la causa, aunque a esta escala los límites son arbitrarios. Las orientaciones NE-SO y NO-SE de los corredores de intrusivos sugieren un emplazamiento a lo largo de las orientaciones de fallas rift primarias y de fallas de transferencia secundarias, durante el desarrollo del Sistema Rift Salta. Estas direcciones son paralelas al emplazamiento de diques angostos (5-10m) de carbonatita, que se mapearon en terreno los diques no tienen “firmas” magnéticas y por lo tanto no se han incorporado en el mapa de geología sólida a esta escala.

**JKim-**. Las zonas elípticas de magnetismo bajo en los datos de IMT/RAP se interpretan como posibles intrusivos no magnéticos, o con magnetismo inverso. Estos intrusivos al igual que **JKim+** son posiblemente parte de la misma serie general de intrusivos.

**Granito -granodiorita (Kg)**. Esta unidad representa el plutón granito-granodiorita principal que aflora en la región Tusaquillas. El cuerpo varía de no magnético a débilmente magnético y tiene una textura característica “moteada”. En los datos magnéticos, los contactos con sedimentos/intrusivos Ordovícicos son vagos y se describen como una modificación de la extensión de los afloramientos mapeados, y modificados en base a directrices magnéticas débiles NE-SE. **JKg** intruye diorita granodiorita pérmica en los extremos septentrionales y meridionales del plutón Tusaquillas.

**Greisen (JKgr)**. El margen oriental del granito **JKg** (determinado en el afloramiento) se asocia con un greisen de cuarzo-turmalina de grano grueso, el cual tiene una susceptibilidad magnética un poco más elevada que la del granito. Los datos magnéticos regionales muestran al este de **Kg** una zona difusa, irregular, amplia, con magnetización de moderada a baja, que se extiende bajo las salinas cuaternarias hacia el **JKi** de la región de la Sierra Aguilar. Esta zona se interpreta como una región de greisen y alteración asociada con **JKg** e indica una superficie de techo **JKg** de poca profundidad debajo de la zona. Es posible que la zona incluye parches de sedimentos Ordovícicos (posiblemente alterados). La zona se caracteriza por una serie de altas magnéticas lineales, amplias, con dirección E-O. Ellas se interpretan como probables diques máficos, magnéticos (**Kd**) asociados con la serie intrusiva Cretácica. Otra interpretación es que estas anomalías representan una alteración intensa a lo largo de fracturas E-O en la zona de greisen.

**(b) Sedimentos Mesozoico-Terciarios (KTs)**

Con la deformación rift Mesozoica de dirección N-S, se inicia una sedimentación marina-continental dentro de las fosas tectónicas extensionales N-S (Grupo Salta del Cretáceo al Terciario medio), y que durante la inversión de cuenca asociada con la compresión E-O de la Orogenia Andina, se extiende con la deposición discordante de sedimentos del Terciario medio a final.

Las rocas sedimentarias en **KTs** consisten en el Grupo Salta del Cretáceo al Terciario medio y sedimentos no diferenciados Terciarios más jóvenes. Cada una de estas secuencias pueden ser fácilmente mapeadas en paquetes estratíficos separados tanto en terreno como en los datos Landsat TM. Sin embargo, la "firma" magnética de todos los sedimentos es idéntica en los datos regionales, y por lo tanto las secuencias individuales no pueden extenderse con confianza en áreas cubiertas por los sedimentos Cuaternarios. Como resultado, los sedimentos en el mapa de geología sólida regional se describen como dominios de sedimentación Cretácea a Terciaria.

Las secuencias sedimentarias típicamente varían de no magnéticas a débilmente magnéticas, con variaciones solo evidentes en el gradiente magnético regional en los dominios de sedimentación separados.

Los sedimentos **KTs** han sido afectados por el mismo plegamiento y fallamiento de cizalla que afectó el basamento Precámbrico-Paleozoico, y la presente distribución de los sedimentos refleja la intensa deformación sufrida entre los varios subdominios basamentales. Los plegamientos de escala regional y fallas internas que limitan **KTs** se evidencian localmente como directrices magnéticas débiles. Los dominios alargados N-S a NNE-SSO en contacto de falla con dominios alargados del basamento Paleozoico-Precámbrico, dominan la presente distribución de **KTs**. Las cuencas invertidas tienen en parte una distribución en 'echelon', con zonas de fallas NO-SE a NNO-SSE que desplazan las secuencias. Se cree que estas estructuras son reactivaciones de fallas iniciales de transferencia que se desarrollaron durante el proceso inicial del rift en el Mesozoico.

El carácter no magnético a débilmente magnético de **KTs** es muy similar o idéntico al de las secuencias Paleozoicas (**Os**) adyacentes, que la intercalan tectónicamente. Por lo tanto, en lo posible los límites extrapolados de **KTs** y **Os** están definidos por quiebres tectónicos mayores (zonas de fallas) visibles en los datos magnéticos como zonas lineales demagnetizadas sutiles (débiles). Este tratamiento es en cierta manera subjetivo si se considera la complejidad local de los límites que se observan en terreno y en las imágenes Landsat TM, pero por lo menos proporciona una aproximación de la distribución y naturaleza de las cuencas sedimentarias. De esta manera, la descripción de **KTs** en el mapa de geología sólida representa un dominio litológico-tectónico en vez de una secuencia estratigráfica, y probablemente contiene en parte, porciones no reconocidas del basamento Paleozoico.

