

## CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DEL ACUÍFERO TRANSFRONTERIZO GUARANÍ

Dr. Jorge Montaña [montanox@movinet.com.uy](mailto:montanox@movinet.com.uy) (FCIEN – UDELAR - Uruguay)

Dr Ernani Da Rosa [ernani@ufpr.br](mailto:ernani@ufpr.br) (UFPR - Brasil)

Dr Mario Hernández [mario\\_h@sinectis.com.ar](mailto:mario_h@sinectis.com.ar) (UNLP – Argentina)

### RESUMEN

El Sistema Acuífero Guaraní (SAG ) representa una de las reservas de agua dulce más importantes del mundo. Es un acuífero transfronterizo con una superficie de 1.200.000 km<sup>2</sup> que la comparten cuatro Países: Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay.

Aproximadamente en el 60 a 65% el SAG se encuentra cubierto por basaltos con espesores entre 200 a mayores a 1000m lo que determina un alto grado de protección, minimizando el grado de vulnerabilidad.

Su gran capacidad hídrica determina que potencialmente sus pozos en zonas donde su espesor es mayor, pueden extraer entre 500 a 800 m<sup>3</sup>/h. En varias regiones de Brasil, Uruguay y Argentina existe fenómenos de surgencia natural y geotermia de baja entalpía con temperaturas en las aguas que alcanzan temperaturas máximas entre 50 a 60°.

El referido Sistema Acuífero tiene una gran importancia como fuente hídrica de alta calidad para el abastecimiento público de medianas y grandes ciudades. Cuando es requerida para su aprovechamiento geotérmico es utilizada para cubrir la demanda de centros de turismo termal y podría ser utilizada para el secado de granos, pelado de carcasas de animales, etc.

En las últimas décadas la utilización de las aguas subterráneas en la región crece en forma exponencial principalmente en las áreas de afloramiento. En áreas confinadas se destaca la zona compartida entre Uruguay y Argentina con un uso intensivo de agua termal para turismo.

Esta situación genera la necesidad de implementar políticas de gestión nacionales e internacionales que aseguren la protección y el buen uso de este recurso.

### 1. INTRODUCCIÓN

El SAG es un recurso compartido entre los países del MERCOSUR (Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay) en un área aproximada de 1.182.500 km<sup>2</sup> (fig. 1), con espesores que alcanzan los 800 m y posee un potencial hídrico del orden de 40.000 km<sup>3</sup>. Está constituido por una potente sucesión de estratos porosos y permeables más o menos interconectados, que en su gran mayoría se depositaron durante el Mesozoico (Triásico – Jurásico) y parte superior del Paleozoico (Pérmico).

