

Consideraciones geológicas y paleontológicas sobre el contacto de las formaciones Tatuí e Iratí (Pérmico), Cuenca de Paraná, Brasil

Geologic and Paleontologic Considerations on the Contact of Tatuí and Irati Formations (Permian), Paraná Basin, Brazil.

Artur Chahud^{1*}, Johanna Méndez Duque¹ & Setembrino Petri¹

¹ Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental. Rua do Lago, 562. Cidade Universitária 05508-080 - São Paulo, SP – Brasil. arturchahud@yahoo.com, johanamendezduque@gmail.com, spetri@usp.br

* Corresponding author. Rua Prates, 583, apto 14. Bairro Bom Retiro. São Paulo. SP - Brasil. CEP: 01121-000. Tel. residencial (11) 3227-3689. Tel. celular. (11) 9859-6400. arturchahud@yahoo.com

Chaud, Artur; Méndez Duque, Johanna & Petri, Setembrino (2010): Consideraciones geológicas y paleontológicas de las formaciones Tatuí e Iratí (Pérmico), Cuenca de Paraná, Brasil [*Geologic and paleontologic considerations on the contact of Tatuí and Irati formations (Permian), Parana Basin, Brazil*]. Geología Colombiana, Vol. 35, pp 36-49. Bogotá, Colombia.

Artículo de Investigación Científica Manuscrito recibido: 23 de mayo de 2010; aceptado: 1 de diciembre de 2010

Resumen

La Cuenca de Paraná está situada en el centro – oriente de América del Sur. Los sedimentos neopaleozoicos presentes al norte de la cuenca, en el Estado de São Paulo (Brasil), comprenden de base a tope las unidades litoestratigráficas: Itararé, Tatuí, Iratí y Corumbataí. La Formación Iratí es subdividida en dos miembros, Taquaral en la base y Assistência en el tope. El presente trabajo trata los afloramientos del centro este del Estado de São Paulo, del tope de la Formación Tatuí al Miembro Taquaral. La Formación Tatuí es exclusiva del Estado de São Paulo, parcialmente coetánea a las formaciones Palermo y Río Bonito de los Estados del sur de Brasil, formaciones litológicamente diferenciables. El Miembro Taquaral tiene un desarrollo más completo en el Estado de São Paulo. La litología de ambas unidades es aquí discutida. Los diferentes fósiles corresponden a restos de vertebrados, básicamente peces, crustáceos e icnofósiles, encontrados en los estratos más superiores de la Formación Tatuí, en el contacto del Miembro Taquaral.

Palabras clave: Tatuí – Taquaral, litofacies, peces, condrictios, crustáceos, icnofósiles.

Abstract (Extended)

The Paraná Basin is located in the central – east part of South America. The thickest lithostratigraphic units of this basin were formed in the Late Palaeozoic. The neopalaeozoic sediments in the north of the river basin, in the State of São Paulo (Brazil), include from the base to the top the following lithostratigraphic units: Itararé, Tatuí, Irati (two members, Taquaral and Assistência) and Corumbataí. The Tatuí Formation is recognized only in the São Paulo State.

The lithologies of the Tatuí Formation, in the studied area, are grouped into three facies: a) Hummocky fine sandstones, b) a varied lithology of sandstones, massive or thinly laminated, and siltstones and c) sandstones with ichnofossils. Two facies make up the Taquaral Member, the sandy one mostly located on the base of the unit and

the shale facies. An unconformity separates the Tatuí from the Taquaral sandy facies. The sandy facies is more common in outcrops even though the shale facies is thicker. The sandy facies is a high-energy transgressive lag, covering the Tatuí upper most beds. The lower energy deposits of the shale facies are overlain by the Assistência Member of the Iratí Formation. In this paper, the ichnofossils from the uppermost bed of the Tatuí Formation, are reported for the first time. They are generated in a subaerial palaeoenvironment, attending the beginning of the Taquaral deposition. The main fossils from the Taquaral Member sandy facies are vertebrates; most of them bone fishes and Chondrichthyes (sharks and other cartilaginous fishes). The crustacean *Clarkecaris* is the most characteristic fish of the Taquaral shale facies, some partly fossilized, few of them almost complete. Bonefishes are the only vertebrates found in this facies. No Chondrichthyes were recovered.

Key words: Tatuí – Taquaral, lithofacies, fishes, Chondrichthyes, crustaceans, ichnofossils

Introducción

La región centro oriente del Estado de São Paulo, región suroriente de Brasil, expone prácticamente toda la sección mesozoica del borde noreste de la Cuenca de Paraná, comenzando con las unidades neopaleozoicas del Grupo Tubarão (Subgrupo Itararé y Formación Tatuí), pasando por el Grupo Passa Dois (formaciones Iratí y Corumbataí), y terminando con las formaciones mesozoicas del Grupo São Bento que comprende las Formaciones Pirambóia, Botucatu y Serra Geral (Milani *et al.*, 2007).

La Formación Tatuí, exclusiva del Estado de São Paulo, está formada por sucesiones de arcillolitas y areniscas de tamaño fino bien seleccionadas, localmente macizas o con estructuras tipo hummockies. Entre estos estratos se encuentran niveles conglomeráticos de origen fluvio-deltaico (Stevaux *et al.*, 1986; Assine *et al.*, 2003). La Formación Tatuí es correlacionable con las formaciones Río Bonito y Palermo en la región sur de Brasil y la Formación Príncipe Albert en África del Sur.

Sobre la Formación Tatuí yacen discordantemente sedimentos relativamente gruesos de la parte basal del Miembro Taquaral (areniscas con gránulos y areniscas conglomeráticas), constituyendo el Miembro Inferior de la Formación Iratí, y que contiene abundantes dientes y otros restos de vertebrados. La mayor parte del Miembro Taquaral está constituida por shales limo-arcillosos, gris oscuros, no bituminosos, con cristales de pirita diseminados y laminación plano paralela. En algunos casos la laminación es tan fina que no permite su identificación.

El conocimiento paleontológico de la Formación Tatuí es muy reducido e incluye descripciones de crustáceos y citas de fósiles vegetales, conchostráceos y microfósiles, todos en niveles intermediarios de la unidad. No se tienen reportes de estudios paleontológicos para el tope de la formación. El Miembro Taquaral, al contrario de la Formación Tatuí, presenta una gran cantidad de fósiles de vertebrados (Chahud & Petri, 2008a, 2008b, 2010; Chahud *et al.*, 2010; Holz *et al.*, 2010) y crustáceos (Mezzalira, 1952).

El objetivo de esta contribución es la divulgación de la variación litológica del contacto de las formaciones Tatuí e Iratí y las consideraciones fosilíferas.

Materiales y Métodos

El estudio fue realizado en afloramientos entre los municipios de Río Claro, Ipeúna (figs. 1 y 2), y en un único punto en la región del municipio de Piracicaba, mostrando el contacto entre las formaciones Tatuí e Iratí. Fueron procesadas imágenes digitales tomadas con Omega Megascan – ACCU 6000 Scanner (Máquina fotográfica análoga SONY 3CCD), en un analizador de imagen LEICA del laboratorio de Petrografía Sedimentaria del Instituto de Geociencias de la Universidad de São Paulo (IGc-USP). Para el tratamiento de imágenes y figuras se utilizaron paquetes de edición de imagen como Corel Draw 12, MGI y Photo Suite. Todos los especímenes están registrados y depositados en la colección fósil del Laboratorio de Paleontología Sistemática (LPS) del IGc-USP.