### 5.3.6 Orogenia Andina (Volcanitas Terciario-Cuaternarias TQv)

La Orogenia Andina incluye colisión E-O y subducción de la Placa Pacífica debajo de la corteza continental de América del Sur. Esto ha tenido como resultado el engrosamiento de la corteza, el levantamiento isostático de la región de la Puna y a través de toda la región de episodios de compresión (inversión de cuencas) y de extensión (tectónica de cuenca de arcos dorsales). Durante la Orogenia Andina se depositaron las secuencias sedimentarias no diferenciadas del Terciario incluidas en las secuencias **KTs** del Sistema Rift Salta, descritas anteriormente.

La Orogenia está particularmente marcada por el emplazamiento de volúmenes significativos de materiales volcánicos. Las imágenes Landsat TM muestran que los sectores noroeste, oeste y central de la región de la Puna están dominados por complejos volcánicos de gran escala, y por volcanitas más pequeñas en el sur. Los complejos volcánicos expuestos se concentran en una faja N-S a lo largo de la Cadena Andina en el borde occidental del relevamiento, y en fajas con dirección NO-SE que cruzan la región central y meridional.

El conjunto **TQv** consiste en calderas, flujos de estrato-volcanes, brechas, ceniza, flujos de escombros y domos de dacita-riodacita (**TQv1&2**) e ignimbritas **TQi** de la geología superficial **Tqa**, **Td** y **TQt** publicada en mapas geológicos 1:200.000 y 1:400.000. Aunque es fácil discriminar en las imágenes Landsat TM los flujos de caldera y de facies volcánicas, brechas, domos, etc, de las extensas ignimbritas, estas unidades tienen por lo común “firmas” magnéticas similares, y por lo tanto se describen en el mapa de geología sólida como un complejo volcánico importante.

De todas las secuencias de la región, las volcanitas, que varían de andesitas a dacitas-riodacitas, con escaso basalto en los centros volcánicos más jóvenes, tienen las “firmas” magnéticas más notables. Ellas son muy variadas en intensidad, de no magnéticas a fuertemente magnéticas, y exhiben típicamente un patrón global “ruidoso”. Los patrones magnéticos traslapados, que varían de circulares a elípticos, cruzados por numerosas fallas y fracturas N-S, NO-SE y NE-SO, reflejan el recubrimiento complejo de las calderas circulares y los centros volcánicos evidente en las imágenes Landsat. Un patrón magnético intenso, E-O, en la región de Coranzuli, refleja un patrón intenso de fractura/estratificación evidente en los flujos ignimbriticos. Es preciso notar que en las regiones de afloramientos ignimbriticos, los numerosos patrones magnéticos probablemente representan centros eruptivos ocultos. Se interpreta una zona de intensidad magnética moderada, de textura E-O, que se extiende al sur de los afloramientos volcánicos en la región de Coranzuli, como la continuación subsuperficial de las ignimbritas.

Los domos de dacita en la región, que ocurren por lo común a lo largo de los bordes de calderas derrumbadas, típicamente exhiben fuertes anomalías magnéticas locales. Estas anomalías, positivas, dipolares y negativas (y complejos híbridos) indican un magnetismo residual variable y por lo tanto edades de emplazamiento variable. Los conos estrato-volcánicos, como el Cerro Granada, también presentan “firmas” residuales dipolares o negativas.



Los datos magnéticos regionales simulan los complejos volcánicos circulares conocidos (expuestos o parcialmente ocultos), y proveen evidencia de una caldera totalmente oculta, pero previamente sospechada, en la región de la Laguna de Pozuelos (ver Coira y otros, 1996). Debajo de la Laguna, un complejo de anomalías magnéticas altas, amplias, difusas y elípticas aparece rodeado por anomalías magnéticas de complejas a simples, que se asocian con domos de dacita en el Cerro Redondo (al oeste), Cerro León y Pan de Azúcar (al sur), y con intercalaciones de volcanitas, volcanoclásticos y sedimentos (al este). La asociación de altas magnéticas con domos dacíticos resurgentes y facies volcánicas proximales sugiere que las anomalías altas magnéticas representan el centro magnético de una caldera derrumbada, actualmente cubierta por sedimentos Cuaternarios.

El conjunto de volcanitas ha sido subdividido en tres unidades (subjetivas):

- **TQvm+** zonas volcánicas con “firmas” magnéticas positivas de moderadas a altas
- **TQv** - zonas volcánicas con magnetización de baja a moderada
- **TQvm-** zonas volcánicas con “firmas” magnéticas de bajas a negativas.

Se reitera aquí, que como ocurre con todas las subdivisiones y límites que se describen en un mapa de escala regional derivado de datos con espaciamiento amplio, las unidades reflejan los promedios de las unidades geológicas en un volumen de terreno razonable.

### 5.3.7 Anomalías geofísicas no diferenciadas

En los datos magnéticos hay numerosas anomalías magnéticas aisladas con extensiones máximas (típicas) de 1 o 2 líneas de ancho. Ellas son de naturalezas positivas, negativas y dipolares y ocurren en numerosas secuencias geológicas. Muchas de estas anomalías coinciden con mineralización conocida, y se interpretan como chimeneas epitermales/hidrotermales, intrusivos de escala pequeña, y/o sistemas de alteración de fluidos locales. Varias de estas anomalías coinciden con complejos volcánicos, contactos intrusivos, o zonas de fallas principales.