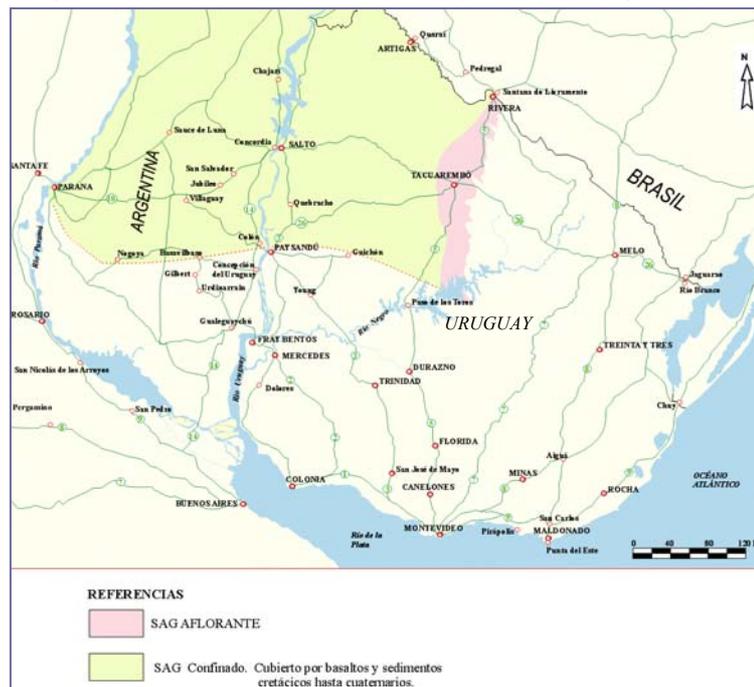


Figura 1. Mapa de Ubicación del Sistema Acuífero Guaraní

El objetivo de este trabajo es el de caracterizar el comportamiento hidrogeológico del SAG. En función de la extensa superficie que ocupa este sistema, nos centraremos en dos áreas; la primera de ellas se sitúa en la zona fronteriza entre Uruguay y Argentina y la segunda en la región limítrofe entre Uruguay y Brasil. En estas zonas se encuentran representadas respectivamente el área confinada y el área libre o de afloramiento del SAG (fig. 2). Esta caracterización se realiza en función de los estudios geológicos, hidrogeológicos, hidroquímicos y termales realizados en la región.

## 2. SAG EN EL ÁREA DE ESTUDIO

En primera instancia, se divide el acuífero en función de sus características geológicas e hidrogeológicas en dos grandes ámbitos: zona confinada y aflorante (figura 2).



**Figura 2.** Mapa que expresa en diferentes tramas la Zona aflorante y Zona confinada del Sistema Acuífero Guaraní en Uruguay

En casi toda su extensión el SAG se encuentra cubierto por potentes coladas basálticas que superan en algunos lugares los 1.000 m de potencia. Este grado de soterramiento genera que el SAG presente condiciones de termalismo y surgencia en algunas regiones como el área que comprende las ciudades de Concordia (Argentina) y Salto (Uruguay).

El acuífero se encuentra aflorando en el área centro norte de Uruguay, existiendo un polo de explotación en el área limítrofe con Brasil, en las ciudades de Rivera (Uruguay) y Santa Ana do Livramento (Brasil).

Desde el punto de vista de su constitución geológica, pueden distinguirse dos grandes paquetes sedimentarios que conforman dos subsistemas hidrogeológicos distintos:

- Denominaremos SAG Típico al constituido por sedimentos y rocas sedimentarias asimilables a la Formación Tacuarembó (Jurásico) (Bossi *et al*, 1975 en Veroslavsky *et al* 2003) y a las formaciones Buena Vista (Ferrando & Andreis, 1986 en Veroslavsky *et al* 2003) y Yaguarí (Bossi, 1966) ambas de edad Pérmico superior. De forma general se puede caracterizar a las sedimentitas que constituyen el SAG típico por una sucesión de areniscas de origen continental (formación Tacuarembó), depositadas por sistemas fluviales y lacustres a las que se asocian varios episodios eólicos que se intercalan a lo largo de toda la sección; y sedimentos y rocas sedimentarias depositadas en ambiente transicional-continental (Yaguarí – Buena Vista). El espesor puede variar desde los pocos metros hasta más de 200 metros totalmente saturados de agua. Está representado entonces en la región aflorante de

Uruguay por la Formación Tacuarembó (Bossi *et al*, 1975 en Veroslavsky *et al* 2003) y las formaciones Buena Vista (Pérmico Superior).

- El otro paquete sedimentario, sobre el cual el SAG típico se apoya, será denominado SAG Pérmico, y está conformado por sedimentitas de edad Pérmico Inferior y Medio, de media a baja permeabilidad. Está constituido por sedimentos y rocas sedimentarias correspondientes a las formaciones San Gregorio (Pérmico Inferior), Tres Islas (Pérmico Medio) que han sido depositadas en ambientes marinos poco profundos y que, por su contenido variable en sales, condiciona la calidad del agua. De manera general, se puede establecer que el SAG típico se apoya sobre sedimentitas pérmicas de media a baja permeabilidad (SAG Pérmico) (figura 3) que han sido depositadas en ambientes marinos poco profundos y que, por su contenido variable en sales, condiciona la calidad del agua y define el segundo sistema hidrogeológico del área.

### 3. SAG CONFINADO

Las lavas confinantes corresponden a la Formación Arapey (Cretácico), compuesta por sucesivas coladas de basalto, en cantidad y espesor variables dentro del área mencionada, dependiendo de los pulsos efusivos, y de la distancia a los centros de emisión; se han llegado a identificar 26 coladas en la ciudad de Salto. La perforación de OSE (Salto) mostró un espesor de basaltos de 1021 m.

