

- CAPÍTULO 6 -  
PALEOECOLOGÍA e  
INFERENCIAS  
PALEOAMBIENTALES

## 6.0 – PALEOECOLOGÍA e INFERENCIAS PALEOAMBIENTALES

### 6.1 – *Antecedentes*

Los escasos estudios paleoecológicos que hacen referencia a la Formación La Golondrina (Archangelsky, 1979; Cúneo, 1986, 1996) se basaron en comparaciones entre floras del Paleozoico Superior e inferían condiciones ambientales propicias para el desarrollo de una flora caracterizada por una alta diversidad, sin profundizar en mayores detalles.

A partir de un extenso y detallado análisis sedimentológico y facial llevado a cabo como parte de su tesis doctoral, Jalfin (1987) brindó un esquema interpretativo de los ambientes depositacionales para cada uno de los 3 miembros de la Formación La Golondrina. De esta manera, concluyó que la depositación inicial (Miembro Laguna Lillo) del relleno de cuenca se habría producido a través de un sistema fluvial multicanalizado (=entrelazado) gravoso de baja sinuosidad. Por su parte, el Miembro Laguna Polina incluiría depósitos de un sistema fluvial también entrelazado, pero arenoso, donde se observaba un incremento en la sinuosidad dada por la aparente disminución en la pendiente. Si bien la abundante vegetación presente habría actuado fijando las márgenes de los ríos, esta cobertura vegetal no habría alcanzado a inhibir totalmente la migración lateral de los canales. Ambos períodos de depositación se habrían dado bajo condiciones tectónicas estables, alcanzando un grado de mayor madurez durante la depositación del miembro medio (Jalfin, 1987), lo que resulta concordante con el gran desarrollo de la vegetación. Por el contrario, la depositación del miembro superior (Dos Hermanos) en la cuenca se habría producido por el desarrollo de un sistema de abanicos aluviales que alimentaba a un sistema fluvial entrelazado de baja sinuosidad. La formación de estos abanicos se vio favorecida por un abrupto levantamiento tectónico en la parte NE de la cuenca, lo que generó a su vez un claro cambio en las paleocorrientes, pasando de ser predominantemente NO-SE en los primeros estadios de depositación, a NE-SO en los finales (Jalfin, 1987; Jalfin *et al.*, 1990). Asimismo, las características sedimentológicas de estos abanicos indicarían su desarrollo bajo un clima húmedo (Jalfin, 1987: 152), en coincidencia con la evidencia aportada por la

flora fósil hallada en la zona de Dos Hermanos. Basándose en todos estos datos, Jalfin (1987) sugirió – como previamente lo habían hecho Archangelsky (1959a, 1979) y Cúneo (1986) – que las condiciones climáticas bajo las cuales se habría desarrollado la flora de La Golondrina habrían sido “benignas”, con altos niveles de humedad.

El esbozo paleoambiental propuesto por Jalfin (1987) fue ampliamente aceptado y utilizado por distintos autores (Jalfin *et al.*, 1990; Andreis y Archangelsky, 1996; Archangelsky *et al.*, 1996a; Archangelsky y Cúneo 2002), donde independientemente de la posición latitudinal, se asumía que el clima imperante en la Formación La Golondrina había sido subtropical, lluvioso, estacional, con inviernos no muy fríos (temperaturas medias siempre mayores a 0°C) y veranos calurosos, homologable al clima Tipo *Cfa* de la clasificación de Köppen (Fig. 12) (Jalfin, 1987; Archangelsky *et al.*, 1996a).

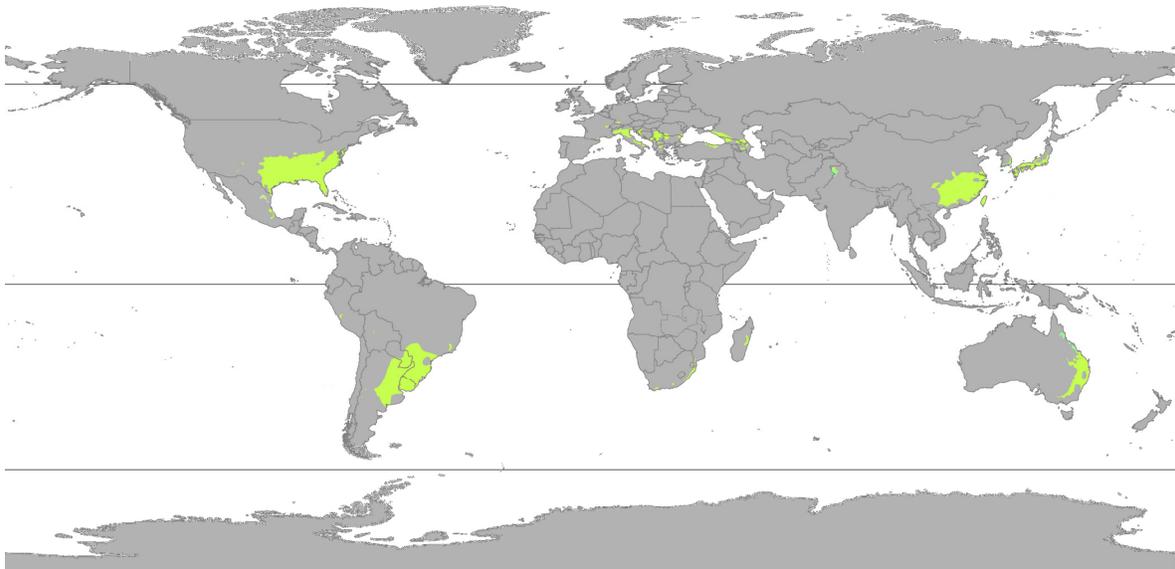


Fig. 12- Distribución en un mapa actual del tipo climático *Cfa* (clima subtropical húmedo) según la clasificación de Köppen (modificado de [http://en.wikipedia.org/wiki/Humid\\_subtropical\\_climate](http://en.wikipedia.org/wiki/Humid_subtropical_climate)).

## 6.2 – *Análisis petrográfico de areniscas*

Para el análisis paleoambiental de la cuenca se optó por un enfoque novedoso aún no ejecutado en La Golondrina, a través del estudio de cortes petrográficos de muestras de areniscas de grano medio y grueso provenientes de dos de los tres miembros de la formación: Laguna Lillo (inferior) y Laguna Polina (medio). Muestras del Miembro Dos Hermanos (superior) no resultaron adecuadas para su análisis debido al alto grado de alteración que éstas presentaban, por lo que este miembro no fue considerado en este estudio.

El estudio de cortes delgados permite determinar el origen y la ubicación de las áreas fuentes a través de la composición modal de los detritos arenosos terrígenos (Dickinson *et al.*, 1983). Además de la procedencia, estos estudios permiten realizar inferencias acerca de las condiciones tectónicas (evolución de la cuenca, procesos diagenéticos, etc), y climáticas durante el tiempo de sedimentación, ya que estos factores juegan un rol importante en la composición final de las areniscas terrígenas (Basu, 1976; Suttner *et al.*, 1981; Dickinson *et al.*, 1983; Suttner y Dutta, 1986; Mack y Jerzykiewicz, 1989; Girty, 1991; Espejo y López-Gamundí, 1994; Hota *et al.*, 2011).