Los datos radiométricos de potasio indican la presencia de numerosas anomalías aisladas con un alto contenido de potasio en el área. Estas anomalías se observaron en una imagen del 5% máximo de los datos del canal-K, en un esfuerzo para individualizar las señales aisladas de alto contenido de potasio, que se asocian a menudo con fluidos de alteración mineralizadores. Las anomalías descritas fueron seleccionadas en las imágenes Landsat TM, en base a conexiones aparentes tenues o no existentes con controles litológicos particulares, para reducir la descripción de variaciones en la composición primaria (como ser afloramientos graníticos principales).

Numerosas anomalías aisladas, de pequeña escala, coinciden con la traza de zonas de falla Terciarias-Cuaternarias principales (por ejemplo a lo largo de fallas que marcan el límite oriental de los sedimentos Ordovícicos al oeste del Salar de Olaroz y del Salar de Cauchari). Varias de estas anomalías coinciden con pequeñas anomalías magnéticas, y/o fuentes hidrotermales conocidas o están adyacentes. En varios casos, el oro aluvial se ha recuperado y aún se recupera en zonas cercanas a las anomalías.

## **6. MODELAMIENTO MAGNETICO**

### **6.1 INTRODUCCION**

El propósito del modelado matemático de los datos magnéticos fue mapear detalles estructurales y de cuenca a lo largo de tres perfiles del conjunto de datos de la Puna. Para esto se utilizaron dos métodos: las soluciones Werner, que utilizan un método de deconvolución Werner, y el modelado magnético (modelo de avance) de los perfiles, que utiliza las soluciones Werner como un control inicial de profundidad.

Los datos también fueron sometidos a un análisis automático de profundidad tridimensional Werner. Debido a la naturaleza regional de los datos y la débil respuesta magnética de varias de las secuencias geológicas en el área, los resultados geológicos fueron ambiguos. Los resultados de la deconvolución tridimensional Werner no se incluyen en esta interpretación.

### **6.2 PARAMETROS REGIONALES**

El modelamiento de avance compara la intensidad magnética total observada con un campo magnético que se calcula en base al siguiente campo magnético regional. No se consideraron en este estudio los datos referentes al residuo de ciertos diques presentes en el área.

Fuerza del campo = 23.741 nT

Inclinación =  $-17^{\circ}$

Variación =  $-4^{\circ}$

Estas cifras se calcularon utilizando el modelo IGRF suministrado por Montaj, y se basan en el modelo IGRF 1995.

Para esta parte de la interpretación se utilizaron las líneas 27080, 27212 y 27220.

### **6.3 SOLUCIONES DE PROFUNDIDAD AL BASAMENTO**

World Geoscience utiliza un algoritmo Werner modificado en el cálculo de las soluciones de profundidad a la fuente. Las soluciones de profundidad Werner que a lo largo de las líneas seleccionadas se usan como puntos de referencia de profundidad absoluta. Esto demuestra el uso y la aplicabilidad de las soluciones de profundidad para proveer un punto de referencia para los modelos magnéticos. Las soluciones Werner se clasifican en soluciones de tipo dique y de contacto, que reflejan la estructura de la geología. Los cambios en la derivada vertical generan las soluciones dique. Las soluciones de contacto se calculan a través de variaciones en la derivada horizontal de los datos de campo magnético total.

Las soluciones de profundidad se clasifican de acuerdo a sus posiciones laterales en relación a los afloramientos sedimentarios y volcánicos conocidos, o a soluciones de mayor profundidad. Los resultados se trazaron a 1:250.000 (ver Figura 3). Estas profundidades se utilizaron como una guía para el ápice del bloque durante el proceso de modelamiento.

## 6.4 HIPOTESIS INICIAL

La hipótesis inicial para el modelo de cuerpos magnéticos se basa en que dichos cuerpos se componen de una serie de prismas magnéticos subverticales. En base a las susceptibilidades de altas a moderadas de las secuencias volcánicas Terciarias se asume una susceptibilidad alta para los cuerpos magnéticos.

Los datos se redujeron al polo antes de comenzar el modelo. Para asegurar que los cuerpos actuales estaban localizados directamente debajo de lo datos anómalos el modelamiento se llevó a cabo con datos RAP en vez de datos IMT. La profundidad tope de cada prisma se determinó con las soluciones Werner.

Para identificar áreas de afloramiento a lo largo de la línea, cada línea de solución Werner se superpuso el trazado de la línea de vuelo en un mapa geológico. La igualación del afloramiento con la consistencia de la “firma” magnética provee un método para identificar la geología subsuperficial a través de las amplitudes, longitud de onda y componentes de ruidos de la señal magnética.

## 6.5 RESULTADOS

Fue difícil efectuar el modelado de cada pequeña anomalía presente en los datos debido a la complejidad de los datos magnéticos y de la geología subsuperficial sobre el largo aproximado de 150 kilómetros de cada línea. Se preparó un modelo básico estudiando grupos de anomalías que tenían una apariencia similar, o límites claros en la señal.

Los bloques se colorearon aproximadamente con los mismos colores de los afloramientos que se muestran en el mapa Geológico del área 1:250.000. En varios casos un prisma representa un cambio en la susceptibilidad de un bloque más grande. En algunos casos, un bloque litológico aparentemente similar está formado por un máximo de 8 prismas.