Litotipos al tope de la Formación Tatuí

La Formación Tatuí se caracteriza por dos paquetes separados por las coloraciones dominantes de sus facies (Soares, 1972). La parte basal de la unidad está constituida de limolitas marrón violáceas oscuras (algunas veces blancas), con estratificación fina a espesa, raramente laminada. El segundo paquete (tope) está constituido de limolitas y areniscas de tamaño fino, de colores gris verdoso y amarillo verdoso. En la parte inferior de esta

capa se observan areniscas de tamaño medio a grueso, subredondeadas, con estratificación cruzada acanalada y marcas onduladas asociadas y areniscas de tamaño fino con estratificación plano paralela. También se presentan capas con clastos de sílex, angulosos a redondeados (Stevaux *et al.*, 1986).

En la región centro oriente del Estado de São Paulo, la Formación Iratí se presenta en forma variada, con tres tipos de contactos y constituciones sedimentológicas.

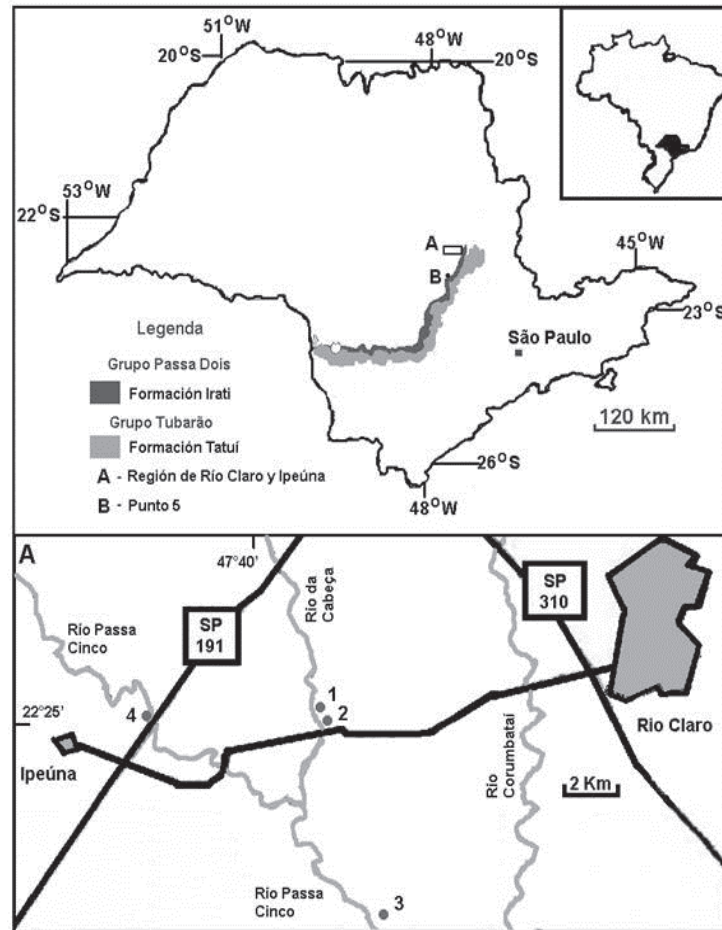


Figura 1. Faja de afloramientos de las formaciones Tatuí e Iratí en el Estado de São Paulo. A) Región de Río Claro e Ipeúna, localización de cuatro puntos estudiados, B) Punto 5 al sur de la región de Piracicaba

Figure 1. Outcrop belt of Tatuí and Iratí Formations in the State of São Paulo. A) Rio Claro and Ipeúna region with four studied points, B) Point 5 in the south of the Piracicaba region

Areniscas de tamaño fino con hummockies

Las capas de areniscas de tamaño fino con hummockies fueron las más comunes en los afloramientos estudiados. Generalmente representan una capa de arenisca fina a muy fina, con buena selección granulométrica y coloración amarilla blanqueada o verdosa. Está directamente en contacto con la Formación Iratí en los afloramientos de Río da Cabeça punto 2 (Fig.1) y de la

Carretera de Açúcar punto 5 (Fig.1), por lo tanto no está en contacto directo en el afloramiento de la Hacienda Santa María punto 1 (Fig. 2). El espesor es menor a 2 m, bien visible en el afloramiento de la Carretera de Açúcar. Las estructuras sedimentarias son caracterizadas por estratificación cruzada de tipo hummocky, alcanzando 0,5 m de tamaño. En el tope de este litotipo aparecen pequeñas marcas onduladas paralelas, aparentemente

simétricas, con crestas orientadas N20°E y amplitud menor a 0,5 cm. La capa, aparentemente fosilífera, exhibe nodulación incipiente con aspecto de pequeñas manchas en núcleos mayores.

Areniscas y limolitas macizas a finamente laminadas

Fueron observadas en los afloramientos de la Carretera Irineu Penteadó Punto 4 (Fig. 2) y en las proximidades del Río Passa Cinco Punto 3 (Fig. 2). Esta unidad está constituida principalmente por areniscas finas a limolitas, de coloración beige blanqueada y de muy buena selección granulométrica. La capa es generalmente maciza, con algunas porciones con laminación plano paralela o laminaciones cruzadas. Localmente la granulometría de la arenisca aumenta, pero esta variación es irregular y no excede la de arenisca fina. Hay pocos fósiles y se encuentran dispersos, solamente es posible verlos en muestras alteradas en el punto 3 (Fig. 2).

El contacto con la capa subyacente de la Formación Iratí es marcado por intercalaciones de capas de areniscas

gruesas, típicas de la facies basal arenosa del Miembro Taquaral, o el contacto es abrupto con las limolitas de la Formación Iratí.

Areniscas de tamaño fino con icnofósiles

Este litotipo es una capa sub-horizontal, caracterizada por areniscas muy finas de color blanco y localmente amarilla clara (posible alteración de nódulos de pirita), con espesor de 8 cm aproximadamente, variando de finamente laminada a maciza con muy buena selección granulométrica.

La característica más importante es la presencia de icnofósiles tubulares irregulares (Fig. 3) localizados al tope, los cuales han sido llenados con sedimentos más gruesos de coloración gris, con bioclastos de la capa suprayacente. La longitud de los tubos alcanza 4 cm, lo que equivale a la mitad del espesor total de la capa. El contacto con la capa subyacente es concordante y gradual; y el contacto con la capa superior (Miembro Taquaral) está marcado por una discordancia erosiva (Figs. 2 y 3).

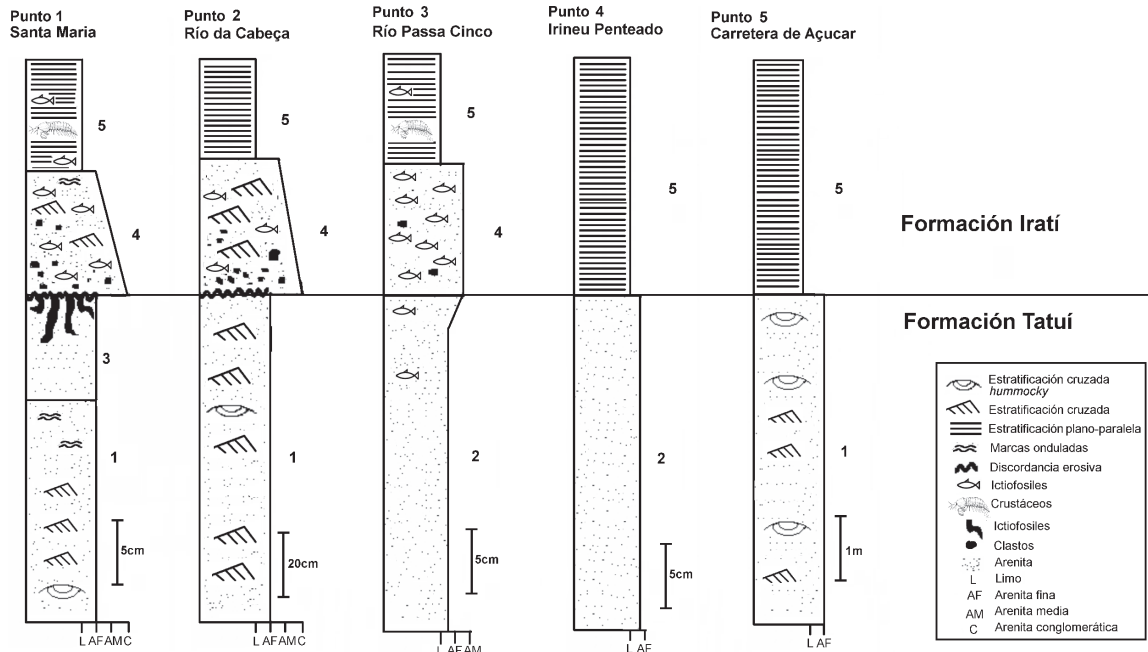


Figura 2. Secciones estratigráficas de todos los afloramientos estudiados. Formación Tatuí: 1) Areniscas finas con “hummockies”; 2) Areniscas y limolitas macizas o finamente laminadas; 3) Areniscas finas con icnofósiles; Formación Iratí, Miembro Taquaral 4) Facies arenosa; 5) Facies shale