El análisis de muestras en el microscopio de polarización se desarrolló en dos partes. Primero, se identificaron las propiedades texturales de los clastos de roca, utilizando las escalas convencionales y estandarizadas en función del porcentaje de matriz presente, grado de redondez y esfericidad de los clastos, selección, y tamaño de grano (Powers, 1953, 1982; Krumbein y Sloss, 1955; Compton, 1962; Tucker, 2003) (Anexo III). A partir de los datos obtenidos, se seleccionaron aquellas muestras de mejor condición, con el menor (o nulo) grado de alteración posible, descartando aquellas menos aptas. Para hacer el estudio más ajustado, se eligieron 8 muestras representativas por cada miembro prospectado.

### *Laguna Lillo*

De un total de 13 muestras, resultaron como las más aptas para su análisis composicional las muestras P2, P3, P4, P5, P8, P9, P12, y P13 (Fig. 5; Cuadro V). De éstas,

únicamente la P13 pertenecería al miembro medio (Laguna Polina). Todas las muestras analizadas provienen de areniscas finas a gruesas (Fig. 5), y pueden ser consideradas areniscas sublíticas y subfeldespáticas en base a su variable composición y apariencia, (Folk *et al.*, 1970).

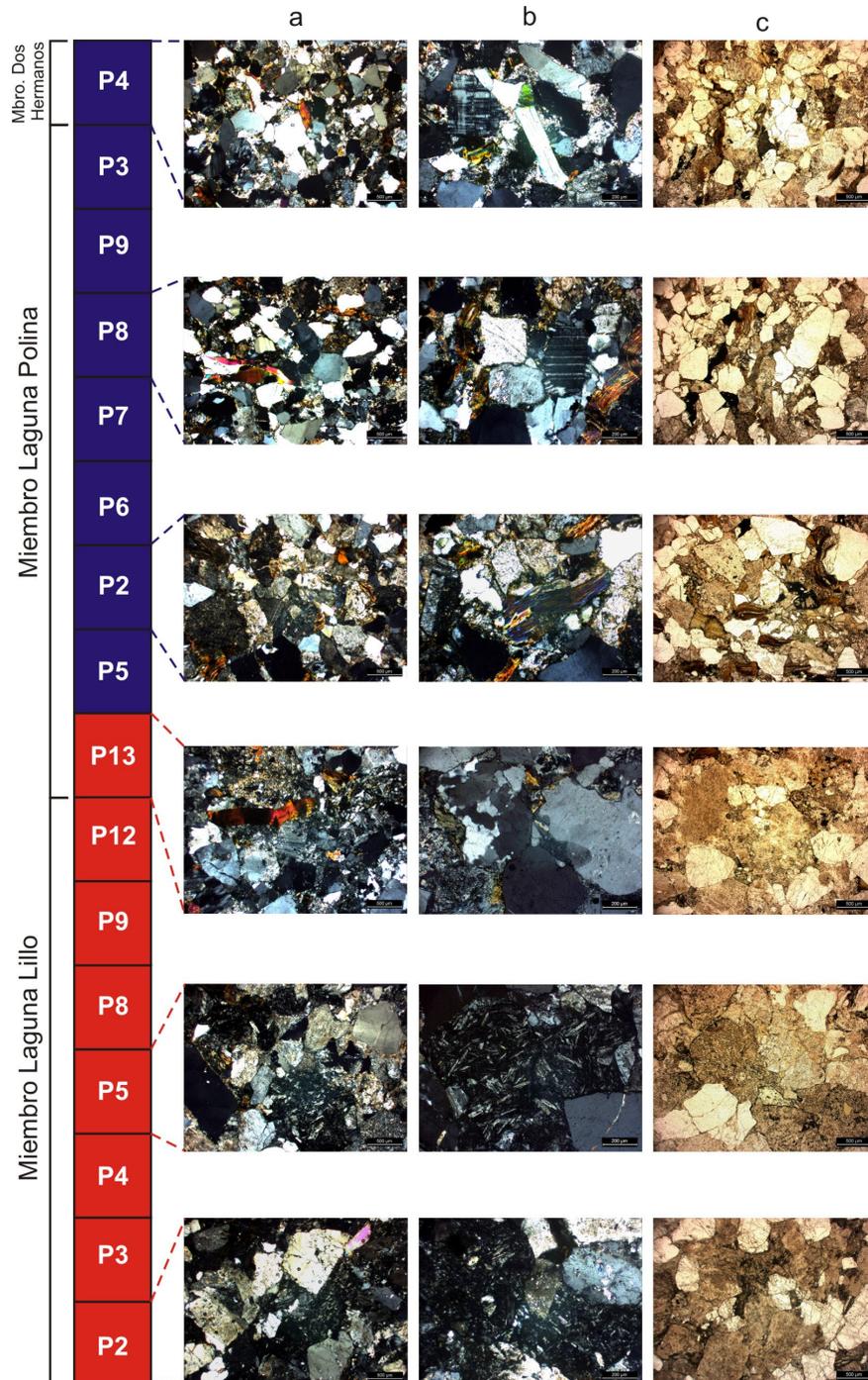
Las propiedades microscópicas observadas se asemejan para todas las muestras (Anexo III; Lám. 3). En general, presentan poca matriz (nunca más del 20%), con clastos desde redondeados a subangulosos, de esfericidad predominantemente subdiscoidal a subprismático, moderada a pobremente seleccionadas, y tamaño de granos muy variable, con valores más comunmente entre 350 y 500 micrones, pero una amplia oscilación entre 100 y 1400 micrones.

#### *Laguna Polina*

De un total de 9 muestras, se consideró a las P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, y P9 como las de mejor condición para su análisis (Fig. 6; Cuadro V). Todas las muestras pertenecen al miembro medio, a excepción de la muestra P4, que pertenece al miembro superior (Dos Hermanos). Todas las muestras analizadas provienen de areniscas medianas a gruesas y conglomerados (Fig. 6), y en base a su composición y apariencia, pueden ser clasificadas como areniscas feldespáticas (Folk *et al.*, 1970).

Las propiedades microscópicas observadas (Anexo III; Lám. 3) son similares a aquellas del miembro inferior, donde en muy pocos casos se observó más de un 10% de matriz, los clastos presentaron redondez variable (predominando aquellos subangulosos), mayormente de esfericidad subprismática, y en algunos casos, con buena selección, pero más comúnmente, presentando entre una selección moderada a pobre, y tamaño de los granos variable, con partículas generalmente entre 177 y 250 micrones, pero oscilando desde los 100 y 1400 micrones también.

### LÁMINA 3



a) Nicoles cruzados, 500 micrones, b) Nicoles cruzados, 200 micrones, c) Nicoles sin cruzar, 500 micrones.