En varias áreas, numerosos bloques se colocaron en categorías de susceptibilidades baja, media y alta debido a la escasez de afloramientos. Estos se han marcado en las secciones.

Afloramientos de unidades magnética no producen necesariamente “firmas” magnéticas altas debido a los cambios en las propiedades físicas de los materiales magnéticos. La meteorización de la magnetita y la erosión de la roca original mueve el material magnético a través del sedimento, lo que causa un nivel alto de ruido en los datos originales. La intemperización del material tiene como resultado la degradación de la respuesta magnética, y por ende de la señal.

La susceptibilidad total del área es muy alta, con un orden de magnitud de  $10^{-2}$  SI unidades. Esto es común para áreas de alta actividad volcánica.

Los diques remanentes ocurren frecuentemente en dos de las tres líneas. Estos diques no se pueden modelar en forma precisa debido a la falta de información de las propiedades magnéticas residuales (por ejemplo el índice Königsberger (índice Q)), y del buzamiento e inclinación del material magnético. Por lo tanto, se utilizaron susceptibilidades negativas para proveer una imagen precisa de la influencia que estos diques ejercen sobre la señal total.

Los modelos reflejan una región con intensa actividad volcánica, con intrusiones de diques (remanente e inducidos) que contienen material magnético cuya susceptibilidad cambia a través de la litología. Con el respaldo de las soluciones de profundidad derivadas del algoritmo de inversión Werner, se tiene un cuadro razonablemente preciso de la profundidad de las cuencas sedimentarias. En las secciones modeladas, estas soluciones se muestran como flechas rojas y azules. Las flechas azules representan diques, y las rojas representan contactos.

## 6.6 COMENTARIOS SOBRE LINEAS ESPECIFICAS

### Línea 27080

- Bloques de gran amplitud y poca profundidad forman el extremo oeste de la línea. Estos bloques afloran en ciertas áreas y han sido identificados en la superficie como andesita.
- En afloramiento, la mayor parte de la porción occidental de la línea 21080 consiste en ignimbrita que muestra una respuesta magnética baja. Esto sugiere que la ignimbrita (típicamente con susceptibilidad alta) ocurre como una lámina delgada sobre sedimentos ¿Paleozoicos a Cuaternarios?. Probablemente la línea completa consiste en una lámina muy delgada de ignimbritas sobre sedimentos marinos. Los afloramientos volcánicos (identificados como ignimbritas) ocurren al comienzo de esta línea, y esto se refleja en los datos acumulados en esta línea.
- Dique residual de poca profundidad en el centro de la línea.
- Las áreas que se identifican como de susceptibilidad media alrededor del dique y levemente hacia el este, no pueden ser identificadas en forma positiva debido a la falta de afloramientos. Por el carácter de la señal estas áreas pueden ser la continuación de secuencias sedimentarias.
- Más hacia el Este las unidades con susceptibilidad de mediana a alta probablemente corresponden a volcanitas de composición básica.
- La marcada baja en este primer grupo de prismas sugiere un dique intrusivo de material residual magnetizado. El modelo se alteró de acuerdo con esta información.

### Línea 27212

- Esta es la línea más compleja que se modeló. No se pudo modelar muchas de las intrusiones pequeñas tipo dique debido a la dificultad en fijar tantos prismas.
- Se observan muchos diques residuales de gran variedad de espesor.

- Un dique con propiedades magnéticas no remanentes (esto es normalmente inducido) intruye las secuencias sedimentarias.
- Bloque litológico de susceptibilidad muy alta, localizado en el extremo oriental 110.000 m de la línea; profundo, sin afloramiento. Forma el basamento de una cuenca sedimentaria principal. Intruído por un solo dique remanente.
- La susceptibilidad variable de los diques residuales probablemente se debe a los cambios del campo magnético terrestre  $118^\circ$  -  $255^\circ$  sobre sí mismo durante la vida de los diques.

### **Línea 27220**

- El extremo occidental de esta línea consiste en volcanitas de alta susceptibilidad, someras, al lado de ignimbritas con buzamiento pequeño. Un dique profundo parece intruir este bloque, pero es demasiado profundo y con susceptibilidad relativamente menor que otros diques en la región.
- Los bloques de alta susceptibilidad forman los dos elementos principales del extremo oriental de la línea.
- La escasez de afloramiento no permite la posible identificación de este bloque.
- Como en el caso de la línea previa, se han identificado los basamentos de las cuencas sedimentarias usando los modelos y las soluciones Werner.

## 6.7 MAPA DE SOLUCIÓN TRIDIMENSIONAL EULER DE PROFUNDIDAD A LA FUENTE

El mapa de solución tridimensional Euler (Mapa 3) consiste en una serie de soluciones automáticas de profundidad a las fuentes magnéticas, que se calculan por medio de una “ventana” grillada que se aplica matemáticamente a los datos magnéticos. El algoritmo que se usa para las soluciones, calcula la profundidad en base a un cuerpo magnético tabular angosto (el modelo “dique”, o índice estructural = 1.0). Las soluciones que se calculan para anomalías que no se asemejan a esta geometría (por ejemplo chimeneas angostas), probablemente sólo representan una solución de profundidad mínima.

El mapa representa la profundidad aproximada a las fuentes magnéticas y no a la solución de “profundidad al basamento magnético” que se usa comúnmente en el análisis geofísico de cuencas sedimentarias profundas. Esto se debe a la naturaleza automatizada de las soluciones de profundidad y a la falta de un control geológico riguroso en el área. Estas soluciones de profundidad se deben usar en forma prudente y con referencia a la geología local, o a modelos geológicos vigentes.