Figure 2. Stratigraphic sections of all studied outcrops. Tatuí Formation: 1) Hummocky fine sandstones, 2) Massive or thinly laminated sandstone and siltstone, 3) Sandstones with ichnofossils; Iratí Formation, Taquaral Member; 4) Sandy facies, 5) shale facies

Paleontología del tope de la Formación Tatuí

Ichnofósiles de la Hacienda Santa María

Diversas perforaciones biogénicas se encuentran en la Hacienda Santa María por debajo del Miembro Taquaral. Los icnolitos observados al tope de la Formación Tatuí poseen forma alargada asimétrica, con variaciones de ancho, longitud y ramificaciones (Fig. 3) o pueden estar alejados. Los icnofósiles se desarrollan en la arenisca blanca del tope de la Formación Tatuí, en el afloramiento de la Hacienda Santa María, y los mayores alcanzan 4 cm de longitud.

En general, no se observó ninguna inclinación o dirección preferencial de los icnofósiles, aunque la mayoría presentaba inclinación entre 10° y 80°, en algunos casos los ángulos son muy pequeños, casi paralelos a la capa suprayacente. Un factor importante

es la disposición irregular de la capa suprayacente de la base de la Formación Iratí.

A partir del tubo principal es posible observar unas continuaciones laterales irregulares sin forma definida (Fig. 3C), algunas con pocos milímetros, otras iguales o mayores a 1 cm. Estas estructuras pueden presentar prolongaciones secundarias también irregulares. En algunos casos se presentan icnofósiles paralelos e inclinados de la misma forma, siguiendo una dirección determinada por la corriente que formó el depósito de la capa suprayacente (Figs. 3C y 3D).

Las extremidades de los tubos aparentemente son irregulares (Figs. 3A y 3B), con mayor o menor achatamiento, pero puede ser una forma aparente ya que no se conocen las extremidades. El llenado de los icnolitos por la capa suprayacente contiene comúnmente ictiofósiles, lo que es una característica común. Los fósiles mayores que llenan esas estructuras son escamas sin dirección preferencial.

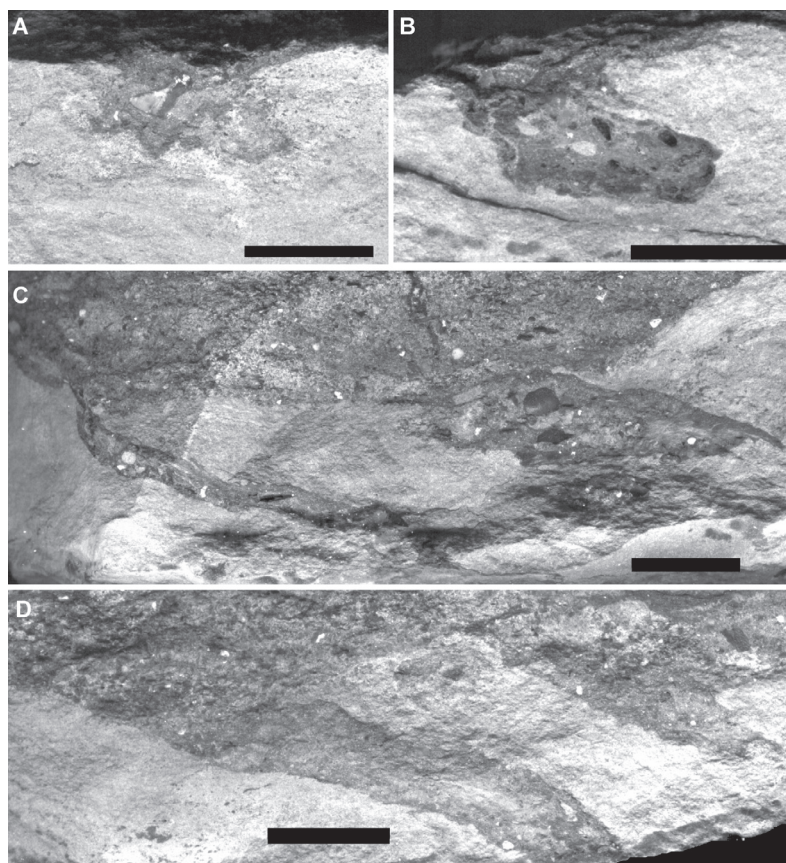


Figura 3. Icnofósiles encontrados en la Hacienda Santa María. A y B) Ejemplares llenados que contienen ictiolitos (GP7E/349b y GP7E/351a). C-D) Icnofósiles orientados (GP7E/350a y GP7E/349a), escala 10 mm
Figure 3. Trace fossils found at Santa Maria Hacienda. A-B) filled specimens containing ichthyoliths (GP7E/349b and GP7E/351a). C-D) Oriented ichnofossils (GP7E/350a y GP7E/349a), scale 10 mm

Discusión

Los icnolitos observados en la Hacienda Santa María son raros, y estas mismas estructuras no fueron encontradas en los otros puntos en las capas del tope de la Formación Tatuí. En el centro-orientado del Estado de São Paulo ninguno de los icnolitos descritos por Netto (2000) y Fernandes *et al.* (2002) en las formaciones Río Bonito y Palermo, muestran características semejantes a las de la Hacienda Santa María, sin embargo algunos son comparables en ciertos aspectos.

El icnogénero *Skolithos* es semejante en longitud, en promedio mayor que el ancho, pero son estructuras simples y verticales diferentes al icnofósil observado.

El icnogénero *Arenicolites* como los ejemplares observados están constituidos de tubos encurvados que se desarrollan en areniscas finas, pero su desarrollo es bastante característico, en forma de “U” y sus paredes son regulares y perpendiculares a la estratificación. De acuerdo con Netto (2000) esas estructuras también pueden tener forma de embudo, que también difieren de los ejemplares encontrados.

La estructura de reposo *Conichnus* se asemeja a formas menores de icnolitos encontrados y también por ser una estructura normalmente separada, pero una forma cónica y perpendicular de *Conichnus* elimina la posibilidad de que el icnofósil de la Hacienda Santa María represente este icnogénero.

Cylindrichus son estructuras cónicas encorvadas como algunos ejemplares menores, pero *Cylindrichus* posee estructuras internas que eliminan la posibilidad de pertenecer a este icnogénero.

El icnogénero *Ophiomorpha*, reconocido en las formaciones Río Bonito y Palermo (Netto, 2000), presentó semejanzas por poseer un sistema de excavaciones tridimensionales, simples o complejas, con túneles cilíndricos verticales y horizontales, con ramificaciones dicotómicas y diámetros variables formando ángulos agudos. Sin embargo, la estructura interna característica, las paredes bien delineadas y la presencia de pelotas de sedimento aglutinado a lo largo de la excavación, difieren del icnolito observado.