En la región de Salto y Concordia el SAG típico presenta su mayor desarrollo (figura 3) y se comporta hidrogeológicamente, por lo general, en forma independiente de las unidades hidrogeológicas de edad Pérmico. No se ha comprobado en esta área ninguna conexión entre ambos sistemas, aunque la región presenta una gran estructuración tectónica (lineamientos y fallas) que podrían ser la vía de conexión entre los dos sistemas acuíferos.

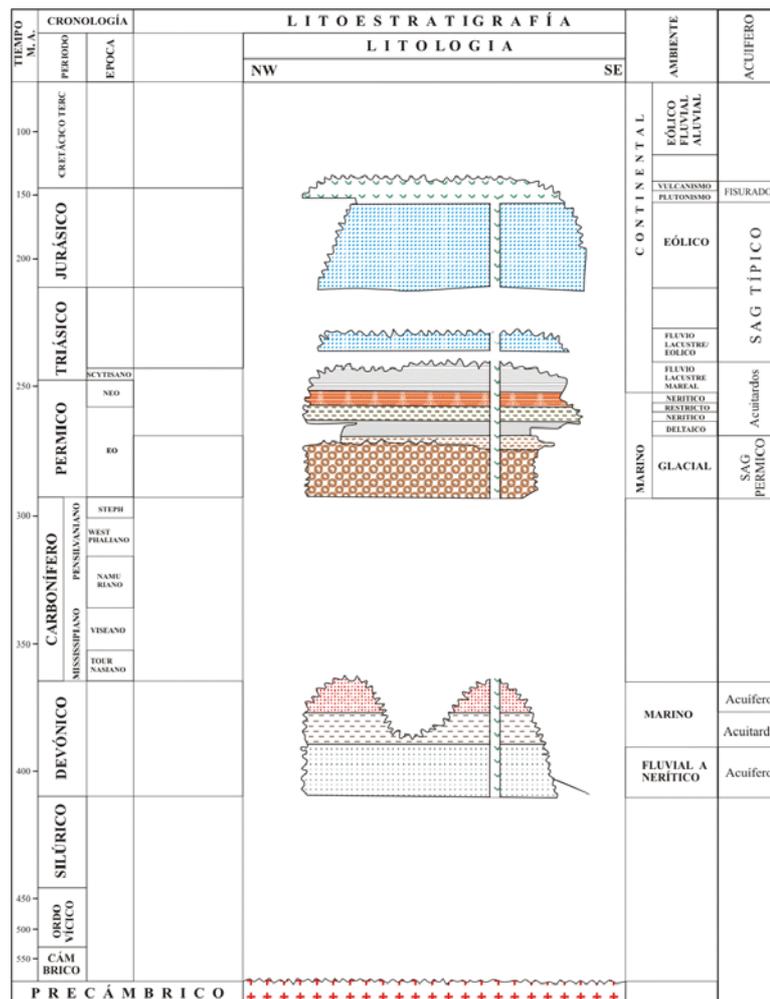


Figura 3. Columna Estratigráfica (Montaño et al 2002)

## 2.1. Perforaciones

Los pozos termales en el área Concordia - Salto presentan caudales de surgencia que oscilan entre los 20 a 300 m<sup>3</sup>/h. Se destaca que la mayoría de los pozos son utilizados para abastecimiento de centros turísticos termales. Como surge de la observación y comparación de perfiles de pozos, el espesor del techo basáltico del acuífero en el área es de aproximadamente 1000m.

## 2.2. Hidráulica de la zona confinada

En la tabla 1 se presentan algunos resultados de parámetros obtenidos en diferentes trabajos:

**Tabla 1.** Antecedentes de estimaciones de *T* y *S* para el SAG confinado

<i>Autor</i>	<i>Zona</i>	<i>Trasmisividad (T)</i> (m <sup>2</sup> /día)	<i>Coefficiente de almacenamiento (S)</i>
Tahal 1986	NW del Uruguay	1000	10 <sup>-4</sup>
IPT 1988	NW del Uruguay	363 –762	10 <sup>-4</sup>
Hidrosud 1988	NW del Uruguay	1500	10 <sup>-4</sup>
Montaño J <i>et al</i> 1998	NW del Uruguay	250 – 1500	10 <sup>-4</sup>
De los Santos 1999	NW del Uruguay	100	10 <sup>-4</sup>
Decoud & Rocha (2001)	Coincidente aproximadamente con el APCOSA	145 - 190	10 <sup>-5</sup> – 10 <sup>-4</sup>
Montaño J 2003 (en Veroslavsky <i>et al</i> 2003)	Coincidente aproximadamente con el APCOSA	150	10 <sup>-4</sup>
Oleaga & De los Santos 2003	Coincidente aproximadamente con el APCOSA	67 - 141	10 <sup>-5</sup> – 10 <sup>-4</sup>