En las soluciones de profundidad para la región de la Puna se destacan varias características:

- La profundidad de las fuentes magnéticas en la región varía de superficial a más de 5 km.
- Fuentes poco profundas en las regiones de los valles intermontanos con relleno Cuaternario tienen una profundidad de 100m a 700m. Se supone que las fuentes se relacionan con secuencias de Paleozoicas a Terciarias, y que la profundidad provee una estimación adecuada de la cubierta sedimentaria no magnética Cuaternaria ( y posiblemente Terciaria). En el sur de la región, los valles intermontanos (por ejemplo, en el área del Salar de Olaroz) parecen tener una cubierta sedimentaria no magnética Cuaternaria más gruesa que la de los valles en el norte (por ejemplo, área de la Laguna de Pozuelas).
- Los complejos de caldera Terciarios que se suponen ocultos bajo la Laguna de Pozuelas coinciden con fuentes magnéticas con profundidades mínimas de 2000m; estas fuentes puede que se relacionen con el complejo de caldera originalmente expuesto, o con magma magnético fósil debajo de la caldera. Existen una serie de soluciones de profundidad similares a lo largo de una orientación ESE-ONO, que se extiende 30 km aproximadamente desde la Laguna de Pozuelas.
- La mayoría de las soluciones de profundidad que se asocian con un carácter magnético circular (¿chimenea volcánica o tapón?) varían entre los 500m y los 1000m.
- Una serie de cuerpos magnéticos de orden de 2500m o más se ubican en una faja discontinua N-S, que se extiende de 7540000N 3450000E a 7460000N 3430000E. Estos cuerpos yacen cerca del contacto entre el plegamiento/faja de cizalla Terciario-Paleozoico y el principal arco volcánico ubicado a lo largo del borde occidental de la región de la Puna. Estos cuerpos probablemente representan las fuentes magmáticas fósiles de las principales secuencias volcánicas Terciarias. Un grupo de soluciones que coincide con la Mina Pirquitas exhibe una población bimodal, con un grupo de soluciones de poca profundidad que se localizan entre los 500m y los 1000m de la estructura de chimenea mineralizada.

- La característica más obvia de las soluciones de profundidad es el predominio de profundas fuentes magnéticas (de 2500m a más de 5000m) en el área sudoriental (región de Salinas Grandes), que se extiende al NNE hacia la zona de sedimentos gruesos del Grupo Salta. La mayoría de estos cuerpos magnéticos profundos parecen estar relacionados con la presencia del basamento cristalino Precámbrico que formó la base original de los sedimentos Paleozoicos. Sin embargo, no se sabe si las soluciones de profundidad están relacionadas con:
  1. La profundidad al techo del basamento Precámbrico magnético,
  2. La profundidad a intrusivos Precámbricos en el basamento, o
  3. La profundidad a intrusivos más recientes (¿Cretácico - Terciario?) en el basamento.
  
- La región que se interpreta como un desarrollo de greisen y de posibles diques de orientación E-O, al este de la Sierra Aguilar, tiene soluciones de profundidad que varían entre los 1000m y los 1500m. Los resultados de estas soluciones son ambiguos; ya que esto puede representar una región de alteración difusa, con la consiguiente ampliación y expansión de los gradientes magnéticos que se relacionan con la profundidad y la dispersión magnética.
  
- En la región del Salar de Olaroz hay un grupo de soluciones de profundidad de 1500m a 2500m que define una elipse amplia (7km por 4km) de orientación ENE-OSO. Estas soluciones parecen definir una fuente intrusiva profunda, que se localiza dentro o cerca de una importante inflexión escalonada dextral con orientación NNE, en el principal plegamiento/faja de cizalla N-S. Este intrusivo puede estar relacionado con el tapón ultramáfico fuertemente magnetizado que se localiza en el norte de esta inflexión (Ver Mapa 2).



## 7. DESARROLLO ESTRUCTURAL Y TECTONICO

El marco tectónico regional y la estructura del basamento del noroeste de Argentina se ilustran en la Figura 4 (tomada de Mon y Salfity, 1995). El área del relevamiento de la Puna se ubica inmediatamente al este de la faja Arequipa-Antofalla del Precámbrico (Cratón Arequipa) con su superestructura de volcanes Cenozoicos. La parte occidental del área cubre la Faja Ocloytic, predominantemente Ordovícica, mientras que la parte oriental del área cubre la Faja Choromoro del Precámbrico (Cratón Pampeano), que forma parte de la orogenia Panamericana.

Mon y Salfity (1995) han revisado recientemente el marco tectonoestratigráfico de la región de la Puna. En los Andes del noroeste de Argentina se han reconocido varias etapas tectónicas superimpuestas. Al este, las rocas de la orogenia Panamericana/Brasileña fueron amalgamadas entre 600-700 Ma (Cratón Pampeano). La Faja Ocloytic es una faja orogénica con orientación oeste que consiste en sedimentos marinos del Cretácico superior al Ordovícico, deformados durante el ciclo orogénico Ocloytic a fines del Ordovícico. En el área de la Puna los estratos Siluro-Devónicos, deformados durante fines de Devónico y comienzos del Carbónico, fueron los precursores de un ciclo deposicional Gondwana representado por varias cuencas de fines del Paleozoico, que se invirtieron en el Pérmico medio (Orogenia San Rafael). El ciclo Andino comienza con la deposición de sedimentos de cuenca rift en el Cretácico Superior-Eoceno (Grupo rift Salta). Estas depresiones se invirtieron a finales del Eoceno y la deformación continuó con episodios tectónicos Miocénicos y Plio-Pleistocénicos.