Cuadro V- Conteo de partículas sedimentarias. En rojo, muestras de Laguna Lillo; en azul, muestras de Laguna Polina.

| Muestra | Qm  | Qp | P   | Fk | Mtx | Ls | Lv(b) | Lv(a) | M  | Mc | Total |
|---------|-----|----|-----|----|-----|----|-------|-------|----|----|-------|
| P4      | 62  | 3  | 86  | 0  | 82  | 7  | 1     | 0     | 59 | 0  | 300   |
| P3      | 67  | 18 | 74  | 0  | 89  | 4  | 4     | 0     | 38 | 6  | 300   |
| P9      | 109 | 23 | 75  | 4  | 51  | 8  | 0     | 2     | 19 | 9  | 300   |
| P8      | 96  | 46 | 81  | 10 | 41  | 6  | 4     | 3     | 10 | 3  | 300   |
| P7      | 44  | 2  | 109 | 0  | 103 | 10 | 0     | 0     | 29 | 3  | 300   |
| P6      | 70  | 7  | 94  | 8  | 56  | 10 | 5     | 4     | 45 | 1  | 300   |
| P2      | 81  | 17 | 106 | 4  | 50  | 3  | 17    | 0     | 19 | 2  | 300   |
| P5      | 61  | 8  | 113 | 18 | 57  | 2  | 8     | 6     | 25 | 2  | 300   |
| P13     | 64  | 20 | 60  | 0  | 44  | 15 | 7     | 0     | 76 | 14 | 300   |
| P12     | 72  | 9  | 71  | 0  | 31  | 6  | 35    | 0     | 61 | 15 | 300   |
| P9      | 45  | 1  | 94  | 4  | 38  | 6  | 96    | 8     | 6  | 2  | 300   |
| P8      | 40  | 3  | 75  | 2  | 51  | 4  | 108   | 7     | 9  | 1  | 300   |
| P5      | 59  | 4  | 66  | 4  | 29  | 5  | 126   | 3     | 4  | 0  | 300   |
| P4      | 98  | 7  | 78  | 0  | 14  | 2  | 39    | 0     | 62 | 0  | 300   |
| P3      | 75  | 5  | 112 | 3  | 24  | 10 | 49    | 0     | 22 | 0  | 300   |
| P2      | 58  | 3  | 105 | 15 | 41  | 0  | 62    | 2     | 14 | 0  | 300   |

La segunda parte del análisis bajo el microscopio involucró el conteo de 300 clastos por muestra, para posteriormente calcular las modas detríticas de composición y procedencia (Dickinson *et al.*, 1983). Se contabilizaron los siguientes tipos de granos: cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino (Qp), plagioclasa (P), feldespato potásico (Fk), matriz/cemento (Mtx), líticos sedimentarios (Ls), líticos volcánicos andesíticos [básicos, Lv(b)] y riolíticos [ácidos, Lv(a)], mica (M), y microclinos (Mc). El Cuadro V muestra los resultados obtenidos de este conteo.

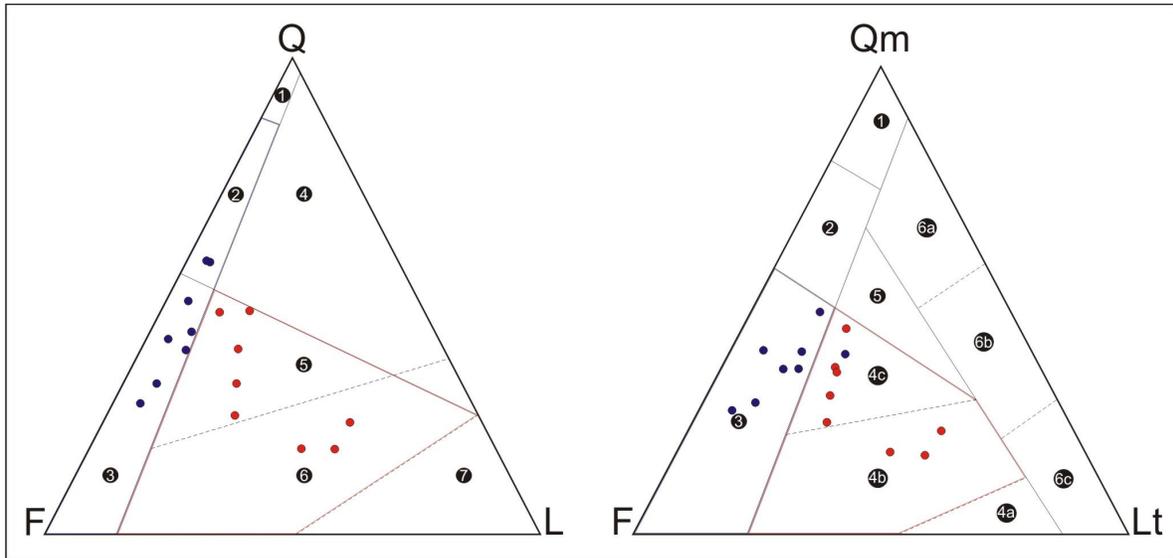


Fig. 13 – Triángulos composicional (izq.) y de proveniencia (der.) de Dickinson *et al.* (1983). Miembro inferior (Laguna Lillo) en rojo; miembro medio (Laguna Polina) en azul. **QFL**: 1) Interior cratónico, 2) Continental transicional, 3) Basamento elevado, 4) Orógeno reciclado, 5) Arco disectado, 6) Arco transicional, 7) Arco no disectado. **QmFLt**: 1) Interior cratónico, 2) Continental transicional, 3) Basamento elevado, 4a) Arco no disectado, 4b) Arco transicional, 4c) Arco disectado, 5) Mezcla, 6a) Orógeno reciclado cuarzoso, 6b) Orógeno reciclado transicional, 6c) Orógeno reciclado lítico.

Los datos obtenidos fueron ploteados en los triángulos de Dickinson *et al.* (1983) para analizar la composición y procedencia de los detritos que conforman las rocas de los miembros inferior y medio en la Formación La Golondrina (Fig. 13). De acuerdo a Dickinson *et al.* (1983), las variaciones composicionales de areniscas terrígenas pueden interpretarse en función de dos esquemas ternarios, cuyos extremos representan las categorías principales de granos: QFL y QpFLt (Fig. 13). Las relaciones proporcionales entre estos tres tipos composicionales son considerados como “guías naturales” que indicarían el terreno de proveniencia de los detritos que componen las rocas (Dickinson *et al.*, 1983).

Según los análisis de modas detríticas (Fig. 13), existe una clara diferencia entre las muestras del miembro inferior y medio, donde las areniscas provenientes primero presentan una menor madurez composicional que las del miembro medio. Asimismo, el miembro inferior presenta abundantes líticos (predominantemente volcánicos), en comparación con el miembro medio, donde éstos están prácticamente ausentes.

Respecto a la procedencia, la distribución de las muestras en los triángulos de Dickinson indican que el origen detrítico de los depósitos en Laguna Lillo (miembro inferior mayoritariamente) caen en la zona de *Arco* (transicional y disectado), mientras que las de Laguna Polina (miembro medio predominantemente) caen en la zona de *Continental transicional* y *Basamento elevado* (Fig. 13). Estos datos están concuerdan con lo sugerido por Jalfin (1987:129) quien señaló que “*desde un comienzo la Cuenca La Golondrina habría recibido aportes de por lo menos dos áreas fuentes*”, visión apoyada por la medición de paleocorrientes en las tres comarcas principales (Bajo de La Leona, Ea. La Juanita-Cerro Chato, y Ea. Dos Hermanos).

Asimismo, Jalfin (1987: 129) agregó que las rocas madres habrían sido esencialmente las mismas, ya que no identificó diferencias composicionales entre las distintas localidades que estudió. Sin embargo, a partir del análisis de los cortes petrográficos aquí realizado, se evidencia un claro aporte de roca madre distinta entre el miembro inferior y el medio, si bien ambos muestreos fueron llevados a cabo en la misma localidad (Bajo de La Leona).

Los análisis de paleocorrientes realizados por Jalfin (1987) y Jalfin *et al.* (1990) en el Bajo de La Leona, Ea. La Juanita-Cerro Chato, y la Ea. Dos Hermanos indican que la dirección predominante durante la depositación del miembro inferior era NNO-SSE, cambiando gradualmente a una marcada dirección NNE-SSO en el miembro superior, dada por el ascenso tectónico del Macizo del Deseado (Jalfin, 1987). De acuerdo a esto último, los detritos mayoritariamente volcánicos que conforman las areniscas del miembro inferior tendrían su origen hacia el NNO de la cuenca, en tanto que los detritos mayormente graníticos que conforman las areniscas del miembro medio provendrían del NNE. El

conjunto de información obtenida indicaría que el miembro inferior estuvo claramente influenciado por el aporte de un evento volcánico de magnitud previo o durante su depositación, mientras que este aporte habría cesado para la depositación del miembro medio, donde la influencia provino mayormente de un bloque continental.

Hacia fines del Paleozoico, habrían ocurrido al menos dos episodios magmáticos de importancia, registrados en varios continentes gondwánicos; el primero habría sucedido durante el Pérmico Temprano a Medio, mientras que el segundo lo habría hecho a principios del Triásico (Rapela y Kay, 1988; Kay *et al.*, 1989; López-Gamundí *et al.*, 1992, 1995; López-Gamundí, 2006). Niveles tobáceos datados en un intervalo de 280-260 Ma. (Pérmico Temprano a Medio) han sido correlacionados en todo Gondwana. En Argentina, se los ha registrado especialmente en las Cuencas Paganzo, San Rafael, y Sierras Australes (=Sauce Grande) (López-Gamundí *et al.*, 1992, 1995; López-Gamundí, 2006), por lo que este evento de intenso vulcanismo a lo largo del margen continental del SO de Gondwana se lo ha asociado con el evento volcánico del Grupo Choiyoi. De acuerdo a reconstrucciones paleogeográficas (López-Gamundí *et al.*, 1995; López-Gamundí, 2006), este arco magmático se habría extendido a lo largo de todo Gondwana con una dirección E-O por aproximadamente 7000 km (Visser, 1995), lo que evidenciaría la gran magnitud de este evento (Fig. 14). Si bien no se han registrado niveles tobáceos en la Cuenca La Golondrina, la abundante presencia de líticos volcánicos en los cortes delgados analizados del miembro inferior podrían estar indicando una fuente de origen relacionado a este evento magmático. La dirección de paleocorrientes predominantes en el Bajo de La Leona, donde aflora el miembro inferior (y de donde provienen las muestras de Laguna Lillo aquí analizadas) era, como se mencionó previamente, NNO-SSE (Jalfin, 1987). Esto estaría en concordancia con una ubicación de la Cuenca La Golondrina al sur del arco magmático, tal cual suele ser representado en distintas reconstrucciones paleogeográficas (Fig. 14). Asimismo, cabría esperar el hallazgo de niveles tobáceos en la Cuenca que aporten mayor evidencia para soportar esta hipótesis.

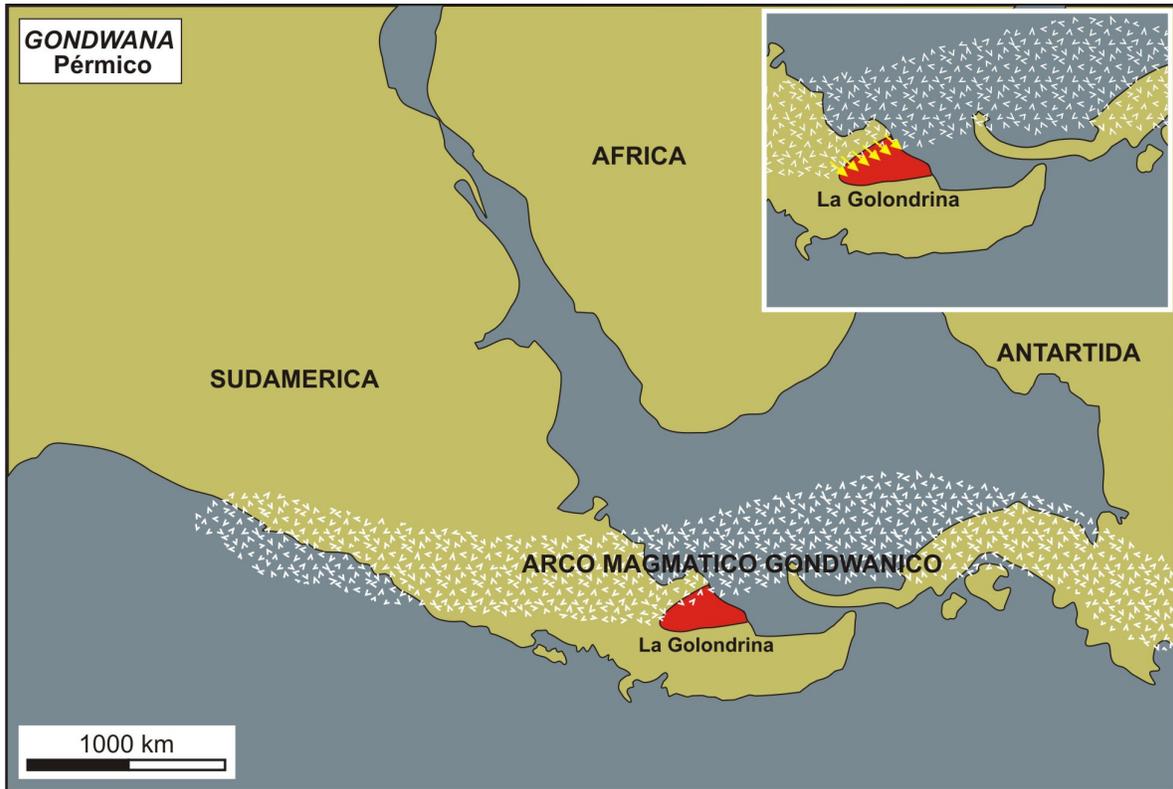


Fig. 14- Reconstrucción paleogeográfica del Gondwana occidental durante el Pérmico con presencia del arco magmático (modificado de López-Gamundí *et al.*, 1995). El recuadro interno muestra la dirección NNO del aporte detrítico durante la depositación del miembro inferior Laguna Lillo, en el Pérmico temprano tardío (flechas amarillas).

Tomando en cuenta que el aporte detrítico del miembro inferior tendría su origen en el arco magmático gondwánico, cuya actividad está radimétricamente datada en el intervalo de 280-260 Ma., o sea, en un período que abarcaría desde finales del Pérmico temprano al Pérmico medio, la edad de la Formación La Golondrina no sería más antigua del Artinskiano. Esto aportaría además, un tipo de evidencia diferente al ya dado por el registro paleobotánico, que acotaría las edades de los distintos miembros que componen a la Formación La Golondrina en Artinskiano-Roadiano(?) para el miembro Laguna Lillo, Roadiano-Wuchiapingiano(?) para el miembro Laguna Polina, y Wuchiapingiano para el miembro Dos Hermanos, como fuera propuesto en base a la evidencia florística (4.5).

Respecto de los sedimentos aportados durante la depositación del miembro medio (Laguna Polina), la casi total ausencia de líticos volcánicos como el aumento en el aporte de detritos cuarzosos sostienen una fuente de origen diferente a la del miembro inferior. El aporte granítico durante el período de depositación del miembro medio se vio favorecido por la aparente disminución de la actividad del arco magmático gondwánico, conllevando a que los niveles de aporte de líticos volcánicos sea casi nula. Las paleocorrientes medidas por Jalfin (1987) en las distintas localidades donde aflora el miembro medio indican una dirección predominante NE, aunque se registró una dispersión de datos significativa. De todas formas, la fuente de aporte de detritos durante la depositación del miembro medio habría estado localizada hacia el norte, con una tendencia desde el noreste.

Según lo sugerido por Guido y de Barrio (2004) y Guido *et al.* (2004), de acuerdo a las semejanzas petrográficas y a su estrecha vinculación con las sedimentitas de La Golondrina, dicho aporte de granitos podría tener su fuente en los “Leucogranitos de la Mina La Leona”, datados en el Carbonífero Temprano, cuyo origen estaría relacionado a un evento de subducción del arco magmático (Pankhurst *et al.*, 2006). Esta visión es apoyada también por Pankhurst *et al.* (2003), quienes a través de un estudio geocronológico en rocas del basamento pre-Pérmico en la Patagonia austral, obtuvieron unas edades SHRIMP entre  $476\pm 4$  y  $472\pm 5$  Ma de rodados graníticos en un conglomerado pérmico de la Formación La Golondrina, en el área de Dos Hermanos (ubicada apenas al NNE del área del Bajo de La Leona, de donde provienen las muestras de cortes delgados), lo que estaría evidenciando una actividad intrusiva durante el Ordovícico Temprano en los alrededores de la cuenca. Por otra parte, obtuvieron edades entre  $422\pm 2.4$  y  $346\pm 4$  Ma (Silúrico Tardío a Carbonífero Temprano) para intrusivos graníticos *in situ*. El tamaño relativamente grande de los conglomerados analizados sugeriría que el transporte de éstos no fue prolongado, por lo que el área de aportes habría estado cercana a la cuenca de La Golondrina. Estos eventos fueron también identificados en otros sectores de Sudamérica y la Península Antártica, por lo que sugirieron que estas áreas habrían evolucionado juntas desde el Cámbrico hasta el Jurásico.

En base a lo propuesto por dichos autores, se puede inferir como una posible fuente de aporte de los detritos durante la depositación del miembro medio al leucogranito de la Mina La Leona (Guido *et al.*, 2004), que habrían intruído el basamento metamórfico en el área de la Cuenca La Golondrina (y al norte de ésta) durante el Silúrico tardío-Carbonífero Temprano (Pankhurst *et al.*, 2003, 2006) (Fig. 15).

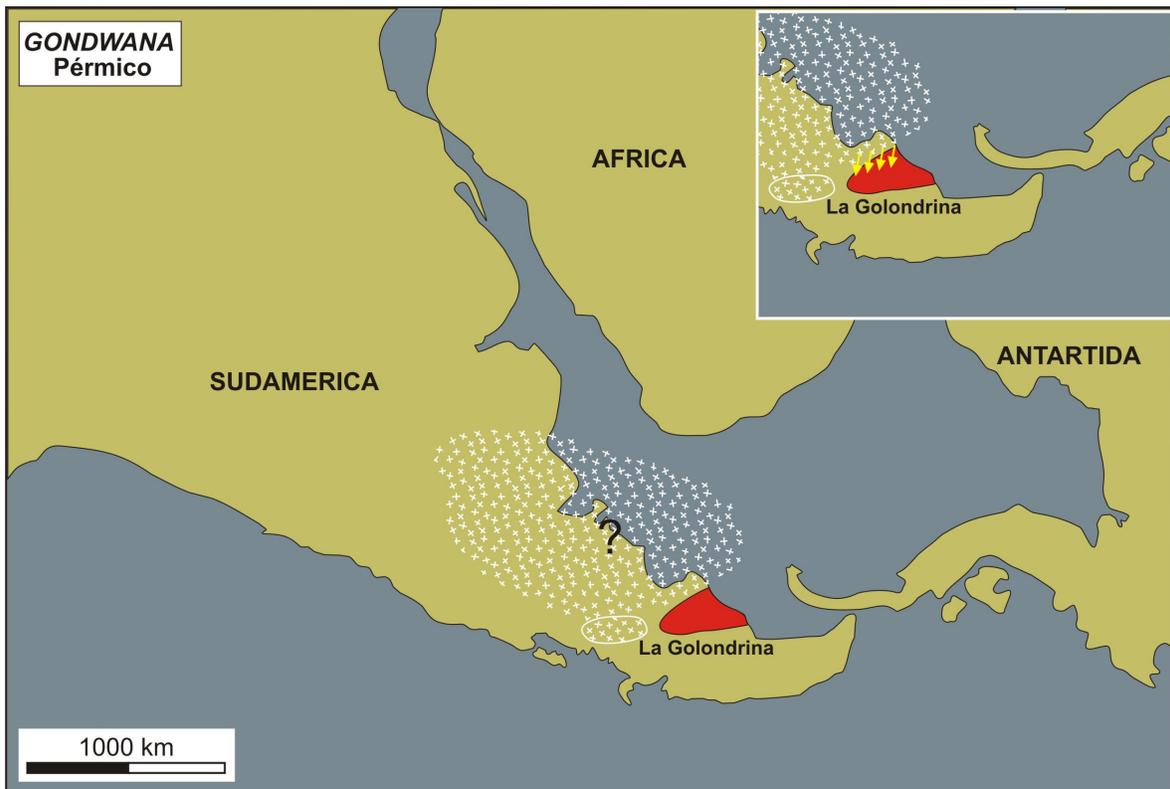


Fig. 15- Reconstrucción paleogeográfica del Gondwana occidental durante el Pérmico donde se infiere la presencia de un macizo granítico hacia el norte de la Cuenca La Golondrina (modificado de López-Gamundí *et al.*, 1995, y Pankhurst *et al.*, 2006). El recuadro interno muestra la dirección NNO (flechas amarillas) del aporte detrítico mayormente granítico durante la depositación del miembro medio Laguna Polina (Pérmico Medio). El signo de interrogación se refiere a la correcta edad del granito: según Pankhurst *et al.*, 2006, tendrían una edad pérmica temprana; aquí considerada pre-pérmica, en coincidencia con lo sugerido por otros autores (Jalfin, 1987; Pankhurst *et al.*, 2003; Guido y de Barrio, 2004). La zona de granitos delimitada tendría una edad Carbonífero medio (Pankhurst *et al.*, 2006).

### 6.3 – *Inferencias paleoambientales*

Además de datos acerca de la evolución y fuente de origen de los detritos aportados durante la depositación en la Cuenca La Golondrina, los análisis petrográficos de cortes delgados de areniscas permiten hacer inferencias sobre las condiciones paleoclimáticas que habrían imperado durante su depositación (Basu, 1976; Suttner y Dutta, 1986; Espejo y López-Gamundí, 1994).

Los diagramas Q:F:L representan las distintas proporciones de esos minerales en una muestra de roca. Esas proporciones se ven sujetas a variaciones no solamente de la fuente de origen y ambiente tectónico, sino también de las condiciones ambientales en donde fueron depositadas, dado que los elementos minerales actúan como indicadores sensibles de la herencia climática (Suttner y Dutta, 1986; Hota *et al.*, 2011), especialmente a datos referidos a la humedad (precipitación media anual, por ejemplo).

Los análisis llevados a cabo por distintos autores han permitido detectar firmas paleoclimáticas en rocas de origen plutónico, volcánico y metamórfico (Suttner *et al.*, 1981; Suttner y Dutta, 1986; Mack y Jerzykiewicz, 1989; Girty, 1991; Espejo y López-Gamundí, 1994; Hota *et al.*, 2011). Idealmente, las muestras para estos estudios se restringieron a areniscas de primer ciclo (transporte < 100 km), que además hubieran sido depositadas preferentemente en ambientes de tectonismo extensional, con nula o escasa influencia marina (con menor retrabajo), grano predominantemente mediano a grueso de la roca madre (para evitar sesgos producidos por una mayor abrasión mecánica y química de los minerales), y que hubieran sufrido un enterramiento diagenético relativamente superficial (Suttner *et al.*, 1981; Suttner y Dutta, 1986). Para Suttner *et al.* (1981), sin embargo, un dato de extrema relevancia a tener en cuenta en este tipo de análisis, es que aún bajo esas condiciones ideales de depositación, las condiciones tectónicas son más determinantes en la composición final de las areniscas que el clima.

Dichos estudios permitieron concluir que los fragmentos de roca se disgregaban en minerales individuales con más facilidad en ambientes húmedos que áridos (Basu, 1976;

Suttner y Dutta, 1986; Girty, 1991). De los resultados, también se desprendía que la ausencia de minerales lábiles (feldespatos, plagioclasas, micas, anfíboles) así como la predominancia de minerales cuarzosos (cuarzo mono o policristalino), eran indicativas de ambientes con niveles de humedad altos; mientras que aquellas areniscas derivadas de rocas volcánicas y depositadas en regiones áridas deberían presentar mayor proporción de líticos volcánicos que plagioclasas y otros minerales accesorios que aquellas areniscas de regiones húmedas (Mack y Jerzykiewicz, 1989). Esto se debía a que los minerales lábiles, al ser más inestables, sufrían una abrasión química y mecánica mayor en comparación a elementos química y mecánicamente más resistentes y maduros como el cuarzo, en ambientes bajo un clima húmedo y temperaturas cálidas (Suttner *et al.*, 1981; Mack y Jerzykiewicz, 1989).

Entre los métodos desarrollados para identificar las condiciones climáticas a partir del análisis de cortes delgados de areniscas, se destacan los índices RFP (relación líticos volcánicos: plagioclasa+líticos volcánicos) y RFA (relación líticos volcánicos: minerales accesorios+líticos volcánicos) de Mack y Jerzykiewicz (1989), y el gráfico de dispersión de Suttner y Dutta (1986), este último el más utilizado (Fig. 16). Ambos métodos se enfocan en la relación proporcional de la tríada Q:F:L.

El método desarrollado por Suttner y Dutta (1986) – el utilizado para el análisis de las muestras en este estudio – consiste en un gráfico de dispersión cuyos ejes en escala logarítmica representaban las fórmulas

$$Q_t/F+R \text{ (eje x)} \quad \text{y} \quad Q_p/F+R \text{ (eje y),}$$

donde  $Q_p$ : cuarzo policristalino,  $F$ : feldespatos en sentido amplio,  $R$ : líticos de roca en sentido amplio, y  $Q_t$ : cuarzo policristalino más cuarzo monocristalino.

La Fig. 16 muestra los resultados obtenidos a partir de la aplicación de dicho método a las muestras de los miembros inferior y medio de la Formación La Golondrina.

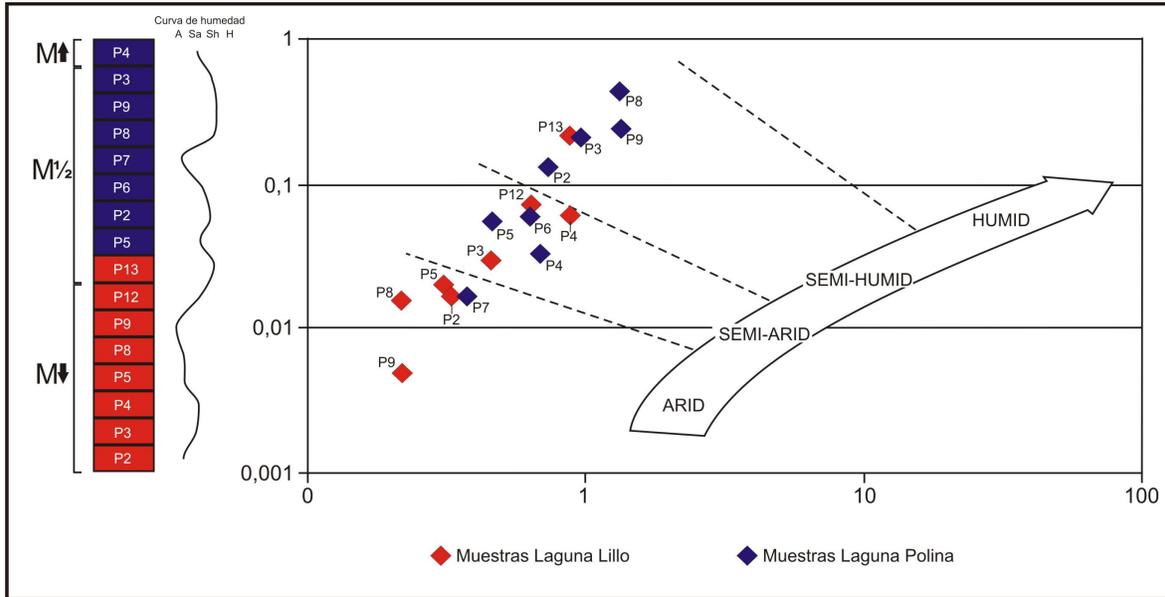


Fig. 16 – Ploteo de las muestras de roca tomadas en las localidades de Laguna Lillo (miembro inferior y medio, en rojo), y Laguna Polina (miembro medio y superior), de acuerdo al gráfico bivariado de Suttner y Dutta (1986). A la izquierda, representación esquemática de la ubicación estratigráfica de las muestras (ver también Figs. 5 y 6 de esta tesis).

Como se puede observar, los resultados obtenidos (si bien preliminares), estarían evidenciando una tendencia al aumento en las condiciones de humedad desde el miembro inferior al medio, lo que demostraría cambios ambientales en la cuenca a lo largo del tiempo de depositación (Fig. 16). A continuación (5.4), se analizan y discuten estos resultados.

#### 6.4 – *Discusión general*

Los datos que se desprenden del gráfico de la Fig. 16 indican una tendencia al aumento en los niveles de humedad a lo largo de la depositación de los miembros inferior y medio de la Formación La Golondrina. De acuerdo a lo especificado en el capítulo 4, el Miembro Laguna Lillo representaría una edad Cisuraliano tardío-Guadalupeño, mientras que el Miembro Laguna Polina, Guadalupeño-Lopingiano temprano.

El registro global indica que las condiciones climáticas a lo largo del Pérmico pasaron por varias etapas bien diferenciadas dadas por el cambio de una etapa de ‘*Ice House*’ a ‘*Hot House*’, aunque los gradientes latitudinales eran similares a los actuales, según lo evidenciado por la biogeografía florística (Ziegler, 1990; Cúneo, 1996; Scotese *et al.*, 1999; McAllister Rees *et al.*, 2002; Poulsen *et al.*, 2007). A inicios del Pérmico aún se registraba la glaciación de finales del Carbonífero en las latitudes más altas, y medias del hemisferio Sur. La subsiguiente deglaciación comenzó a retraer las capas de hielo de los continentes, por lo que para mediados del Pérmico, las condiciones fueron mejorándose hacia temperaturas más cálidas y un aumento progresivo en los niveles de humedad. Hacia finales de este período, la temperatura siguió en aumento, y consecuentemente, la aridización se incrementó (Ziegler, 1990; Visser, 1995; Cúneo, 1996; Scotese *et al.*, 1999; Chumakov y Zharkov, 2002, 2003).

Entre los factores que afectan las condiciones climáticas de una determinada región, se encuentran la posición latitudinal y las características fisiogeográficas. Si bien se suele considerar a Gondwana como una masa continental única, las diferentes partes (subcontinentes mayores) que la componían (Sudamérica, India, Australia, África, Antártida) tuvieron movimientos migratorios diferenciales a lo largo del Pérmico. Por ejemplo, los elementos florísticos de las cuencas Pérmicas tanto de la India como del África evidencian un movimiento de latitudes altas a medias (Visser, 1995, 1996; Hota *et al.*, 2011), mientras que la posición de Australia y Antártida se mantuvo relativamente estable, a altas latitudes (McLoughlin, 2001). El movimiento registrado para el bloque Sudamericano de acuerdo a las reconstrucciones paleogeográficas más aceptadas (Irving,

1983; Scotese y McKerrow, 1990; Scotese *et al.*, 1999) indica una migración hacia el norte (latitudes más bajas). Sin embargo, la posición de la Cuenca La Golondrina en particular, no presentó un cambio de posición latitudinal significativa a lo largo del Pérmico (Fig. 17), por lo que el cambio en las condiciones climáticas evidenciado entre el miembro inferior y medio (Fig. 16) no se debería *a priori* a un cambio en la posición latitudinal. Respecto a las características fisiogeográficas, se desconoce la presencia de una cadena montañosa o altos geográficos importantes, así como tampoco se registran grandes lagos que pudieran haber influenciado el clima en la cuenca. Cabe destacar que la cuenca tampoco habría estado cercana a un océano, en base a la ausencia de cualquier tipo de evidencia de origen marino en el área (Jalfin, 1987). Posiblemente, la ubicación de esta cuenca dentro del continente, sin presencia cercana de grandes cuerpos de agua que pudieran influenciar las condiciones del ambiente (actuando como efecto regulador, por ejemplo), habrían ayudado a que las condiciones en la cuenca sean más extremas (Scotese *et al.*, 1999; Yemane, 1993; López-Gamundí *et al.*, 1995).

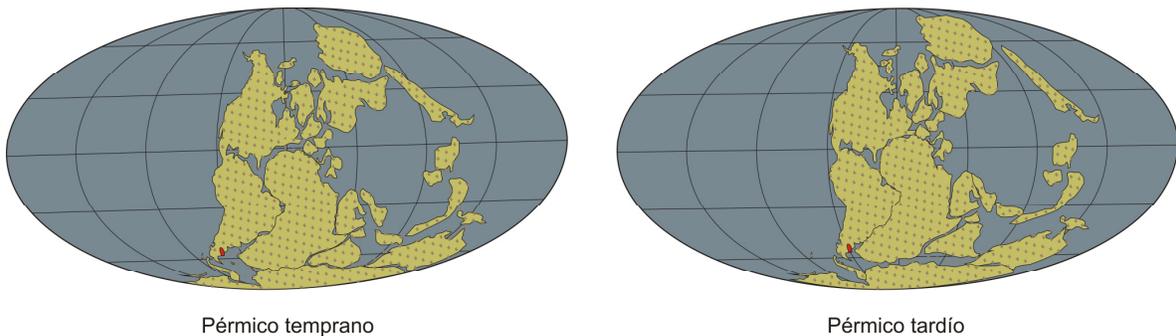


Fig. 17 – Representación paleogeográfica comparativa entre el Pérmico Temprano y Tardío. Observar la posición latitudinal casi invariable de la Cuenca La Golondrina (en rojo) entre uno y otro momento.

(Modificado de Scotese y McKerrow, 1990).

Por otra parte, se acepta que los valores de los niveles del CO<sub>2</sub> en la atmósfera durante el Pérmico, posterior a la glaciación, eran más elevados que en la actualidad (Royer, 2006; Poulsen *et al.*, 2007), lo que habría tenido un claro impacto en el clima y por ende, en la vegetación. La presencia de intensa actividad magmática generada por el arco gondwánico habría ayudado a incrementar los valores de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, tal cual lo sugirieron Crowley y Baum (1992), y Visser (1995), afectando el desarrollo de las floras en la zonas aledañas al arco (Axelrod, 1981; López-Gamundí *et al.*, 1995).

La actividad volcánica, sumada a la continentalidad, habrían actuado como factores determinantes en la configuración del clima durante la depositación del miembro inferior de la Formación La Golondrina a finales del Pérmico Temprano y comienzos del Pérmico Medio, posterior a la deglaciación del Pérmico más temprano. Esto se vería representado tanto a través del gráfico de la Fig. 16, donde los datos para las muestras de la localidad de Laguna Lillo (miembro inferior mayormente) indican condiciones áridas a semi-áridas, como por los aportados por el registro florístico, donde se observó una flora más pobre, tanto en diversidad como en abundancia, para el miembro inferior (Cuadro I; Anexo I). La notable escasez de helechos (solamente dos especies de *Asterotheca*, una de *Dizeugotheca*), la predominancia de especies de *Gangamopteris* y *Glossopteris* (especies decíduas con alta adaptabilidad), sumada a la de algunas cordaitales (*Cordaites* sp.) sugieren que las condiciones habrían sido estacionales, con un período de escasez hídrica y temperaturas en aumento. La presencia de licófitas (*Bumbudendron patagonicum* y *Cyclodendron golondrinensis*) sugiere condiciones de relativa humedad y temperaturas más bien cálidas, pero en este caso, podría deberse a condiciones locales en la cuenca, sobretodo desarrolladas a los márgenes de los ríos, o en las planicies de inundación. Faltarían evidencias de índole litológica (evaporitas, marcas de grietas de desecación, por ejemplo) que ayuden a confirmar esto. La evidencia sedimentológica aportada por Jalfin (1987) indica que la depositación del miembro inferior se llevó a cabo en un sistema de ríos entrelazados de baja sinuosidad (ver 5.1). Este tipo de ríos pueden desarrollarse tanto en climas áridos como húmedos, por lo que el aporte de la evidencia sedimentológica no

agrega mayor información para determinar las condiciones relacionadas a los niveles de humedad presentes durante la depositación del miembro inferior.

De acuerdo a lo expresado en el gráfico de la Fig. 16, las condiciones ambientales del miembro medio indicarían un aumento en los niveles de humedad, pasando a estadios mayormente semi-húmedos, creciendo progresivamente la humedad hacia la parte superior del miembro medio (Fig. 16). Como fuera mencionado previamente, el Miembro Laguna Polina habría sido depositado mayormente durante el Guadalupiano (Pérmico Medio). Para ese entonces, la actividad del arco magmático gondwánico habría disminuido o bien, cesado momentáneamente (5.2). La evidencia paleoflorística concuerda con un aumento en las condiciones de humedad, que se habría dado conjuntamente con un incremento progresivo en las temperaturas. La abundancia y diversidad de la flora colectada del Miembro Laguna Polina, sumada a la presencia de varias especies de helechos y licófitas (Cuadro I; Anexo I), evidenciarían mejoras en las condiciones ambientales. Tal cual ocurriera con el miembro inferior, aún no se han registrado características litológicas que indiquen particularmente alguna de estas condiciones ambientales, pero futuros trabajos de campo con una atención enfocada en su hallazgo, pueden aportar la evidencia requerida. Por otra parte, de los datos obtenidos en el gráfico de la Fig. 16, se observan dos (P5, P7) que indican condiciones de semi-aridez, contrastando con la tendencia predominante a un aumento en la humedad ambiental. Respecto a la muestra P5, se puede mencionar que la muestra presentaba alteración leve, por lo que quizás ello influyó en las modas detríticas finales. Respecto a la muestra P7, su ubicación en el gráfico de la Fig. 16 indica condiciones áridas. No he podido deducir las causas para que se genere este resultado en tal muestra, por lo que puedo únicamente especular con un episodio de clima árido intercalado, o un potencial error de muestreo.

Finalmente, la imposibilidad de muestreo del miembro superior hasta el momento no permitió realizar inferencias climáticas para ese miembro. Sin embargo, de acuerdo a la tendencia global, se esperaría que los datos marquen condiciones predominantemente semi-áridas a áridas, dado que el Miembro Dos Hermanos se habría depositado en la parte más

tardía del Pérmico (Lopingiano), cuando las condiciones globales eran de altas temperaturas y marcada aridez. Esto estaría en contraste a la evidencia sedimentológica descrita por Jalfin (1987; Jalfin *et al.*, 1990), en base a la presencia de los abanicos aluviales típicos de condiciones húmedas que se habrían desarrollado. ¿Estaría esto acaso, marcando condiciones locales de humedad? Si es así, ¿qué lo causaría? Hasta tanto no se realice un muestreo, no se puede discutir más al respecto.

Resumiendo, los registros paleobotánicos y sedimentológicos de la Formación La Golondrina estarían evidenciando las tendencias climáticas globales sucedidas a lo largo del Pérmico, donde la flora se desarrolló primeramente bajo condiciones post-deglaciación, caracterizadas por temperaturas templadas con una tendencia a aumentar, y aridez relativa (Miembro Laguna Lillo), para luego desarrollarse bajo condiciones más favorables, con temperaturas más altas y humedad alta (Miembro Laguna Polina). La tendencia indica que durante la depositación del miembro superior, las condiciones bajo las cuales se habría desarrollado la flora habrían sido de mayor temperatura aún, y marcada aridez generada por este aumento de temperatura, pero la falta de datos aún no permite llegar a una conclusión al respecto. A diferencia de otras cuencas pérmicas, como Paganzo, donde hubo una mayor influencia de las condiciones glacial y post-glacial, o Tepuel-Genoa, donde la influencia marina presente durante su depositación ejerció un efecto buffer en las condiciones ambientales (Cúneo, 1986; López-Gamundí *et al.*, 1992; Cúneo, 1996; Limarino *et al.*, 1996; Limarino y Spalletti, 2006; González y Díaz Saravia, 2010), los factores más determinantes que afectaron el clima y por ende, el desarrollo de la flora de la Formación La Golondrina, estarían relacionados con la actividad del arco magmático gondwánico durante el desarrollo del miembro inferior, así como el aumento en la continentalidad a nivel global. Durante los tiempos de depositación del miembro medio, la actividad magmática habría cesado, por lo que las condiciones se habrían atenuado, dando lugar a temperaturas más estables, y niveles de humedad más elevados, aunque en ambos casos, habría habido una marcada estacionalidad, evidenciada sobretodo por la presencia predominante de glossopterídeas y algunas cordaitales, plantas típicamente decíduas

(considerado una adaptación para la supervivencia durante períodos desfavorables) en ambos miembros (Axelrod, 1966; Lele, 1976; Gould y Delevoryas, 1977).

La aplicación del método de análisis paleoclimático a partir del estudio de cortes delgados de areniscas, en conjunción con el control simultáneo de la evidencia paleobotánica, demuestra claramente, aún por medio de estos resultados preliminares, un alto potencial para desarrollar mejores inferencias utilizando este método en toda la Cuenca La Golondrina. En un futuro cercano, se espera poder aumentar el muestreo tanto para el miembro inferior como el medio, así como generar un set de datos del miembro superior, donde queden reflejadas las tendencias paleoclimáticas que sucedieron durante la deposición de la Formación La Golondrina con mayor exactitud.