La gran dispersión de valores de transmisividad observados se debe a que las determinaciones fueron realizadas en condiciones diferentes, los valores altos de los primeros antecedentes se corresponden a regímenes de surgencia mientras los valores menores son el resultado de ensayos bajo bombeo con depresiones significativas. En función de estas condiciones se entiende que estos últimos son los más representativos desde el punto de vista hidráulico fijando los valores de transmisividad para esta área entre 60 y 200 m<sup>2</sup>/d.

La diferencia de valores para iguales condiciones de ensayos hidráulicos indicarían variaciones tanto en la conductividad hidráulica como en los espesores portadores del SAG.

## 2.3. Hidrogeoquímica de la zona confinada

Según Montaño *et al.* (1998), las aguas del SAG Típico no presenta limitaciones de potabilidad, salvo que se mezclen con aguas del subsistema inferior. Las aguas se clasifican, según el diagrama de Piper, en bicarbonatadas sódicas para este sistema, con un valor medio de dureza total de 65 mg/l. Se observa mayor concentración de Na sobre el Ca (Na >> Ca) y en menor grado el ión bicarbonato sobre el ión Cloro (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > Cl<sup>-</sup>).

Decoud & Rocha (2001) realizaron estudios de 7 perforaciones profundas confinadas por el basalto en los departamentos de Salto y Paysandú (Uruguay) y en la provincia de Entre Ríos (Argentina), basados en una serie de análisis de agua de las perforaciones realizados en un período de 7 años. Estos autores distinguen dos grupos en función de la calidad química del agua:

Grupo 1: Arapey, Daymán, San Nicanor y Guaviyú: tipo bicarbonatadas sódicas

Grupo 2: Federación, Ose y Salto Grande (Horacio Quiroga): tipo bicarbonatadas sódica cloruradas

## 2.4. Hidrotermalismo y surgencia

El grado geotérmico de las aguas del SAG puede ser aprovechado para la implantación de establecimientos hidrotermales, amortiguación de heladas, secado de granos y madera, hospitales y establecimientos deportivos, calefacción de condominios, así como también para pelar y limpiar

cueros de animales e higienización de ambientes, natación y balneoterapia, acondicionamiento de aire, calefacción de invernaderos, calefacción de criaderos, irrigación y calefacción de suelos, cultivo de hongos, secado y deshidratación de diversos productos tales como vegetales y frutas. Hasta el momento, la utilización del agua termal del SAG se ha restringido casi exclusivamente al turismo, desaprovechando el resto de sus cualidades debido, principalmente, a la falta de una cultura de uso de este recurso.

### 2.4.1. Zona de surgencia

A partir del análisis de los datos de mapas piezométricos (Montaño et al 2002), resulta claramente una zona de surgencia. Del mismo se desprende un incremento de los niveles de surgencia de sur a norte y de este a oeste, alcanzando valores entre +35 y +40 entre Arapey (Salto) y Bella Unión (Artigas) en Uruguay y a la altura de Federación, al N de Concordia, en Argentina.

## 2.5. Superficies potenciométricas

En el mapa piezométrico (Montaño *et al*, 1998) se observa una dirección general de flujo de orientación este-oeste, siendo la región infrabasáltica coincidente con el tránsito hacia una zona de descarga que se encontraría en Argentina. El gradiente hidráulico medio en la zona aflorante tiene un valor de  $7 \times 10^{-4}$ , mientras que en el área confinada se tienen valores de  $2 \times 10^{-4}$  al N y  $6 \times 10^{-4}$  al S, lo cual coincide con el mayor espesor del Sistema Acuífero en la dirección NW.