Los resultados del presente estudio se pueden considerar dentro de este marco tectonoestratigráfico. Rankin (1996) ha proporcionado una subdivisión tectónica del área del relevamiento de la Puna, en base a interpretaciones magnéticas (Figura 5). Los varios dominios litomagnéticos se describen brevemente en los siguientes párrafos.

### **Dominio 1:**

Este dominio se localiza en la zona sudoriental del área de estudio y está compuesta en forma predominante por sedimentos Precámbricos y rocas intrusivas del Cratón Pampeano, y está cubierto discordantemente por sedimentos de plataforma Cambro-Ordovícico. La zona está limitada al oeste por lineamientos NE-SO, y al este por fallamiento N-S del Rift Salta. Las fallas de cizalla NE-SO dominan las direcciones magnéticas dentro del dominio.

### **Dominio 2:**

El dominio 2 consiste en rocas sedimentarias y volcánicas Ordovícicas deformadas diferencialmente. En base al carácter magnético y a la litología, el dominio se ha dividido en un número de subdominios:

#### **- Subdominio 2a:**

Este pequeño subdominio se localiza en la zona SO del área de la Puna y se caracteriza por orientaciones NO-SE. Contiene sedimentos clásticos, volcanitas de arco y volcanoclásticos de la Formación Coquena del Ordovícico, la que se localiza al este del margen del Cratón Arequipa.

- **Subdominios 2b, 2c y 2d:**

Estos subdominios consisten esencialmente en turbiditas Ordovícicas (Formación Coquena). Como las turbiditas son en esencia no magnéticas, las observaciones estructurales internas relacionadas con estas fajas se basan principalmente en la interpretación Landsat (sección 4.2.1). Las turbiditas deformadas se orientan N-S. Las fallas Cretácico-Terciarias que limitan las fajas son visibles en los datos magnéticos y reflejan estructuras más antiguas.

- **Subdominio 2e:**

Este subdominio es una faja de orientación NNE/SSO, de 20km de ancho, que consiste en turbiditas Ordovícicas, rocas volcánicas y rocas intrusivas sintectónicas emplazadas durante la orogenia Ocoyic. Esta faja, también conocida como "FEO" (Faja Eruptiva de la Puna Oriental), tiene claras orientaciones estructurales NNE-SSO.

- **Subdominio 2f:**

Este subdominio ocurre en el noroeste del área de estudio de la Puna y está formado por pelitas, arenitas y conglomerados Ordovícicos, que gradualmente pasan a turbiditas hacia el oeste. Los patrones de deformación son diferentes del plegamiento y cizallamiento Ocoyic.

### **Dominio 3:**

El dominio 3 consiste en rocas intrusivas Jurásico-Cretácico. Los subdominios incluyen (i) intrusivos que varían de débil a no magnéticos en el área de Mina Aguilar-Tusaquillas; (ii) intrusivos residualmente magnetizados, aislados, dentro de un corredor estructural de rift NO, que se extiende desde el noroeste de Salinas Grandes al oeste de Susques, y que posiblemente incluye intrusivos alcalinos, e (iii) intrusivos moderadamente magnéticos en el área de la Laguna de Guayatayoc.

### **Dominio 4:**

El dominio consiste en el Rift Salta superimpuesto a rocas Precámbricas y Ordovícicas de los Dominios 1 y 2. El Rift Salta contiene sedimentos Cretácico-Terciario que varían de no magnéticos a débilmente magnéticos.

### **Dominio 5:**

El volcanismo Cenozoico del área de la Puna asociado con la orogenia Andina ha creado respuestas magnéticas variadas, que localmente son muy intensas (volcanitas basálticas/andesíticas). La importancia del volcanismo de caldera es evidente en la abundancia de patrones magnéticos circulares. Zonas de tensión conjugadas de orientación NE-SO y NO-SE ejercen un claro control estructural local del volcanismo Cenozoico

## 8. GEOLOGIA ECONOMICA

La siguiente exposición sobre la geología económica de la región del relevamiento de la Puna no intenta dar una opinión amplia o un resumen de todos los depósitos minerales y previa exploración en la región (dicha tarea no está dentro de los límites de este estudio). Más bien, el objetivo de esta discusión es proveer algunos ejemplos importantes de la asociación de la respuestas geofísicas con algunas de las mineralizaciones conocidas en la región, y dirigir la atención a áreas hasta ahora no exploradas que se asocian con anomalías magnéticas. Las ubicación de las minas y las prospecciones que se muestran en los mapas que acompañan este informe se extrajeron de los mapas de recopilación metalogénica 1:500.000 proporcionados por SEGEMAR.

La exploración de varios minerales en la región de la Puna comenzo con los Jesuítas españoles al inicio del siglo XVI, con la prospección de oro en el área de Rosario de Coyaguíama. A través de los años se han explotado muchos minerales incluyendo el oro asociado con sedimentos Ordovícicos y volcanitas Terciario-Cuartarias, metales bases y plata asociados con litologías variadas, así como también Sn, Sb, además de varios minerales evaporíticos de las salinas.