Los ejemplares de la Hacienda Santa María también poseen paredes irregulares, pero sin estructura definida.

El icnogénero *Thalassinoides* posee ramificaciones de tercer orden, pero en *Thalassinoides*, las ramificaciones de primer y segundo orden poseen el mismo tamaño, mientras que los fósiles de la Hacienda Santa María ocurren en un tubo principal seguido de ramificaciones menores.

El icnolito *Psilonichnus* común en el Mesozoico y Cenozoico, no es observado en Brasil, fue el icnofósil que más se aproximó a la descripción del icnolito de la Hacienda Santa María.

Según Nesbitt & Campbell (2006), el género *Psilonichnus* está constituido de una cavidad vertical cilíndrica simple en forma de “Y”, con las ramas comunes en el tope y con una longitud de 3 a 5 cm, algunos tubos pueden llegar a 2 m. Fürsich (1981), Frey *et al.* (1984) y Gingras *et al.* (2000) observaron que algunas especies del icnogénero *Psilonichnus*, pueden presentar forma de “J”, como las formas observadas en *Psilonichnus tubiformis* y *Psilonichnus epsilon*, pudiendo estar el tubo principal inclinado. Las dos características pueden ser vistas en algunos ejemplares de la Hacienda Santa María (Figs. 3B y 3C). Las diferencias de *Psilonichnus* y la especie aquí descrita, son debidas al origen, pues este icnogénero estaría asociado con crustáceos decápodos, más comunes en el Mesozoico y Cenozoico, más allá de que las estructuras en forma de “Y” y “J” no sean perfectas en los ejemplares encontrados de la Hacienda Santa María.

Lo más probable es que el icnofósil encontrado pertenezca a otro género de características similares a *Psilonichnus*. *Psilonichnus* también es una icnofacies de origen costera marginal, en la zona playera de dunas terrestre o con influencia fluvial (Nesbitt & Campbell, 2006), lo que estaría de acuerdo con la evolución de la capa suprayacente, base arenosa del Miembro Taquaral de la Formación Iratí (Chahud, 2007).

Todavía son necesarios mayores datos y ejemplares más completos, probablemente el icnolito sea de origen similar a los encontrados en la icnofacies *Psilonichnus* y su formación se debe a los crustáceos que vivieron durante la depositación de la Formación Tatuí y la base de la Formación Iratí (Mezzalana & Martins, 1992).

Los fósiles inclinados que siguen una orientación, podrían ser resultado de acciones de corrientes durante la depositación de la capa infrayacente. Tales estructuras serían resultantes de la fuga de sus constructores, debido a la nueva sedimentación que se deposita encima.

Formación Iratí

La Formación Iratí es dividida en dos miembros: Taquaral y Asistencia. La unidad del tope es el Miembro Asistencia, y también es el más conocido de la Formación Iratí por los Mesosauridae, que son reptiles de gran importancia para correlaciones de Gondwana en África y América del Sur.

El Miembro Taquaral no posee subdivisiones claras en el contexto de la cuenca de Paraná. Según Hachiro (1991, 1997) el Miembro Taquaral es dividido en dos facies en el Estado de São Paulo; la primera facies basal está constituida por areniscas finas y gruesas y areniscas conglomeráticas con fósiles, y la segunda, que predomina en la unidad, está compuesta por shales limo-arcillosos, también fosilíferos, sin embargo con menor densidad.

Litotipos del Miembro Taquaral

Facies arenosa

La facies arenosa del Miembro Taquaral es conocida desde los tiempos de Washburne (1930), pero su posición estratigráfica siempre fue motivo de discusión, principalmente en las décadas de 1970 y 1980. Soares (1972) colocó esta facies como el tope de la Formación Tatuí, correlacionándola como los Conglomerados Ibicatú. En la década de 1990 y en los primeros años del siglo XXI, la unidad volvió a ser objeto de estudios sedimentológicos y estratigráficos, los cuales no siguieron la posición estratigráfica de Soares (1972). Los primeros trabajos fueron de Hachiro (1991, 1997), quien consideró la unidad como parte de la evolución de la Formación Iratí, siguiendo la evolución estratigráfica.

Riccomini *et al.* (1997) fueron más allá y describieron un afloramiento en el que fue posible observar la unidad dentro de la facies shale limoso del Miembro Taquaral en la región centro oriente de São Paulo, reforzando la hipótesis de Hachiro (1997). Assine *et al.* (1999, 2003) y Chahud (2007) reforzaron la confirmación de la unidad como base del Miembro Taquaral, caracterizándola como un depósito residual perteneciente a la Formación Iratí.

El segundo litotipo está constituido por areniscas de tamaño fino, bien seleccionadas, con pocos clastos, generalmente macizas, pero que pueden presentar laminación plano-paralela levemente ondulada y discontinua. Los clastos son muy pequeños (< 1 cm

de longitud) y angulosos, constituidos normalmente de granos de cuarzo y fragmentos de roca de coloración oscura.

En el centro oriente de São Paulo fueron observados vertebrados fósiles, siendo la más fosilífera del presente estudio, y hasta el momento, es la más importante por la gran diversidad de grupos y especies. En los afloramientos estudiados fueron observados los dos litotipos identificados por Hachiro (1997) y Chahud (2007).

Litotipo cuarzo – arenisca conglomerática

Este litotipo observado en los puntos 1 (Hacienda Santa María) y 2 (Río de la Cabeça, Fig. 2), está constituido por areniscas de tamaño fino a medio, conglomeráticas, con gránulos y pequeños clastos en la base. Los clastos pueden ser de origen biogénico, coprolitos, dientes y escamas.

Presenta estratificación cruzada irregular, con sentido de la corriente variado, sin preferencias y granodecrecimiento ascendente. El contacto con la facies shale limo-arcilloso es abrupto. Se observaron en este litotipo láminas milimétricas limolíticas, gris oscuras intercalándose con areniscas de tamaño fino. También se presentan nódulos de pirita, con formas esféricas a ovaladas, de diversos tamaños, algunos con varios centímetros.

A pesar de que la constitución sedimentológica es idéntica en los dos puntos, su espesor es diferente, en la Hacienda Santa María es de 9,5 cm, y en el afloramiento del Río de la Cabeça es de 43 cm.

Litotipo arenisca de tamaño fino con pocos clastos

Fue observado en el punto 3 (Afloramiento del Río Passa Cinco, Fig. 2) y está constituido por areniscas de tamaño fino a medio, de color crema, con aproximadamente 8 cm de espesor, con laminación fina ondulada a veces maciza y buena selección granulométrica. Se observaron pocos clastos de sílex angulosos diseminados en el sedimento. El afloramiento contiene la mayor cantidad de bioclastos, pero todos fragmentados.

El contacto entre las unidades es gradual y se caracteriza por un ligero aumento de la granulometría y la aparición de gran cantidad de fósiles de vertebrados típicos de la

facies arenosa. Se presentan también intercalaciones de láminas finas (≤ 1 cm), limolíticas o de areniscas de tamaño fino del tope de la Formación Tatuí, caracterizando el contacto gradacional. El contacto con la capa suprayacente es abrupto, con súbito apareamiento de sedimentos de la facies limo-arcillosa.

Facies de shales limo-arcillosos

Esta facies fue la única observada en todos los afloramientos estudiados. Se trata de un paquete homogéneo, plano, limo-arcilloso y de coloración gris oscuro, cuando está fresco y rojo cuando está alterado. Los afloramientos de la Hacienda Santa María (Punto 1) y de la Carretera de Açucar (Punto 5), representan la mayor área expuesta con 4 m de espesor. Posee estratificación plano paralela horizontal y continua (shale) sin deformaciones por actividad tectónica. Se presentan pequeños nódulos de pirita de pocos milímetros dispersos en el sedimento.

En el punto 1 se presentan fósiles dispersos y raros, normalmente compuestos por escamas, dientes de peces y fragmentos de crustáceos, situados en el shale gris limo-arcilloso muy alterado.

Paleontología del Miembro Taquaral

Paleontología de la facies arenosa

La paleontología de la facies arenosa es más abundante y diversificada en comparación a los otros depósitos. Fueron citados en la literatura foraminíferos aglutinantes, espículas de esponjas, acritarcos y ostrácodos (Almeida & Barbosa, 1953; Cabral Jr. *et al.*, 1988; y Marasco *et al.*, 1993), pero no fueron ilustrados o descritos. En el presente estudio los vertebrados fueron los únicos fósiles observados y están constituidos principalmente por peces óseos (Palaeonisciformes y Coelacanthiformes) y de Chondrichthyes.

Los Chondrichthyes (peces cartilagosos) fueron observados apenas en la facies arenosa del Miembro Taquaral, presentando una gran diversidad y abundancia. Son conocidos en la Cuenca de Paraná desde el Eopermiano de la facies Budó del Subgrupo Itararé de Río Grande del Sur, con un diente cladodonte (Barcellos, 1975).

Los fósiles más abundantes en el depósito pertenecen a los petalodontes. Representan un grupo importante de

Chondrichthyes de clasificación incierta, exclusivos del Carbonífero y Pérmico, cuyos restos son encontrados normalmente en depósitos marinos. Aunque son comunes en el registro fósil, pocos son los ejemplares que permitieron análisis anatómico más detallado de la morfología corporal, porque muchas especies son conocidas exclusivamente por dientes aislados.

Itapyrodus punctatus (Silva, 1990; Chahud & Petri, 2008a; Chahud *et al.*, 2010) es la especie más común encontrada en la facies arenosa del Miembro Taquaral. Esta especie es conocida por los dientes sinfisianos y laterales posteriores (Figs. 4 A – C). Los dientes sinfisianos poseen corona alta (Fig. 4C), son elongados longitudinalmente (sentido anterior – posterior), mas comprimida transversalmente (sentido labial – lingual), formando una cresta longitudinal aguda con inclinación para la cara lingual. La relación de ancho de las caras lingual – labial varía, la cara lingual puede ser mayor o menor dependiendo de la región del diente que ocupaba la boca del animal. El ángulo formado entre las caras es uno de los principales criterios para distinguir dientes sinfisianos, pues siempre es un ángulo agudo. En los dientes sinfisianos, la base tiene dos lóbulos, es casi plana y presenta una concavidad suave.

Los dientes laterales posteriores (Figs. 4 A –B) son identificables por la corona baja y larga, con una superficie convexa o aplanada en la cara labial y ligeramente cóncava en la cara lingual. La cara lingual en estos dientes siempre es mucho menor que la cara labial (mitad del tamaño). El ángulo formado entre las caras labial y lingual es en general obtuso, aunque se pueden presentar ejemplares que tienen un ángulo recto entre estas caras.

La margen superior de la corona exhibe una pequeña curvatura, pero no forma una cresta longitudinal. Las extremidades laterales de la corona son diferenciadas: en un lado son arredondeadas y el otro lado es anguloso o recto, sin inclinación.

Al principio los petalodontiformes del Miembro Taquaral (Silva, 1990; Chahud *et al.*, 2010) habían sido identificados apenas como pertenecientes a la especie *Itapyrodus punctatus*, pero recientemente fue observado que existen variaciones en las formas de los dientes que son atribuidas a esta especie y que muchos de esos dientes

podrían pertenecer a otras especies menos comunes de Chondrichthyes, no necesariamente Petalodontiformes.

El nuevo ejemplar (Fig. 4D) posee una base con los lóbulos, fuertemente cóncava y crenulada, que estaría relacionada a la articulación. La corona es muy ancha y alta, marcada por una cresta longitudinal que acompaña toda la región central, tiene una forma de “A”, con una de las laterales menor e inclinada. La cara labial es convexa y la lingual es cóncava, con buena parte de la dentina tubular expuesta. Es un ejemplar grande comparado a los otros dientes de Chondrichthyes, con una base de 15,5mm de altura, 12,5mm de largo y una distancia máxima entre las caras lingual – labial de 9,8 mm.

El diente posee algunas características que harían referencia a los dientes sinfisianos de *Itapyrodus punctatus*, pero su forma no común lo diferencia de todos los petalodontes conocidos.

Otros Chondrichthyes observados en la base arenosa son representados por espinas de tiburones Ctenacanthiformes. Las espinas tienen formas, tamaños y ornamentaciones superficiales diferenciadas, que significaría más de una especie (Figs. 4E y F).

Chahud *et al.* (2010) describieron una nueva especie *Sphenacanthus sanpauloensis*, con espinas elongadas y con la superficie ornamentada por tubérculos. Espinas de ornamentaciones diferenciadas fueron descubiertas, algunas probablemente pertenecientes al género *Amelacanthus* (Fig. 4E) o a géneros nuevos (Fig. 4F).

Los peces óseos (Osteichthyes) son los fósiles más comunes de la facies arenosa del Miembro Taquaral, y son reconocidas dos clases: Actinopterygii, caracterizados por los primitivos Palaeonisciformes y los Sarcopterygii, representados por los Coelacanthiformes (celacantos), Osteolepimorpha y Tetrápodos (Chahud, 2007; Chahud & Petri, 2008b).

Los Palaeonisciformes forman un grupo parafilético de actinopterygeos primitivos del Paleozoico y Mesozoico (Richter *et al.*, 2004). Prácticamente todos los Palaeonisciformes presentan un patrón básico de desarrollo, con grandes bocas y ojos colocados en la cara anterior del cráneo, escamas rígidas de poca diversidad y variación morfológica.

Los restos de Palaeonisciformes son los más abundantes en toda la colección de fósiles estudiados. El material colectado consiste en escamas, dientes aislados y partes óseas. Los dientes de Palaeonisciformes son bien característicos y pueden variar mucho en la forma y el tamaño, externamente presentan pocas características, como una capucha apical y fuste de formato cónico. El fuste es liso y puede tener costillas o estar cubierto por tubérculos.

La capucha apical es maciza, sin ornamentación y se destaca en el diente porque su coloración generalmente es más clara que la del fuste.

Las escamas encontradas constituyen la mayor parte de todo el material fósil colectado y son encontradas de todos los modos de preservación y en todos los afloramientos. Las mejores preservadas son romboédricas, con forma de romboedro cuando es vista de planta. Internamente, diversas capas de isopedina se superponen acompañando el formato original de la escama tanto transversalmente como longitudinalmente.

En la cara superior (corona) las capas de ganoína pueden presentarse como costillas o como una capa lisa, con pocas ondulaciones y poros. Varios ejemplares muestran estructuras ramificadas de ortodentina entre las capas de ganoína. En general, las escamas encontradas poseen bordes lisos o desgastados, sin la articulación preservada.

Los peces sarcopterigeos fueron los vertebrados que originaron los celacantos, peces pulmonados (Dipnoi) y todos los vertebrados terrestres. En la Era Paleozoica fue una subclase de gran potencial evolutivo evidenciado por su diversidad de forma y hábitat.

Chahud (2007) y Chahud & Petri (2010) reportaron la presencia de anfibios, sarcopterigeos y peces óseos de gran tamaño en la facies arenosa, pero sus ocurrencias son raras y representadas apenas por fragmentos de escamas, huesos y dientes aislados.

Los Coelacanthiformes son registrados desde el Pérmico-Carbonífero del Subgrupo Itararé. El primero en observarlos fue Bryant (1929) quien describió una escama de celacanto proveniente de un till del Subgrupo Itararé del Estado de São Paulo, constituyendo la más antigua de la Cuenca de Paraná. En la facies arenosa del Miembro Taquaral como en la Formación Tatuí, estos fósiles son raros y mal preservados.

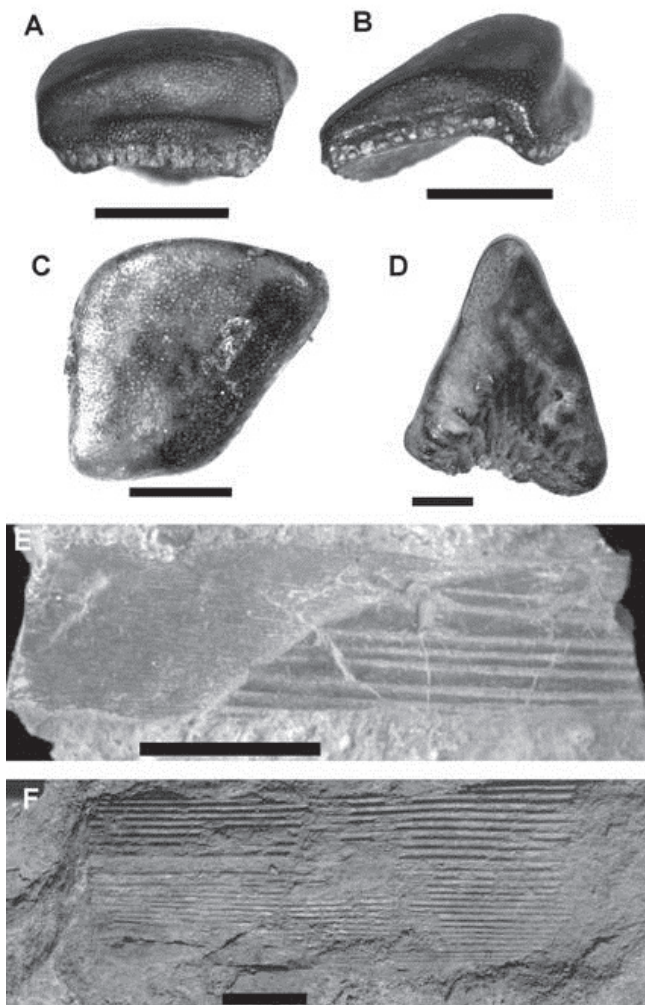


Figura 4. Chondrichthyes de la base arenosa del Miembro Taquaral. A-B) Diente lateral-posterior de *Itapyrodus punctatus*. Escala 4 mm (GP/2E-6458); C) Diente sinfisiano de *Itapyrodus punctatus*, Escala 4 mm (GP/2E-6460); D) Diente de Chondrichthyes indeterminado, Escala 4 mm (GP/2E-6459); E-F) Espinas de Ctenacathiformes, escalas: 10 mm (GP/2E-6461 e GP/2E-6462).
Figure 4. Taquaral Member base sandy facies Chondrichthyes. A-B) *Itapyrodus punctatus*. Scale 4 mm (GP/2E-6458); C) Symphyseal tooth of *Itapyrodus punctatus*, Scale 4 mm (GP/2E-6460); D) Indeterminate Chondrichthyes tooth, scale 4 mm (GP/2E-6459). E-F) Ctenacathiformes Spine: Scale 10 mm (GP/2E-6461 e GP/2E-6462).

Paleontología de la facies shale limo-arcilloso

El contenido fósil identificado en el shale del Miembro Taquaral, está constituido principalmente por crustáceos y restos desarticulados de vertebrados. La especie más común de crustáceo (y la única descrita en la literatura) es *Clarkecaris brazilicus* (Fig. 6). Exclusiva de los shales de esa unidad y que presenta desde ejemplares articulados hasta fragmentados.

Clasificados como Syncarida, fueron considerados crustáceos de agua dulce (Mussa *et al.*, 1980), pero

actualmente el género *Clarkecaris* representaría una posible forma de transición entre las formas primitivas de ese orden de origen marino, y formas recientes de agua dulce (Schram & Schram, 1974). Comparada con la base arenosa, el shale es mucho más pobre en contenido fosilífero de vertebrados, exhibiendo apenas peces óseos, los Coelacanthiformes son apenas representados por escamas (Fig. 6B) en buen estado de preservación. Normalmente expone detalles de su anatomía, como la región de articulación y líneas de crecimiento. Los Actinopterygii presentan dientes, escamas ganóides y partes óseas, como maxilares (Fig. 6C y 6D).

Comparación del contenido fosilífero del tope de la Formación Tatuí y del Miembro Taquaral

Los datos sobre el paleoambiente del tope de la Formación Tatuí son pocos (Stevaux *et al.*, 1986; Cabral Jr. *et al.*, 1988; Marasco *et al.*, 1993); estructuras de tempestad (hummockies) de gran tamaño indican un gran cuerpo de agua.

Fósiles exclusivos de agua dulce o salada no son encontrados en ningún depósito, sin embargo han sido encontrados vertebrados y microfósiles de ambiente variable. Los troncos citados por Stevaux *et al.* (1986), encontrados en el Conglomerado Ibicatú, son indicativos de agua dulce y fueron hallados en un único punto y al comparar su posición estratigráfica con otros puntos aquí estudiados, indicaría que se encuentra debajo de las capas del tope y debieron ser transportados. En este caso debe haber ocurrido algún hiato deposicional, probablemente un diastema entre la Capa Ibicatú y el Miembro Taquaral.

La facies arenosa basal fue depositada en un ambiente de alta energía durante transgresiones o aumento del nivel del cuerpo de agua; estas transgresiones son evidenciadas por el granodecrecimiento. Aunque son observadas capas limolíticas entre los depósitos con granulometría más gruesa. Esto permite evidenciar más de un episodio

deposicional. Según Chahud (2007) y Chahud & Petri (2008a) esas capas representarían un depósito residual con influencia de ríos.

Fósiles de agua dulce y continentales son observados (Chahud & Petri, 2010), pero fósiles de salinidad variable como petalodontes y Ctenacanthiformes son mucho más comunes. Además de los peces, existe registro de acritarcos, foraminíferos aglutinantes y ostrácodos en capas correlacionables (Cabral Jr. *et al.*, 1988; Marasco *et al.*, 1993), algunos con ictiofósiles. La salinidad debió ser baja, ya que no se encontraron fósiles exclusivamente marinos, esto se corrobora con los pocos acritarcos y foraminíferos aglutinantes hallados. Esta conclusión es válida observando depósitos del Holoceno relacionados a la evolución del Mar Báltico, que durante épocas de confinamiento total en los depósitos lacustres de agua dulce mantenían aún pocos géneros de acritarcos (Brenner, 2005).

Los shales limosos de Taquaral, indicativos de baja energía, presentaron algunos acritarcos (Lages, 2004), pero se observó también el alga *Botryococcus* que es típica de agua dulce. Los fósiles como el crustáceo *Clarkecaris* tampoco fueron útiles para la definición de salinidad, pero sugerirían una salinidad variable como la de la base arenosa.

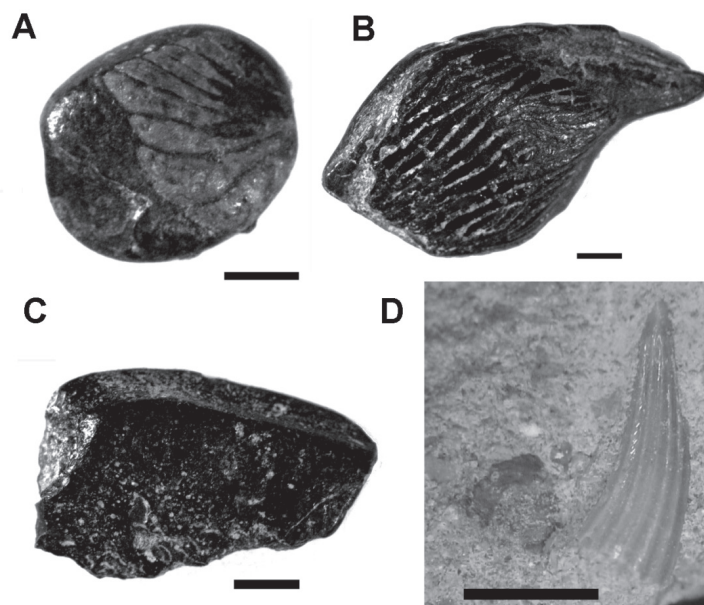


Figura 5. Fósiles de peces óseos. A-C) Escamas de Palaeonisciformes de la base arenosa del Miembro Taquaral ((GP/2E-6463, GP/2E-6577 y GP/2E-6578); D) Dientes de Palaeonisciformes base arenosa del Miembro Taquaral (GP/2E-6412), escalas 2mm.
Figure 5. Taquaral Member sandy base fossil fishes bone. A-C) Taquaral Member sandy base Palaeonisciformes scales (GP/2E-6463, GP/2E-6577 y GP/2E-6578); D) Taquaral Member sandy base Palaeonisciformes teeth (GP/2E-6412), scales 2mm.

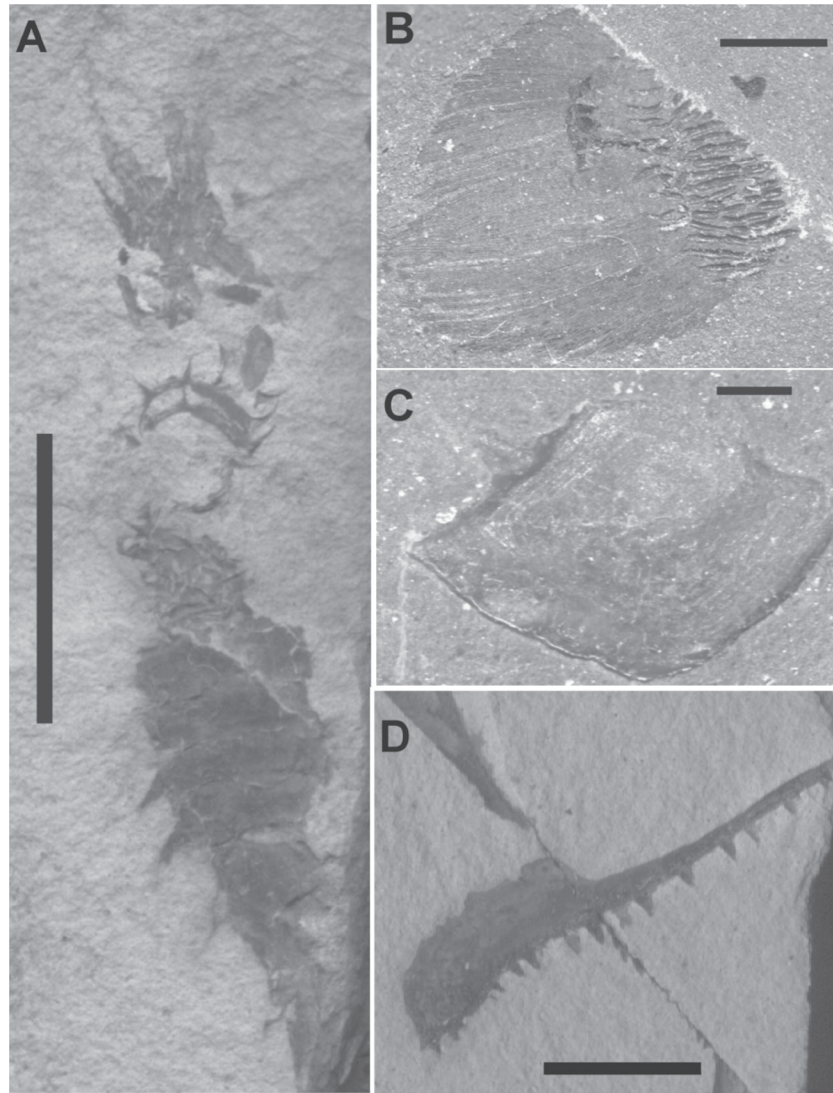


Figura 6. Fósiles del shale del Miembro Taquaral. A) *Clarkecaris* del afloramiento del Río Passa Cinco (Punto 3), escala: 10 mm (GP/1E-5691), B) Escama Coelacanthiformes del afloramiento de la Hacienda Santa María, escala: 1 mm (GP/2E-5969), C) Escama de Palaeonisciformes del mismo afloramiento, escala: 1 mm (GP/2E-6223). Mandíbula de Palaeonisciformes del afloramiento del Río Passa Cinco, escala: 5 mm (GP/2E-6231).

Figure 6. Fossils from Taquaral member shale. A) Clarkecaris Passa Cinco outcrop (Point 3), scale: 10 mm (GP/1E-5691), B) Coelacanthiforms scale from the Santa Maria outcrop, scale: 1mm (GP/2E-5969), C) Palaeonisciformes scale of this same outcrop, scale: 1 mm (GP/2E-6 223). Palaeonisciformes jaw from Passa Cinco River outcrop, scale: 5 mm (GP/2E-6231).

Conclusiones

El tope de la Formación Tatuí en contacto directo con la Formación Iratí puede ser dividido en tres litotipos. Las capas de areniscas de tamaño fino con estructuras de tempestad, capas de areniscas y limolitas macizas a finamente laminadas, y las areniscas de tamaño fino con icnofósiles.

En el centro oriente del Estado de São Paulo la facies arenosa de la base del Miembro Taquaral es bastante

común y marca un período de transgresión y de retrabajamiento de depósitos fluviales coetáneos o antiguos. La facies shale es predominante en la unidad y marca un período de depositación en ambiente de baja energía.

Los icnofósiles del tope de la Formación Tatuí, registrados por primera vez aquí, fueron formados en paleoambientes aéreo o subaéreo. Estos icnofósiles registraron los primeros momentos depositacionales de la

Formación Iratí, habiendo sido inmediatamente llenados por sedimentos de la capa suprayacente del Miembro Taquaral. Los principales fósiles de la base arenosa del Miembro Taquaral son vertebrados, incluyendo una fauna diversificada de peces óseos y Chondrichthyes, (tiburones y otros peces cartilaginosos).

El crustáceo *Clarkecaris* es el fósil más característico del shale limo-arcilloso del Miembro Taquaral con algunos individuos parcialmente completos. Los peces óseos son los únicos vertebrados de esta facies, hasta el momento no han sido observados Chondrichthyes.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a los alumnos del curso de Ambientes de Sedimentación del año 2010, por el apoyo y auxilio dados en trabajos de campo. A los propietarios de la Hacienda Santa María en el municipio de Río Claro, Señor Luis y Señora Bernardete, donde fue colectado el material de investigación. Al Departamento de Geología Sedimentaria y Ambiental que permitió que los trabajos de preparación de los fósiles fuesen realizados en sus laboratorios. Por último, un agradecimiento especial a CAPES y FAPESP por el apoyo financiero para el desarrollo de esta investigación.

Referencias

- ALMEIDA, F. F. M. & BARBOSA, O. (1953) Geología das quadriculas de Piracicaba e Rio Claro. Estado de São Paulo. Boletim do DNPM/DGM, **143**: 96p. Rio de Janeiro.
- ASSINE, M. L., ZACHARIAS, A. A. & PERINOTTO, J. A. J. (1999): O trato deposicional Tatuí e a transgressão Taquaral no Centro-Leste do Estado de São Paulo. In: VI Simpósio de Geologia do Sudeste – SBG/UNESP. Boletim de resumos. 53.
- ASSINE, M. L., ZACHARIAS, A. A. & PERINOTTO, J. A. J. (2003): Paleocorrientes, paleogeografia e seqüências deposicionais da Formação Tatuí, centro-leste do Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Geociências. **33**(1): 33-40.
- BARCELLOS, M. T. (1975): Estudo de escamas e dentes de peixes da Fácies Budó, Subgrupo Itararé, RGS. Boletim Paranaense de Geociências. **32**: 3-65.
- BRENNER W. W. (2005): Holocene environmental history of the Gotland Basin (Baltic Sea)—a micropalaeontological model. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. **220**: 227–241.
- BRYANT, W. L. (1929): Fossil fish remains from the Permian tillite of Brazil. Bulletin Geological Society American. **40**: 424-426. New York.
- CABRAL, JR. M., CAMPANHA, V. A., MOTTA, J. F. M. & SAAD, A. R. (1988): Contribuição à estratigrafia e paleogeografia da interface Itararé e Tatuí (P) e considerações sobre sua potencialidade para carvão no Estado de São Paulo. XXXV Congresso Brasileiro de Geologia, Belém. Pará. Anais. **2**: 879-892.
- CHAHUD, A. (2007): Paleontologia de Vertebrados da Transição entre os grupos Tubarão e Passa Dois no Centro-Leste do Estado de São Paulo (Disertación de Maestria). 172p. Programa de Pós-graduação em Geologia Sedimentar. IGC-USP. São Paulo.
- CHAHUD, A., FAIRCHILD, T. R. & PETRI, S. (2010): Chondrichthyans from the base of the Irati Formation (Early Permian, Paraná Basin), São Paulo Brazil. Gondwana Research. **18**: 528-537
- CHAHUD, A. & PETRI, S. (2008a): Chondrichthyes no Membro Taquaral, base da Formação Itati, no centro-leste do Estado de São Paulo, Brasil. Revista de Geologia (Fortaleza). **21**: 169 - 179.
- CHAHUD, A. & PETRI, S. (2008b): Registro de Paleoniscóides na base do Membro Taquaral, Formação Iratí, Permiano da Bacia do Paraná. Revista do Instituto Geológico. **29**: 33- 40.
- CHAHUD, A. & PETRI, S. (2010): Anfíbio e Paleonisciformes da Porção Basal do Membro Taquaral, Formação Iratí (Permiano), Estado de São Paulo, Brasil. Geologia USP. Série Científica. **10**(1): 29-37.
- FERNANDES, A. C. S., BORGHI, L., CARVALHO, I. S. & ABREU, C. J. (2002): Guia dos Icnofósseis de Invertebrados do Brasil.. 260 p. Editora Interciência. Rio de Janeiro.
- FREY, R.W., CURRAN, H. A. & PEMBERTON, S. G. (1984): Tracemaking activities of crabs and their environmental significance; the ichnogenus *Psilonichnus*: Journal of Paleontology. **58**: 333–350.
- FÜRSICH, F. T. (1981): Invertebrate trace fossils from the Upper Jurassic of Portugal. Comunicações Serviços Geológicos de Portugal. **67**: 153–168.

- GINGRAS, M. K., HUBBARD, S. M., PEMBERTON, S. G. & SAUNDERS, T. A. (2000): The significance of Pleistocene *Pylonichnus* at Willapa Bay, Washington: *Palaios*, **15**: 142–151.
- HACHIRO, J. (1991): Litotipos, associações faciológicas e sistemas deposicionais da Formação Irati no Estado de São Paulo (Dissertação de Maestria). 175p. IGc-USP, São Paulo.
- HACHIRO, J. (1997): O Subgrupo Irati (Neopermiano) da Bacia do Paraná (Tese de Doutorado). 196p. Programa de Pós-graduação em Geologia Sedimentar. IGc-USP, São Paulo.
- HOLZ, M., FRANÇA, A. B., SOUZA, P. A., IANNUZZI, R. & ROHN, R. (2010): A stratigraphic chart of the Late Carboniferous/Permian succession of the eastern border of the Paraná Basin, Brazil, South America. *Journal of South American Earth Sciences*. **29**(2): 381-399
- LAGES, L. C. (2004): A Formação Irati (Grupo Passa Dois, Permiano, Bacia do Paraná) no furo de sondagem FP-01-PR (Sapopema, PR Dissertação de Maestria) Pós-Graduação em Geociências. Universidade Estadual Paulista/Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro. 117p.
- MARASCO, S.A., SOUZA, P.A. & PIRES, F.A. (1993): Ocorrência de paleomicroplâncton marinho (*Acritarcha*) associado a ictiofósseis na base do Membro Taquaral, Formação Irati (Permiano Superior da bacia do Paraná), região de Itapetininga, Estado de São Paulo. In: XIII Congresso Brasileiro de Paleontologia e I Simpósio Paleontológico do Cone Sul, São Leopoldo, RS. Sociedade Brasileira de Paleontologia, UNISINOS, Boletim de Resumos. 60.
- MEZZALIRA, S. (1952): *Clarkecaris*, novo gênero de crustáceo *Syncarida* do Permiano. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*. **1**(1): 46-52.
- MEZZALIRA, S. & MARTINS-NETO, R. G. (1992): Novos crustáceos paleozóicos do Estado de São Paulo com descrição de novas taxa. *Acta Geológica Leopoldensia. Estudos Tecnológicos*. São Leopoldo. **15**(36): 49-65.
- MILANI, E. J., MELO, J. H. G., SOUZA, P. A., FERNANDES, L. A. & FRANÇA, A. B. (2007): Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, Rio de Janeiro. **15**(2): 265-287.
- MUSSA, D. CARVALHO, R. G. & SANTOS, P. R. (1980): Estudo estratigráfico e Paleoecológico em Ocorrências Fossilíferas da Formação Irati, Estado de São Paulo, Brasil. *Boletim do IG/USP*. **11**: 31-189.
- NESBITT, E. A. & CAMPBELL, K. A. (2006): The Paleoenvironmental Significance of *Pylonichnus*. *Palaios*; **21**(2): 187-196.
- NETTO, R. G. (2000) Paleoicnologia do Rio Grande do Sul. In: Holz, M.; de Ros, L. F. (2000). A paleontologia do Rio Grande do Sul. 25-43p. Porto Alegre.
- RICCOMINI, C., SANT'ANNA, L.G. & COIMBRA, A.M. (1997): Sílica microcristalina (Trípoli) em rochas sedimentares permianas do flanco leste da bacia do Paraná, Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*. **27**(4). 395-402.
- RICHTER, M., VIANA, M.S.S. & MALABARBA, M.C.S.L. (2004): *Agnatos* e *Peixes*. In: Carvalho. I. S. (ed.) *Paleontologia*. Rio de Janeiro, Editora Interciência, **1**(41):733-761.
- SCHRAM, J. M. & SCHRAM, F. R. (1974): *Squillites spinosus* Scott 1938 (*Syncarida Malascostraca*) from the Mississippian Heath shale of Central Montana. *Journal of Paleontology*. **48**(1): 95 – 104.
- SILVA S. R. (1990): Paleoictiofauna da Formação Pedra do Fogo, Nordeste do Brasil: *Holocephali – Petalodontidae*. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. **62**(4): 347-355.
- SOARES, P.C. (1972): O limite glacial/pós-glacial do Grupo Tubarão no Estado de São Paulo. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **44** (suplemento): 333-342.
- STEVAUX, J.C., SOUZA-FILHO, E. E. & FÚLFARO, V.J. (1986): Trato deposicional da Formação Tatuí (P) na área aflorante do NE da Bacia do Paraná, Estado de São Paulo. In: XXXIV Congresso Brasileiro de Geologia, Goiânia. Sociedade Brasileira de Geologia. *Anais*. **1**: 219-229.
- WASHBURN, C. W. (1930): Petroleum geology of the State of São Paulo – Brazil. São Paulo, Boletim da Comissão Geográfica e Geológica do Estado de São Paulo, **22**: 282p.