## 3. ÁREA AFLORANTE

La zona aflorante abarca en Uruguay en un área de 3700 km<sup>2</sup> en una faja de dirección N-S con un largo de 160 Km. y un ancho medio de 35-40 Km., extendiéndose además hacia el NE en el territorio Brasileiro. Al interpretar hidrogeológicamente el subsuelo de la región se puede realizar la siguiente división (tabla 2):

**Tabla 2: División hidrogeológica del área aflorante**

Formación	Miembro	Litología	Capacidad del acuífero
Tacuarembó (Jurásico)	Superior (Rivera- Santa Ana do Livramento)	- areniscas finas a medias	Bueno
	Inferior (Área Tacuarembó)	- areniscas y pelitas	Regular

### 3.1. Área Rivera – Santa Ana

Se desarrolla el SAG con un predominio de sedimentos de origen eólico, presentando en esta zona los mayores espesores. La transmisividad (T) del acuífero en esta zona es del orden de 150 m<sup>2</sup>/día. El valor del coeficiente de almacenamiento S es 10<sup>-3</sup>, lo que puede indicar algún grado de semiconfinamiento del acuífero. Los valores del caudal específico (q), son del orden de 3 m<sup>3</sup>/h/m y los rendimientos de los pozos varían entre 50 y 110 m<sup>3</sup>/h. Desde el punto de vista hidroquímico las aguas se clasifican como cloruradas cálcicas.

### 3.2. Área Tacuarembó

El sistema que predomina en esta zona, situada en la región centro norte del Uruguay, es el acuífero Tacuarembó (Miembro Inferior), constituido por areniscas y pelitas de origen fluvial. La explotación del acuífero es baja debido fundamentalmente a su bajo potencial, debido al predominio de sedimentos finos. La profundidad media de los pozos en la zona es de 80m y un caudal medio de 3,5 m<sup>3</sup>/h. Los valores de transmisividad son del orden de 25 m<sup>2</sup>/día. La clase de agua en función de la composición química es bicarbonatada cálcica.

### 3.4. Hidrogeoquímica del área aflorante

Según Montaña et al (1998) se puede establecer que la calidad de las aguas tanto para la unidad Rivera – Santa Ana como para la unidad Tacuarembó no presenta limitaciones de potabilidad. Esta agua se clasifican como cloruradas cálcicas y bicarbonatadas cálcicas, según el diagrama de Piper.

Se destaca la mayor concentración de Ca frente al Na y en algunos casos valores de Mg semejantes o superiores al Na ( $Ca > Na - Mg$ ). Estos valores, relativamente elevados del Ca, se deben posiblemente a la naturaleza de la cementación de la unidad hidrogeológica Tacuarembó, que es ocasionalmente calcárea. No se encontraron valores de Fe, Mn, F que pudieran comprometer la utilización del acuífero.

Decoud & Rocha (2001) clasifican las aguas del acuífero en el área aflorante dentro del tipo bicarbonatadas cálcicas sódicas. Pérez et al (2001) establecen que las aguas se presentan como bicarbonatadas cálcicas en todas las perforaciones del área, tanto confinada por basaltos como aflorantes. El ión  $Ca > Na$ , y el  $HCO_3 \gg \gg Cl$ .

## 4. CONCLUSIONES

Existe una gran variedad respecto a la geometría y composición del SAG tanto en la zona aflorante como confinada, que tiene incidencia en las características hidráulicas y en la calidad de las aguas subterráneas.

En la zona aflorante predominan hacia el N (Rivera – Santa Ana) los sedimentos de mayor macroporosidad con valores de transmisividad de  $155m^2/día$ , caudales específicos de  $3 m^3/h/m$  y caudales de 50 a  $110 m^3/h$ . En el área Tacuarembó se desarrollan acuíferos con predominancia de litologías de limoarenosas con valores relativamente más bajos de transmisividad  $25m^2/día$ , caudales medios de  $3,5m^3/h$  que cubren la demanda de pequeños tambos y casas individuales con áreas reducidas de riego. El agua es bicarbonatada cálcica o sódica. El valor medio de la dureza total expresada en  $CaCO_3$  es  $45 mg/l$  y de residuo seco es de  $120 mg/l$ .

En la zona confinada las variaciones en el comportamiento del SAG se debe principalmente a la incidencia de fenómenos tectónicos en la geometría del mismo. La presencia de fallas, filones diabásicos, levantamientos, etc compartimentan el sistema y condicionan el almacenamiento y circulación del agua subterránea marcando la gran heterogeneidad del sistema.

Esta situación es detectada en un área muy particular por su estructura al ser borde de una cuenca sedimentaria; influyendo en la heterogeneidad de los cuerpos permeables que constituyen el SAG. Estas características determinan una gama de variaciones en las características hidráulicas que se reflejan en la transmisividad con valores  $150$  a  $250 m^2/día$  en la zona confinada. También existe una gran variedad de tipos de agua desde potables bicarbonatadas cálcicas a sódicas hasta clorurada sódicas, estas últimas influenciadas por el acuífero pérmico

Existe una gran variación en el caudal de surgencia de los distintos pozos, presentando valores que van desde  $30$  a  $340 m^3/h$ .

Estos resultados demuestran que el SAG no constituye un sistema homogéneo y la pseudo homogeneidad que se presenta en muchas publicaciones se debe simplemente a zonas con falta de datos o estudios detallados.

## BIBLIOGRAFÍA

- Araujo LM, Franca AB & Potter PE (1999): *Hydrogeology of the Mercosul aquifer system in the Parana and Chaco-Parana Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget aquifer system*. USA. Hydrology Journal 7: 317-336.
- *Arrangement on the Protection, Utilization and Recharge of the Franco-Swiss Genevese Aquifer* (1997).
- Bossi J, Navarro R (1991): *Geología del Uruguay*. Departamento de Publicaciones, Universidad de la República, Montevideo, 970pp
- Da Rosa Filho EF, Forlin M, Montaña J (1998): *Informacoes básicas sobre distribuicao do Sistema Aqüífero Guarany nas regioes Sul e Sudeste do Brasil*. A agua em Revista (Revista da CPRM, Servicio Geológico do Brasil) 10:22-26.

- Da Rosa Filho E F; Hindi E; Giusti D; Nadal C; Montaña J (2001): *Distribuição do Geotermalismo na Bacia Sedimentar Do Paraná*. Revista Latinoamericana de Hidrogeología v1, n1. Pp: 67-74.
- Decoud P & Rocha L (2001): *Aportes de la hidráulica subterránea del Acuífero Guaraní en el NO del Uruguay*.
- HIDROSUD. (1988). *Desarrollo turístico de la actividad termal en el litoral del Uruguay*. Trabajo de Consultoría. Montevideo-Uruguay. 1988.
- Montaña J, Carrión R : *Optimización de la Explotación del Sistema Acuífero Triásico Jurásico Tacuarembó-Buena Vista*.
- Montaña J & Collazo P (1996): *Vulnerabilidad del techo del Sistema Acuífero Guaraní en la Cuenca Norte del Uruguay*. 9º Congreso Brasileiro de Aguas Subterráneas. Salvador , Brasil.
- Montaña J & Collazo P (1998): *Hidrogeoquímica del Sistema Acuífero Guaraní (Uruguay)*. II Congreso Uruguayo de Geología pp.395- 400, Punta del Este.Uruguay.
- Montaña J, Ernani F, Hindi E, Cicalese H, Montaña M, Gagliardi S (2002): *Importancia de las Estructuras Geológicas en el Modelo Conceptual del Sistema Acuífero Guaraní Área Uruguaya*. Revista da Associacao Brasileira de Aguas Subterráneas Numero 16. Pp 111 a 119.
- Montaña J, Tujchneider O, Auge M, Fili M, Paris M y D'Elia M, Pérez M, Nagy M, Collazo P, Decoud P (1998) : *Sistema Acuífero Guaraní-Acuíferos Regionales en América Latina-Capítulo Argentino Uruguayo*. Centro de Publicaciones, Secretaría de Extensión Nacional del Litoral. Santa Fé, Argentina, 217 p.
- Pérez A, Rocha L, Decoud P & Carvajal A (2001): *Comportamiento del Acuífero Guaraní en la Ciudad de Artigas, Uruguay*.
- Tahal (1986): *Proyecto agrícola de Riego basado en la perforación de pozos profundos*. Tahal Consulting Engineers, Verno-ROU, 8 tomos.
- Veroslavsky G; Ubilla M; Martínez S; de Santa Ana H; Goso C; Montaña J; Muzio R; Perea D; Piñeiro G; Rossello E & Ucha N (2003): *Cuencas Sedimentarias de Uruguay. Geología, paleontología y recursos naturales. Mesozoico*. DIRAC, Montevideo, Uruguay. 214pp.