En relación al relevamiento geofísico, las áreas de mineralización más interesantes son:

- (i) Au asociado con trampas estructurales en los sedimentos Ordovícicos
- (ii) Au o Au/Cu asociado con volcanitas Terciario-Cuartarias
- (iii) Depósitos de metales bases/Ag asociados con sistemas de alteración en materiales Paleozoicos

En varias localidades en los dominios sedimentarios Ordovícicos , se ha explotado Au en el pasado. El marco tectónico Paleozoico y el marco sedimentario general son muy similares a los campos de oro de Bendigo de Australia oriental. Se reconoce que el oro se asocia con venas de cuarzo en filones auríferos en anticlinales, con sistemas de fallas de pared de base/pared colgante, y fallas de cizalla de gran escala. La combinación de los datos Landsat TM y los datos geofísicos delinea el grado de complejidad del plegamiento y fallamiento a través de las unidades Paleozoicas, y proporciona una sinopsis regional de las zonas potenciales de gran complejidad estructural, que posiblemente se asocian con sistemas de venas importantes.

También se sabe que en toda la región el Au se asocia con unidades volcánicas, en particular con domos resurgentes de dacita, como ser el Pan de Azúcar, el Cerro León y el Cerro Redondo, y con sistemas de calderas complejas. El oro aluvial se encuentra por generalmente en las cercanías de fuentes hidrotermales, lo que sugiere chimeneas epitermales/hidrotermales.

### Mineralización Asociada con “Firmas” Geofísicas

La región de la Puna tiene numerosos depósitos minerales conocidos, que coinciden o que están adyacentes a anomalías geofísicas presentes en los datos magnéticos y/o radiométricos. Dos ejemplos importantes son:

## **Minas Pirquitas**

Este es un depósito de Sn-Ag localizado en rocas sedimentarias alteradas del Paleozoico. La mina coincide directamente con una anomalía magnética fuerte y difusa (fuente profunda). Esta anomalía es probablemente un intrusivo subvolcánico o una estructura de fluido de chimenea, que es la fuente de los fluidos mineralizadores que han formado el depósito. La mina también se asocia con anomalías radiométricas de K altas y esta rodeada por ellas (coincide con una alteración potásica). Es importante notar que la imagen Landsat de la región muestra orientaciones de estratificación/fractura anómalas de carácter circular alrededor del depósito.

## **Minas Chinchilla (Pb-Zn)**

Los sedimentos Paleozoicos fueron intruidos por una chimenea de piroclastos de dacita explosiva a lo largo de fallas NO-SE, cerca de fallas principales NNE-SSO (ver Coira y Pérez, 1996). La chimenea se asocia con una clara anomalía magnética, difusa y fuertemente negativa. La anomalía posiblemente representa la raíz intrusiva original de la chimenea, o un sistema de fluidos de alteración que se asocian con la mineralización.

Se invita al lector a consultar a Chernicoff y otros (1996) si desea otros ejemplos de la región de la Puna

## 9. CONCLUSIONES

Se investigó la litología y estructura de los 36.000 km<sup>2</sup> de la región del relevamiento de la Puna, en el noroeste Argentino, usando la interpretación integrada de imágenes de datos geofísicos aéreos y satelitales. Los datos geofísicos aéreos no son adecuados para la interpretación litoestratigráfica en detalle, debido a la naturaleza regional del relevamiento (espaciamiento entre líneas de 1 km). Por consecuencia, hemos hecho uso extenso de imágenes Landsat TM, de gran calidad fotográfica, en la investigación de la estratigrafía y estructura internas de los afloramientos de las unidades geológicas de la región de la Puna. Sin embargo, los datos aéreos magnéticos y radiométricos fueron muy útiles en la definición de los dominios litoestructurales principales, que forman la compleja región de la Puna, y que han experimentado repetidas colisiones, acortamiento, extensión y volcanismo de arco desde el Neoproterozoico hasta el Cenozoico.

La interpretación Landsat TM a escala 1:250.000 se describe en un grupo de mapas separados. La información Landsat se interpretó en base a mapas fotográficos de imágenes compuestas RVA = 741, que fueron indispensables para obtener la información detallada de la estructura interna. La interpretación fotogeológica de las imágenes Landsat fue útil en el mapeo de (i) rocas Neoproterozoicas-Paleozoicas en el SE de la región de la Puna; (ii) la faja plegada Ocoyic del Ordovícico; (iii) los granitos intrusivos Cretácicos, que se relacionan con el Rift Salta; (iv) la estratigrafía interna del Rift Salta; (v) los sedimentos no diferenciados Terciarios; (vi) las volcanitas andinas del Mioceno-Plioceno y (vii) los sedimentos Cuaternarios, incluyendo salares extensos.

La interpretación aeromagnética/radiométrica se describe en un grupo de mapas de "geología sólida" a escala 1:250.000, que fueron particularmente útiles en la identificación de los sistemas principales de fallas meridionales, que separan los terrenos tectoestratigráficos del área de la Puna. Los terrenos incluyen (i) el bloque Precámbrico sudoriental (Cratón Pampeano y cubierta Paleozoica), en el cual las anomalías magnéticas profundas sugieren cuerpos intrusivos o litoestratigrafía magnética; (ii) un mínimo de 6 subdominios diferentes, separados por suturas aparentes, en volcanitas y turbiditas del Orogénico Ocoyic del Ordovícico, que es generalmente no magnético; (iii) los granitoides Cretácicos mapeables asociados con el origen del Rift Salta, y (iv) las "firmas" magnéticas fuertes de volcanitas de caldera, que se formaron durante la actividad magmática de arco Andina (Terciario-Cuaternario).

Durante el estudio se observaron numerosas anomalías aeromagnéticas y radiométricas que pueden ser indicadores de mineralización. Los depósitos minerales tales como Mina Pirquitas (Sn/Ag) y Mina Chinchillas (Pb/Zn) se asocian con firmas geofísicas aparentes.

## 10. BIBLIOGRAFIA

- Bahlburg, H., 1990. The Ordovician basin in the Puna of NW Argentina and N Chile: geodynamic evolution from back-arc to foreland basin. *Geotekt. Forsch.*, 75, 1-107.
- Bahlburg, H., Breitzkreuz, C., Maletz, J., Moya, M.C. and Salfity, J.A., 1990. The Ordovician sedimentary rocks in northern Puna of Argentina and Chile: new stratigraphical data based on graptolites. *News. Stratigr.*, 23, 69-89.
- Clark, D.A., 1997. Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys. *AGSO J. Aust. Geol. Geophys.*, 17, 83-104.
- Chernicoff, C.J., Garea, G., Hongn, F., Seggario, R., Zappettini, E., Coira, B., Caffè, P., Chayle, W., Gutierrez, G., Pérez, A., Soler, M. and Rankin, L., 1996. Interpretación geológica del relevamiento aeromagnético de la Puna septentrional, Jujuy y Salta. *Servicio Geológico Nacional, Ser. Contrib. Geofísica*, 1, 46pp.
- Coira, B., 1979. Descripción geológica de la Hoja 3c, Abra Pampa, Prov. de Jujuy. *Servicio Geológico Nacional, Boletín* 170.
- Coira, B., Davidson, J., Mpodozis, C. & Ramos, V., 1982. Tectonic and magmatic evolution of the Andes of northern Argentina and Chile. *Earth Science Review* 18, 303-322.
- Coira, B., Kay, S.M. and Viramonte, J., 1993. Upper Cenozoic magmatic evolution of the Argentine Puna—a model for changing subduction geometry. *Int. Geol. Rev.*, 35, 677-720.
- Dirección General de Fabricaciones Militares. Geología de la Región Noroeste, scale 1:400,000.
- Milligan, P.R. and Gunn, P.J., 1997. Enhancement and presentation of airborne geophysical data. *AGSO J. Aust. Geol. Geophys.*, 17, 63-75.
- Mon, R. and Salfity, J.A., 1995. Tectonic evolution of the Andes of northern Argentina. *In: A.J. Tankard, et al., eds., Petroleum Basins of South America. AAPG Mem.*, 62, 269-283.
- Nash, C.R., Rankin, L.R., Leeming, P.M. and Harris, L.B., 1996. Delineation of lithostructural domains in northern Orissa (India) from Landsat Thematic Imagery imagery. *Tectonophysics*, 260, 245-257.
- Nash, C.R., (in prep). Geological interpretation of Landsat TM and airborne geophysical data over the Precordillera (San Juan-La Rioja) area, northwestern Argentina. *Unpubl. Rep., World Geoscience Corporation*

Nash, C.R., (in prep). Geological interpretation of Landsat TM and airborne geophysical data over the Precordillera (San Juan-La Rioja) area, northwestern Argentina. Unpubl. Rep., World Geoscience Corporation

Rankin, L.R., 1996. Unidades tectónicas identificadas en el mapa aeromagnético de la Puna Septentrional. En Chernicoff, C.J., Garea, G., Hongn, F., Seggario, R., Zappettini, E., Coira, B., Caffè, P., Chayle, W., Gutierrez, G., Perez, A., Soler, M. y Rankin, L., 1996. Interpretación geológica del relevamiento aéromagnético de la Puna septentrional, Jujuy y Salta. Servicio Geológico Nacional, Ser. Contrib. Geofísica, 1, 2-7.

Reid, A.B., Allsopp, J.M., Granser, H., Millett, A.J. and Somerton, I.W., 1990. Magnetic interpretations in three dimensions using Euler deconvolution. Geophysics, 55, 80-91,

Schwab, K., 1980a. Hoja 5b, Salar de Cauchari. Servicio Geológico Nacional

Schwab, K., 1980b. Hoja 5a, Paso Huaitiquina. Servicio Geológico Nacional

SEGEMAR, 1996. Mapa geológico de la Provincia de Jujuy, República Argentina. 1:500.000 scale.

Turner, J.C.M., 1965a. Hoja 1ab, Santa Catalina, Prov. de Jujuy. Servicio Geológico Nacional

Turner, J.C.M., 1965b. Hoja 2b, La Quica. Servicio Geológico Nacional.

Turner, J.C.M., 1967. Hoja 2a, San Juan de Oro. Servicio Geológico Nacional

Turner, J.C.M., 1982. Descripción geológica de la Hoja 3ab, Mina Pirquitas, Prov. de Jujuy. Servicio Geológico Nacional, Boletín 187

Zappettini, E., 1989. Geología y metalogénesis de la región comprendida entre las localidades de Santa Ana y Cobres, Provincias de Jujuy y Salta, República Argentina. Tesis Doctoral, Univ. de Buenos Aires.

## **APENDICE**

NOTAS DE TERRENO CON MEDICIONES DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA