

UNIVERSIDAD LAVAL

Facultad de Ciencias Forestales y Geomática

Departamento de la Madera y Ciencias Forestales

A solicitud del
*MINISTERIO DE BOSQUES
DE COLUMBIA BRITANICA*
Victoria, Canadá

«Fundamentos de Pedogénesis en el Ecosistema Forestal: Una Aproximación a la Metaestabilidad A Través de la Biología Telúrica»

por
Profesor Gilles Lemieux
Departamento de Ciencia de la Madera y Silvicultura

ORIGINAL FRANCÉS

versión española: Profesor José Marcano

<http://forestgeomat.for.ulaval.ca/brf>

Publicación N° 89

Mayo 1997

Publicado por el
Grupo de Coordinación sobre Madera Rameal
Departamento de la Madera y Ciencias Forestales
Ciudad Québec G1K 7P4
QUEBEC Canadá

Tabla de Contenido

1. INTRODUCCION	1
2. SUELO: DE VALOR FUNDAMENTAL PARA LOS HUMANOS	1
2.1. Una nueva experiencia con los orígenes de la agricultura	2
2.2. Experimentación forestal	3
2.3. Criterios de evaluación	4
2.4. Efecto del pH en la accesibilidad de nutrientes	4
2.5. El caso de <i>Picea glauca</i>	5
2.6. Algunos comentarios en el comportamiento de la <i>Picea glauca</i> en las parcelas de control	5
2.7. <i>Abies balsamea</i> ; supervivencia irregular de las plántulas y parcelas relativamente desfavorables	7
3. CONCLUSIONES INICIALES Y COMENTARIOS	9
3.1. Prisioneros intelectuales del productivismo	11
3.2. Universalidad de la pedogénesis nos lleva a los Trópicos	12
3.3. Composición orgánica de la madera y su contribución a la metaestabilidad a través de la pedogénesis	12
3.4. El primer eslabón con la génesis del suelo	13
3.5. Producción estimada de MRF: billones de toneladas por año	14
3.6. Derivados de la lignina: polifenoles, ácidos alifáticos, terpenos... la base de formación y dinámica del suelo	14
3.7. El conocimiento de la lignina y la pedogénesis obtenido del estudio de la descomposición y degradación	15
'4. MATERIA ORGÁNICA': TÉRMINO SIN CONTENIDO	15
4.1. Primeras referencias a humificación	15
4.2. Desarrollo del conocimiento actual	16
4.3. Descomposición y degradación: una interpretación negativa	16
4.4. MRF: una puerta nueva al conocimiento sobre la pedogénesis	16
4.5. Control biológico y químico de los nutrientes	17
4.6. Razonamiento lógico	17
4.7. Fragmentación	17
5. NUTRIENTES + ENERGIA = ALIMENTO	18
5.1. Pedogénesis y 'composting': las diferencias fundamentales	18
5.2. Principios subyacentes a la MRF	18
5.3. Producción de las fracciones fúlvicas y húmicas	19
5.4. 'Materia orgánica' para la fertilidad agrícola sin significación forestal	19
5.5. Transferencia de nutrientes: un enfoque inequívoco	20
5.6. Ligninas y polifenoles	20
5.7. Controles polifenólicos y regulación biológica	21
5.8. Definición de nutrientes	21
5.9. Organismos microbiológicos en los bosques pluviales tropicales: del suelo al dosel	22

5.10. Agua	22
5.11. Nitrógeno	22
5.11.1. Fijación no simbiótica: N ₂	22
5.11.2. Disponibilidad de nitrógeno	23
5.12. Fósforo y fosfatos	23
6. BIOLOGIA TELURICA: LIMITACIONES DE ADAPTACION	23
6.1. Arrojando alguna luz sobre la dinámica de la biología telúrica	24
6.2. Ecosistemas forestales y generación diferencial del suelo	24
6.3. Enfoque teórico sobre la energía en lugar de los nutrientes	25
6.4. Ochenta por ciento de la energía en forma de fotosintetizados es transferido directamente al suelo	26
6.5. La contribución energética del ecosistema epigeo: la base de la vida terrestre	26
6.6. Fuentes de lignina con polimerización mínima: raíces y ramitas	26
7. ALGUNAS PISTAS PARA COMPRENDER LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS	26
7.1. La forma de los árboles: una breve historia evolucionaria	27
7.2. La pedogénesis bajo las coníferas	28
8. ALGUNAS IDEAS SOBRE LA MADERA RAMEAL	28
8.1. Fertilidad: Una Definición	29
8.2. El impacto de la biotecnología	29
9. PRACTICAS MODERNAS DE SILVICULTURA	29
9.1. Lógico Silvícola versus Agrícola	29
9.2. De regreso a las técnicas silvícolas	30
9.3. Una diferencia necesaria entre Madera del Tronco y Madera Rameal	31
9.4. El papel de los Basidiomicetos	31
9.5. El ciclo del Carbono	32
9.6. Percepción de los desechos de corte y troceado	32
9.7. Salvaguardando una herencia bien ganada	32
9.8. El papel de las micorrizas	33
9.9. Qué hacer con la madera del tallo?	33
9.10. Lignina y Manganeseo	34
9.11. Métodos de fragmentación y tiempo	34
9.12. Potencial de la MRF de conífera y de latifoliada	34
9.13. Energía almacenada en los suelos forestales latifoliados	35
9.14. Los argumentos económicos y logísticos están perdiendo terreno	35
9.15. Ciclo del agua	36
10. RECOMENDACIONES	37
10.1. Experimentación en bosques	37
10.2. Pruebas con hongos	37
10.3. Mesofauna y Microfauna	38
10.4. Hojas de balance del Fósforo y el Nitrógeno	38
10.5. Lignina y Polifenoles	38

11. TRABAJANDO MAS ESTRECHAMENTE CON LA INDUSTRIA DE LA PULPA Y EL PAPEL	39
11.1. Ciencia básica	39
12. LA NECESIDAD DEL ENVOLVIMIENTO DE INSTITUTOS DE INVESTIGACION Y UNIVERSIDADES AL NIVEL INTERNACIONAL	39
12.1. De la Filosofía a la Física	39
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	40

Indice de Tablas

Tabla 1. Cambios comparativos en pH cuatro años.....	6
Tabla 2. Distribución de plántulas de <i>Picea glauca</i> en parcelas tratadas.....	7
Tabla 3. Distribución de plántulas de <i>Picea glauca</i>	8
Tabla 4. Distribución en parcelas de plántulas de <i>Abies balsamea</i> ,.....	8
Tabla 5. Distribución de plántulas de decíduos desde 1984 a 1990	9
Tabla 6. Distribución de plántulas en parcelas con MRF desde 1984 a 1990..	10

Fundamentos de Pedogénesis en el Ecosistema Forestal: Una Aproximación a la Metaestabilidad a través de la Biología Telúrica

1. Introducción

Los siguientes razonamientos y conclusiones deben ser vistos y evaluados en el contexto de nuestra "aventura" de veinte años. El escepticismo continuo y la resistencia frecuente hacia nuestra investigación hicieron virtualmente imposible el financiamiento en todos los niveles: el sector forestal nos enviaría hacia el sector agrícola y viceversa. Por otro lado, esto nos permitió mayor libertad en nuestra experimentación y, ahora, libertad de palabra.

Aún más, nos permitió evaluar la degradación del pensamiento científico en el campo biológico, particularmente en los sectores forestales y agrícolas. Rápidamente se puso en evidencia que la búsqueda de datos había sustituido la búsqueda de ideas: la ciencia en conflicto con la técnica gobernada por la tecnología.

Igualmente sorprendentes fueron numerosos otros hallazgos, tales como el origen y la definición de la terminología, que se interponen en el camino del desarrollo del conocimiento básico. Por ejemplo, aunque los mecanismos pedogenéticos tienen sus orígenes en la silvicultura, ellos o forman parte del vocabulario agrícola o son ignorados por ella. Mientras que las técnicas forestales específicas debieron haber sido desarrolladas hace tiempo, la tendencia ha sido en prestar o copiar los datos y costumbres agrícolas. Similarmente, nuestro concepto y conocimiento de los suelos agrícolas están basados únicamente en referencia a la química y la patología, nunca referentes al bosque. En ambos casos, nos parece que la pedología ha sido enfocada únicamente en un nivel descriptivo o, peor aún, desde una perspectiva de propiedades químicas y físicas. Pero, en realidad, la pedología es mucho más que sólo química y física.

Por lo tanto, esperamos que los lectores serán capaces de apreciar la historia agroforestal del suelo y meditarán tanto sobre su importancia como en la ausencia de conocimiento relacionado, aunque sea desde un punto de vista descriptivo.

2. Suelo: De valor fundamental para los humanos

Las pasadas dos décadas han, subrepticamente, contribuido con datos que, en retrospectiva, han llevado a una visión antropogénica y un conocimiento de los ecosistemas que, hasta ahora, han sido raramente contradichos. Estando más preocupado en encontrar alimento para sobrevivir, el hombre ha prestado poca atención a la fuente de ese alimento y al enlace con todas las otras formas de vida: el suelo. El término humus ha existido por apenas un siglo y, aunque lo

más probable es que tenga un origen antropocéntrico, apenas contiene una connotación velada de vida.

Para poder sobrevivir, el hombre ganó gradualmente control sobre el bosque, tumbando los árboles y trabajando la tierra para domesticar y cultivar plantas para alimento. A lo largo de los siglos, hemos llegado así a considerar al suelo agrícola como la fuente de toda la vida. Sin embargo, esta noción se desvanece a medida que uno se distancia de los trópicos y que se aproxima a los polos. Similarmente, las sociedades que dependen de, y están en sintonía con, la naturaleza y sus limitaciones no tienen el mismo punto de vista que aquellas que viven de los frutos de la naturaleza mientras controlan sus limitaciones, tales como las sociedades industriales.

2.1. Una nueva experiencia con los orígenes de la agricultura

Para poder desentrañar el laberinto de pensamientos e hipótesis contenido en este documento, debemos regresar a los años 70, cuando tres investigadores¹ tuvieron la idea de explotar miles de toneladas de residuos de la destilación al vapor de las ramas en la producción de aceites esenciales. Estos residuos industriales estaban compuestos exclusivamente de ramas partidas en pedacitos de siempreverdes (*Abies balsamea* y *Thuja occidentalis*) que se consideran sin uso y, por lo tanto, un desecho. Los investigadores tuvieron la idea de usar estos residuos como "mulch" para cultivar papas, trigo, avena, fresas, etc. Pero, primero, enviaron el material al laboratorio para su análisis y descubrieron que tenía un valioso contenido químico y bioquímico (**Guay, Lachance & Lapointe, 1982**). Exámenes posteriores mostraron que las ramas en pedacitos de árboles siempreverdes o decíduos incorporadas en la capa superior del suelo tenían efectos diferentes luego de varios años.

La técnica propuesta por estos autores es una combinación de la técnica de "sheet composting"² usada en los Estados Unidos y el "brush composting"³ usada por los franceses. Ramas menores de 7 cm en diámetro fueron divididas en pedacitos de apenas unos pocos centímetros y luego esparcidas sobre el suelo en una dosis de 200 m³/ha, un espesor de 2 cm, e incorporadas en los 10 cm superiores del suelo. En un período de varios años, se obtuvo resultados variados.

Cuando me pidieron que explicara estas diferencias en producción, Guay, Lachance y Lapointe me lanzaron un reto al cual no me pude negar. Para mi gran sorpresa, fui incapaz de encontrar algún artículo sobre algo que, en mi mente, era una fuente importante de producción vegetal; en ese entonces, estimé la

¹ **Edgar Guay**, Vice Ministro, Ministerio de Bosques, Québec; **Lionel Lachance**, Agrónomo, Director del Departamento de Producción Vegetal, Ministerio de Agricultura, Québec; **R. Alban Lapointe**, Ingeniero Forestal, Ministerio de Bosques, Québec.

² "Composting" en superficie [Nota del traductor]

³ Método Jean Pain [Nota del traductor]

Departamento de la Madera y Ciencias Forestales
Universidad Laval, Quebec, Canadá.

producción mundial de ramas en unos pocos billones de toneladas por año. En mi primera publicación principal, en 1985, propuse el término "Bois Raméal"⁴ (Lemieux & Lapointe, 1985), el cual describí en detalle un año más tarde (Lemieux, 1986).

Los resultados agrícolas obtenidos al añadir ramitas picadas en el suelo superior; esto es, mejoramiento de la subestructura y textura del suelo, cambios positivos en la relación C/N y en el pH, y la modificación del comportamiento de las malezas, insectos y enfermedades, prueban que estamos enfrentados a un fenómeno muy importante que había sido ignorado por la literatura científica.

A principios de los años 90, encontramos dos publicaciones significativas que nos pusieron en un camino promisorio. La primera la vegetación (ecosistema epigeo). Sus estudios estaban dirigidos a la comprensión y descripción de las relaciones entre los varios niveles tróficos en los cuales las micorrizas juegan un papel vital.

2.2. Experimentación forestal

Aunque la experimentación agrícola nos dio el sustento para el pensamiento y nos orientó en la dirección correcta, estábamos lejos de comprender los mecanismos básicos que causaban los cambios observados. Si las ramas picadas eran responsables de varias modificaciones del suelo, tales como contenido en nutrientes, cambios en pH, producciones (calidad y cantidad), no estaban claras las razones. Postulamos que estos mecanismos tenían algún tipo de origen forestal, sin ser capaces de encontrar pistas en la literatura existente. En la primavera de 1983, establecimos nuestro primer sitio de investigación, seguido por otros en 1984, 1985, 1988, 1990 y 1992, con cada sitio teniendo un historial diferente.

Con el auxilio del Dr. Marcel Goulet, seleccionamos un sitio de una hectárea que se sabía ser estéril por los pasados 50 años pero estaba completamente rodeado por bosque, asegurando así la disponibilidad de semillas para la generación natural. Se establecieron pequeñas parcelas de 2 a 4 m² en tamaño y se esparció una capa de espesor de 1.5 a 2.0 cm de MRF formando una cubierta o incorporado en unos pocos centímetros superiores del suelo, con una parcela control establecida arriba de cada línea.

Las pruebas agrícolas habían demostrado una alteración en varios parámetros telúricos durante un período de un año, siempre con un mejoramiento en las características físicas, fisicoquímicas y químicas. Concluimos en que estábamos frente a una serie de fenómenos biológicos que afectaban significativamente a todos los factores al mismo tiempo. Basados en esta

⁴ Madera Rameal (MRF)[Nota del traductor]
Departamento de la Madera y Ciencias Forestales
Universidad Laval, Quebec, Canadá.

hipótesis, se decidió que todas las parcelas tenían que estar sujetas a las mismas condiciones y restricciones, lo que significaba establecer pequeñas parcelas separadas un metro para así evaluar mejor las discrepancias en el desarrollo post MRF.

2.3. Criterios de evaluación

Mientras que los criterios de evaluación usados en agricultura están bien establecidos, esto es, rentabilidad, productividad, salud del cultivo, etc. con relación a la disponibilidad *in situ* de nutrientes, lo mismo no puede decirse de la silvicultura. Así que para no perder tiempo, inmediatamente decidimos realizar nuestras observaciones durante un mínimo de cinco años midiendo la regeneración y el crecimiento de especies vegetales nativas y no nativas en los rodales locales. La regeneración fue medida contando cada año el número de nuevas plantas en cada parcela durante los cinco años. La regeneración en las parcelas controles fue medida cada dos años. Durante los dos años finales, también colectamos muestras del suelo superior para probar y evaluar la metabolización de la MRF en comparación a las parcelas de control.

El reporte de nuestro trabajo publicado en 1989 (**Lemieux & Lapointe, 1989**) es demasiado largo y complejo para intentar resumirlo aquí; sin embargo, nos referiremos a él para datos relevantes.

2.4. Efecto del pH en la accesibilidad de nutrientes

Por ejemplo, si vemos los cambios en el pH comparados con las parcelas control desde el cuarto hasta el séptimo año luego de la aplicación de MRF para determinar si ha habido una metabolización completa (Tabla 1), podemos ver que los valores en 1990 fueron casi idénticos a los de 1983, el primer año de la prueba.

Hemos escogido este parámetro fisicoquímico debido a que éste muestra el balance de los iones H^+ y OH^- , lo que a su vez es responsable de la disponibilidad de ciertos nutrientes o de la disponibilidad disminuida de otros, como es el caso del fósforo.

Los parámetros restantes fueron escogidos debido a que ellos están directamente ligados a los resultados biológicos. Después de todo, la meta de la prueba era encontrar una manera de evaluar la recolonización de los ecosistemas forestales. La medición temporal y espacial de la regeneración usando un sitio forestal real nos pareció ser la única alternativa al análisis cuantitativo de nutrientes, que siempre hemos considerado como dudoso.

La producción de madera del tallo es una función de la fotosíntesis en la copa. Desde esta perspectiva, puede verse la madera como resultado de la sobreproducción y no como producción en sí ya que, como ha sido subrayado por

varios autores, el 80% de la producción de energía por un árbol es transportado directamente al ecosistema hipogeo⁵.

Subsecuentemente postulamos que durante la metabolización la MRF genera características telúricas que promueven nuevos niveles de sucesión vegetal, creando un nuevo ecosistema forestal. Entonces limitamos nuestro trabajo a contar e identificar las plántulas en las parcelas, diferenciando entre árboles, arbustos (coníferas y decídúos), plantas herbáceas y plantas no nativas.

2.5. El caso de *Picea glauca*

La tabla 2 muestra los resultados obtenidos luego de seis años para *Picea glauca*, incluyendo germinación y éxito en el crecer.

2.6. Algunos comentarios en el comportamiento de la *Picea glauca* en las parcelas de control

En 1984, no se observó una simple plántula de *Picea glauca* en ninguno de las parcelas de control (Columna 1, Tabla 2), indicando que este ambiente forestal en particular no propiciaba la germinación, aún cuando había una abundancia de semillas cada año. Se observaron plántulas de *Picea glauca* en 1990, pero ya para 1995 no quedaba ninguna y las parcelas eran lo mismo que en 1983.

De las 25 especies de MRF, solamente 10 parcelas de control tenían plántulas de *Picea glauca*. Todas las plántulas habían desaparecido para el conteo de 1995, mientras que aquellas en las parcelas tratadas con MRF no sólo estaban aumentado en número sino que estaban prosperando. Este comportamiento impredecible es indicativo de inestabilidad biológica constante y demuestra que la germinación y la supervivencia no van apareados. No hemos dado datos para 1984 y 1995, ya que no se contaron plántulas. Y aún cuando se observó germinación en 1990, ninguna plántula quedaba en 1995.

Luego de siete años, ninguna de las parcelas de coníferas tenía abeto balsámico: las plántulas morían tan pronto germinaban. Este mismo fenómeno fue observado cada año, con *Abies balsamea* de rodales vecinos asegurando una abundancia de semillas. Esta inestabilidad puede verse en la Tabla 4, que muestra que aún las parcelas exitosas para las plántulas (*Alnus rugosa*, *Carpinus caroliniana*, *Quercus rubra*) habían disminuido en número para 1990. Esto nos llevó a nuestra primera conclusión: **La biología y bioquímica de suelo tratado con MRF no son apropiadas para el abeto por razones que garantizan estudios posteriores.**

⁵ Fogel, R. & Hunt, G. (1983); Mayer, J. R. & Linderman, R.G. (1986); Rambelli, A. (1973); Reid, C.P.P. & Mexal, J.G. (1977); Vogt, K.A., Grier, C.C. & Meier, C. E. (1982); Whipps, J.M. & Lynch, J.M. (1986).
Departamento de la Madera y Ciencias Forestales
Universidad Laval, Quebec, Canadá.

En contraste a *Picea glauca*, las plántulas de *Abies balsamea* fueron incapaces de enraizar, aún cuando, casi todos los años, eran abundantes las semillas de rodales vecinos.

**Tabla 1. Cambios comparativos en pH cuatro años
 luego de la aplicación de MRF**

MRF	testigos	'87	'88	'89	'90
<i>Coníferas</i>					
Larix laricina	4.0	5.3	5.1	5.0	4.7
Pinus resinosa	5.1	5.5	5.6	5.2	4.7
Pinus strobus	5.1	5.8	5.7	5.6	5.5
Thuja occidentalis	5.1	6.0	6.5	6.0	5.3
<i>Decíduos de transición</i>					
Acer rubrum	5.1	5.3	5.2	5.2	4.9
Acer spicatum	5.0	5.5	5.4	5.1	4.8
Alnus rugosa	5.0	5.5	5.3	5.1	4.6
Amelanchier bartramiana	4.9	5.8	6.1	5.3	5.4
Betula populifolia	5.1	5.8	5.7	5.4	5.1
Comus rugosa	5.1	5.5	5.4	5.3	5.0
Populus balsamifera	5.3	5.7	5.9	5.6	5.2
Populus grandidentata	4.9	6.1	6.5	5.7	5.6
Populus tremuloides	5.0	5.9	6.2	5.4	5.3
Prunus pensylvanica	4.9	5.5	5.5	5.2	5.1
Salix bebbiana	5.0	5.7	5.6	5.3	5.1
Salix lucida	5.1	5.2	5.5	5.1	4.9
Sambucus pubens	5.0	5.2	5.6	5.0	4.9
<i>Decíduos climácicos</i>					
Betula alleghaniensis	5.0	5.1	5.1	5.0	4.8
Carpinus caroliniana	5.0	6.0	5.7	5.3	5.2
Fraxinus americana	4.9	5.5	5.7	5.0	4.9
Juglans cinerea	4.8	5.7	5.7	5.7	5.5
Prunus serotina	5.1	5.6	5.2	5.2	5.1
Quercus rubra	5.0	5.6	5.4	5.1	4.8
Tilia americana	5.0	5.0	5.8	5.4	5.0
Ulmus americana	5.0	5.6	6.1	5.2	5.2

De: Guay, E., Lachance, L, Lapointe, R.A. & Lemieux, G. (1991)

Tabla 2. Distribución de plántulas de *Picea glauca* en parcelas tratadas con MRF, 17/19 especies, 1984 a 1990

MRF	'84	'85	'86	'87	'88	'90
Coníferas (2/4)						
Larix laricina				1	4	8
Pinus resinosa					1	1
Decíduos de transición (9/13)						
Acer rubrum					2	2
Acer spicatum				2	3	3
Alnus rugosa				3	10	15
Betula populifolia				4	7	6
Comus rugosa			1	2	4	5
Populus grandidentata					1	0
Prunus pensylvanica					1	1
Salix lucida					1	2
Sambucus pubens					2	1
Decíduos climácicos (6/8)						
Carpinus caroliniana				8	21	28
Fraxinus americana				2	2	3
Juglans cinerea					3	4
Prunus serotina					1	2
Quercus rubra			1	4	4	5
Tilia americana				4	7	13

De: Guay, E., Lachance, L., Lapointe, R.A. & Lemieux, G. (1991)

2.7. *Abies balsamea*: supervivencia irregular de las plántulas y parcelas relativamente desfavorables

Si el abeto balsámico era virtualmente incapaz de enraizar en suelos nuevos, ¿cómo se comportaron los decíduos bajo las mismas condiciones (Tabla 5)? Justo igual que con el abeto balsámico, las parcelas de coníferas fueron totalmente desfavorables para la germinación y crecimiento de decíduos, aún de decíduos de transición. Sin embargo, las parcelas de decíduos de transición fueron más favorables a la germinación y crecimiento de plántulas de decíduos (Tabla 5), todos de transición (Tabla 6); ningún decíduo climácico fue observado alguna vez en estas parcelas. Es interesante notar que las parcelas compuestas de especies climácicas dominantes tuvieron un mayor número de plántulas de especies diferentes. Esto condujo a nuestra segunda conclusión: **Las parcelas tratadas con MRF de decíduos fueron más favorables que aquellas tratadas con MRF de coníferas, aunque mostraban una cierta inestabilidad en el crecimiento individual y en rodal. Igualmente, las parcelas tratadas con MRF de decíduos climácicos dominantes mostraron una mayor tolerancia a la germinación y crecimiento de decíduos.**

Tabla 3. Distribución de plántulas de *Picea glauca* en parcelas control, 1990

MRF	
<i>Coníferas (2/4)</i>	
Larix laricina	8
Pinus resinosa	1
<i>Decíduos de transición (5/13)</i>	
Acer rubrum	2
Acer spicatum	3
Comus rugosa	2
Populus grandidentata	2
Salix lucida	2
<i>Decíduos climácicos (3/8)</i>	
Fraxinus americana	3
Quercus rubra	4
Tilia americana	1

De: Guay, E., Lachance, L., Lapointe, R.A. & Lemieux, G. (1991)

Tabla 4. Distribución en parcelas de plántulas de *Abies balsamea*, 1984 a 1990

MRF	'84	'85	'86	'87	'88	'90
<i>Coníferas (0/4)</i>	-	-	-	-	-	-
<i>Decíduos de transición (2/13)</i>						
Alnus rugosa				1	1	0
Comus rugosa			2	1	1	2
<i>Decíduos climácicos (4/8)</i>						
Betula alleghaniensis				1	1	1
Carpinus caroliniana			1	1	1	0
Quercus rubra			2	1	1	1
Tilia americana				2	2	4

De: Guay, E., Lachance, L., Lapointe, R.A. & Lemieux, G. (1991)

Tabla 5. Distribución de plántulas de decíduos desde 1984 a 1990

MRF	'84	'85	'86	'87	'88	'90
Coníferas (1/4)						
<i>Pinus strobus</i>	-	1	1	1	1	1
Decíduos de transición (8/13)						
<i>Acer rubrum</i>			1	0	0	0
<i>Acer spicatum</i>				1	1	1
<i>Alnus rugosa</i>		2	2	7	7	6
<i>Amelanchier bartramiana</i>				3	2	1
<i>Betula populifolia</i>	1	1	1	1	2	2
<i>Comus rugosa</i>			21	22	20	15
<i>Populus tremuloides</i>	1	0	3	1	1	2
<i>Sambucus pubens</i>		1	0	0	0	0
Decíduos climácicos (6/8)						
<i>Betula alleghaniensis</i>				1	1	1
<i>Carpinus caroliniana</i>	1	0	4	7	6	3
<i>Fraxinus americana</i>		1	2	2	2	3
<i>Quercus rubra</i>	3	2	21	9	17	9
<i>Tilia americana</i>		1	4	0	1	3
<i>Ulmus americana</i>		1	3	3	3	6

De: Guay, E., Lachance, L, Lapointe, R.A. & Lemieux, G. (1991)

Es bastante claro, de la Tabla 6, que, luego de 7 años, las parcelas de coníferas fueron desfavorables para la germinación de decíduos, con la única excepción del pino blanco (*Pinus strobus*), una especie frecuentemente encontrada en bosques decíduos climácicos. Las parcelas de decíduos de transición fueron más propicias al establecimiento tanto de coníferas como de decíduos, pero en menor extensión que las especies climácicas. Conclusión: Los rodales de lárice (*Larix laricina*) son más apropiados para las plántulas de coníferas, mientras que los rodales de decíduos de transición son más apropiados tanto a coníferas como a decíduos, mostrando, sin embargo, un cierto grado de inestabilidad. Las especies dominantes del bosque climácicos también son propicias a coníferas y decíduos, aunque nunca se observó alguna especie climácica en nuestras parcelas.

3. Conclusiones iniciales y Comentarios Como los primeros experimentos agrícolas usando MRF habían mostrado un mejoramiento claro en producción, modificación de la estructura del suelo, disminución o cambio en plantas adventicias, y una disminución en las enfermedades fúngicas y parásitos, concluíamos que estábamos tratando con un fenómeno biológico, más que químico o físico. Los resultados obtenidos con la prueba de regeneración del bosque fortalecieron nuestra convicción. Concluimos que los mecanismos involucrados en la Pedogénesis eran de origen biológico datando de hace millones de años.

Tabla 6. Distribución de plántulas en parcelas con MRF desde 1984 a 1990

MRF	coníferas	decíduos	
		de transición	climácicos
Coníferas			
Larix laricina	8	-	-
Pinus resinosa	1	-	-
Pinus strobus	-	1	-
Thuja occidentalis	-	-	-
Decíduos de transición			
Acer rubrum	2	2	-
Acer spicatum	3	2	-
Alnus rugosa	15	8	-
Amelanchier bartramiana	2	-	-
Betula populifolia	6	3	-
Comus rugosa	7	18	-
Populus balsamifera	4	1	-
Populus grandidentata	-	-	-
Populus tremuloides	3	2	-
Prunus pensylvanica	1	2	-
Salix bebbiana	1	1	-
Salix lucida	5	-	-
Sambucus pubens	1	2	-
Decíduos climácicos			
Betula alleghaniensis	1	1	-
Carpinus caroliniana	28	8	-
Fraxinus americana	3	3	-
Juglans cinerea	4	-	-
Prunus serotina	2	1	-
Quercus rubra	7	15	-
Tilia americana	17	5	-
Ulmus americana	1	6	-

De: Guay, E., Lachance, L., Lapointe, R.A. & Lemieux, G. (1991)

La revisión de numerosa literatura científica nos convenció, aún más, de que estábamos entrando en un campo nuevo de la ciencia y la tecnología hasta ahora relativamente ignorado, aún cuando trataba con la raíz de toda la vida sobre la Tierra como la conocemos hoy. Claramente se entendía que estábamos tratando con un fenómeno natural que, por varias décadas, estaba siendo investigado desde el punto de vista de degradación, esto es, productividad reducida, diversidad y actividad biológica, en lugar de mejoramiento del suelo. Nuestra opinión era de que éste era un proceso de mejoramiento orientado al bosque que, eventualmente, permitiría la reintroducción y mantenimiento de los mecanismos de control de la fertilidad.

Sin embargo, todavía estamos lejos de entender los pormenores del asunto, especialmente debido a que la literatura era virtualmente silente tanto en relación con la madera rameal fragmentada como sobre los mecanismos biológicos que controlan la fertilidad. Teníamos que explicar lo que estábamos observando. El asunto era inquietante ya que estos mecanismos todavía estaban presentes y aún aumentaban de magnitud en el tiempo. Tomó más de seis años de investigación intensiva antes de que pudiéramos dedicar nuestra atención a los mecanismos biológicos, bioquímicos y químicos subyacentes a la Pedogénesis, proceso que resultaba de retroalimentación entre los ecosistemas hipogeo y epigeo.

3.1. Prisioneros intelectuales del productivismo

Más de una vez hemos encontrado que casi toda la literatura agrícola y forestal trataba de los medios de aumentar la producción mientras se minimiza las pérdidas a través de una aproximación contable, ¡como si pudiera existir una!

La terminología bajo escrutinio demostró que los principios agrícolas, y aún la tecnología, son igualmente aplicados en silvicultura. Materia orgánica, fertilizantes, plaguicidas, fungicidas, enfermedades virales, bacterianas o fúngicas, plagas, infestaciones, cosecha, recogida de semillas, semilleros, plantaciones, todas palabras con una connotación agrícola. Es importante comprender que este enfoque antropocéntrico explica el por qué hay tan pocos estudios de los mecanismos que controlan los ecosistemas forestales, excepto en términos de la química, física, fisicoquímica y campos relacionados tales como fisiología, genética, botánica, micología, entomología, etc. Pedogénesis: mecanismos universales enraizados en la silvicultura.

Para estar en capacidad de incrementar la productividad y alterar la estructura y propiedades bioquímicas del suelo sin usar fertilizantes, tendríamos que empezar a pensar en términos de mecanismos universales. Postulamos que mientras los humanos vean la agricultura como la base económica de la vida, históricamente no es así, ya que la agricultura confiaba en los mecanismos biológicos de fertilización antes de reemplazarlos con sólo mecanismos químicos. La producción se volvió la meta, y la agricultura pasó de génesis controlada a la modificación genética de las plantas.

Es obvio que las técnicas desarrolladas por la agricultura y copiadas por la silvicultura son técnicas orientadas a la producción que no tienen que ver con los mecanismos fundamentales; de hecho, es todo lo contrario, son métodos abreviados diseñados para producir beneficios inmediatos. Tanto la agricultura como la silvicultura alientan el aumento de la inestabilidad en lugar del mantenimiento y mejoramiento de la metaestabilidad (**Godron & Lemieux, 1996**), la meta en todos los ecosistemas. Esto nos permite envisionar el uso eventual de la MRF como un agente mejorante, no solamente por la adición de nutrientes químicos sino, lo cual es más importante, por un incremento de la estabilidad de

los ecosistemas telúricos. Entramos, así, en el debate de la física moderna y, particularmente, las contribuciones de Prigogine⁶ a la termodinámica no en equilibrio. Del mundo de la química y del productivismo, nos encontramos en el medio de uno de los debates más importante del siglo 20, implicando a la física y la filosofía que dieron origen a las teorías del caos y del "big bang".

3.2. Universalidad de la Pedogénesis nos lleva a los Trópicos

Basado en los recientes resultados en parcelas y los hallazgos del año anterior, decidimos realizar algunas pruebas bajo condiciones tropicales, donde las producciones esperadas y la eficiencia de los mecanismos no serían afectadas ni por el agua ni por el calor. Los primeros ensayos se realizaron en 1992 (**Lemieux, 1993**) en Senegal, Africa, y luego en 1994 en la República Dominicana (**Lemieux y Marcano, 1994**). Los resultados agrícolas preliminares fueron iguales a los obtenidos en Quebec. En cuanto a los experimentos en silvicultura, la única institución interesada fue Falconbridge Dominicana, la cual no respetó ciertos aspectos de las técnicas por lo que falló en obtener resultados significativos.

Una revisión reciente de la literatura añadida a los resultados obtenidos nos permite exponer algunos argumentos e hipótesis. Ellos forman el trasfondo de la Pedogénesis y apoyan nuestra profunda convicción de que todos los mecanismos pedogenéticos tienen un origen en los bosques tropicales. En los inicios de los estudios, **Guay et al. (1982)** habían notado que cuando la proporción de MRF de coníferas excedía el 20%, la fertilidad decrecía, y con 100% de MRF de coníferas las producciones eran muy bajas. Entonces se originó una pregunta: "**¿Cuál era la diferencia entre coníferas y latifoliadas, en términos de interacción en el suelo, ya que los análisis químicos habían demostrado solamente diferencias insignificantes entre los dos?**"

3.3. Composición orgánica de la madera y su contribución a la metaestabilidad a través de la Pedogénesis

Antes de entrar en asuntos más complejos, necesitamos examinar la percepción tradicional de madera. Desde hace mucho se sabe que el aserrín, la corteza y otras maderas "de desecho" tienen un efecto negativo sobre el suelo, aún en los bosques, donde ellos no generan fertilidad. Para la industria forestal, estos residuos tienen solamente un valor negativo y mientras más rápido ellos desaparezcan, mejor es. Hay una diferencia entre madera caulinar⁷ y la madera rameal⁸, y también hay una diferencia significativa entre el tipo de suelo desarrollado bajo coníferas y bajo latifoliadas.

⁶ **Ilya Prigogine**, ganador del premio Nobel de química.

⁷ La madera caulinar (del tronco) se relaciona con el tronco que es considerado como madera, donde la lignina está altamente polimerizada y la corteza contiene polifenoles, taninos, resinas y una alta tasa de manganeso, con frecuencia tóxica para varios niveles microbiológicos. Tiene una relación C/N que varía desde 400/1 a 700/1.

⁸ Neologismo corrientemente conocido y escrito como **MRF** (Madera Rameal Fragmentada) porque se relaciona a la técnica de reciclaje biológico de nutrientes. Su definición en el árbol es arbitraria hasta cierto punto debido a que todas las ramas con un diámetro superior a 7 Departamento de la Madera y Ciencias Forestales
Universidad Laval, Quebec, Canadá.

Todas las plantas están generalmente compuestas de celulosa, hemicelulosa y lignina, resultantes de la síntesis de la glucosa. En los árboles, la fotosíntesis produce estos mismos tres compuestos asociados en un proceso continuo y son almacenados para energía. Una consecuencia física de esto es el endurecimiento gradual de los tallos y su crecimiento en diámetro. Ya que la madera caulinar contiene muy pocos nutrientes aparte de los del cambium, su papel es ofrecer un apoyo físico a las ramas lo mismo que como acceso a los nutrientes, en lugar de jugar algún papel biológico o dinámico.

La lignina es el único constituyente básico de la madera que muestra diferencias significativas en estructura. Esta es una de las macromoléculas naturales más compleja y menos comprendida ya que siempre ha sido percibida como un producto sin valor de la industria de la pulpa y papel y responsable grandemente de la contaminación de aguas. Sin embargo, sabemos que las Gimnospermas (coníferas), Dicotiledóneas y Monocotiledóneas contienen tipos diferentes de lignina. En las Dicotiledóneas, la lignina está bajo la forma de anillos aromáticos simétricos con dos grupos metoxilos (OCH_3) o lignina siringuil, mientras que en las coníferas la lignina se caracteriza por anillos asimétricos con solamente un grupo metoxilos, o lignina guayacil. Las Monocotiledóneas contienen ambos tipos, junto con un tercero caracterizado por anillos aromáticos sin grupos metoxilos.

3.4. El primer eslabón con la génesis de suelo

Las Dicotiledóneas (latifoliadas) producen suelos marrones complejos, estables basados en agregados, con una gran biodiversidad de microfauna y microflora en los ecosistemas hipogeos y de macroflora en los ecosistemas epigeos. En contraste, en los bosques de coníferas, los suelos podzólicos están relacionados con la precipitación del hierro en los horizontes inferiores y una acumulación de tejidos vegetales en la superficie, subyacentes a los problemas de reciclaje apropiado de nutrientes. Hay menos biodiversidad en el suelo, particularmente en el ecosistema epigeo, donde la diversidad de especies es limitada. Por lo tanto, los ecosistemas están bajo dos mecanismos básicos: "megabiodiversidad" y "oligobiodiversidad", o diversidad grande y diversidad mínima.

Bajo las Monocotiledóneas, el suelo está normalmente formado por agregados oscuros, con frecuencia, inestables en agua. Este tipo de suelo ocurre solamente en regiones con poca precipitación (esto es, pampa, estepas, praderas). Hay una acumulación de residuo vegetal mayor de lo puede ser manejada por la combustión enzimática debido a la ausencia de agua. Aunque

fértil, este tipo de suelo es frágil y fácilmente degradable por la agricultura intensiva, soportando solamente poblaciones humanas pequeñas.

3.5. Producción estimada de MRF: billones de toneladas por año

Como se dijo anteriormente, la literatura científica falla en proveer una descripción precisa o nombre para la parte extremadamente importante de árboles y arbustos que son las ramas. Las ramas son los lugares de fotosíntesis y, por lo tanto, donde se hacen los tejidos vegetales a partir de moléculas de glucosa. La producción mundial de ramas puede estimarse en billones de toneladas anuales. Solamente en Quebec, probablemente alrededor de 100,000,000 toneladas (verdes) basados en datos del programa ENFOR, y no incluye especies no comerciales tales como arbustos.

En 1986, sugerimos el nuevo término de "**ramial wood**"⁹ para este material biológico que hasta ahora había sido tratado como desecho industrial y como molestia. Junto con celulosa, hemicelulosa y lignina, la madera rameal contiene proteínas, todos los aminoácidos, la mayoría de los azúcares y almidones, y polisacáridos derivados. Esto es en adición a incontables sistemas enzimáticos, hormonas, polifenoles, aceites esenciales, terpenos, taninos, etc., todos asociados en grados variados, con los nutrientes básicos requeridos para la síntesis y regulación de organismos vivos.

Muchos de estos compuestos, tales como enzimas, aminoácidos y varias proteínas, son extremadamente frágiles. Otros, tales como azúcares, celulosa y hemicelulosa, son fuentes inmediatas de energía. La lignina, una molécula tridimensional, es una de las moléculas más compleja de la naturaleza y una fuente importante de energía, aunque no fácilmente disponible ya que se encuentra en anillos aromáticos que no son rotos fácilmente por los organismos vivos: protozoos, bacterias y, significativamente, basidiomicetos. Concluimos que la principal diferencia se encuentra en la estructura de la lignina y, consecuentemente, en la forma en que sucede la despolimerización.

3.6. Derivados de la lignina: polifenoles, ácidos alifáticos, terpenos... la base de formación y dinámica del suelo

Las primeras hipótesis que trataban del papel principal jugado por la lignina en la Pedogénesis fueron formuladas hace casi un siglo. Los trabajos de investigación de recientes décadas han mostrado a la lignina como un contaminante para acelerar su descomposición. En los últimos años, numerosos autores han reportado comentarios y conclusiones en cuanto a la estructura y patrones de desarrollo de esta molécula; entre ellos, **Erikson et al.** (1990),

⁹ **Madera rameal** [Nota del traductor].
Departamento de la Madera y Ciencias Forestales
Universidad Laval, Quebec, Canadá.

Rayner & Boddy (1988). Los basidiomicetos juegan un papel vital en el proceso de transformación, al igual que las bacterias, aunque estas últimas generalmente contribuyen únicamente a la descomposición.

De la glucosa, se forma alcohol coniferil, lo que resulta en una lignina monomérica que se polimeriza cada vez más. Los anillos aromáticos, los más importantes en términos de estructura y contenido energético, se volverán los elementos principales de la estructura estable del suelo.

Obviamente, esta estructura altamente polimerizada puede ser alterada para producir polifenoles, ácidos alifáticos, aceites esenciales, terpenos, taninos, etc., los cuales pueden afectar el metabolismo de la planta y los varios niveles tróficos de la cadena alimenticia.

Por ejemplo, los taninos combinados con las proteínas son responsables de que las hojas se tornen marrones, y evitan la descomposición de las hojas lo mismo que la pérdida de nutrientes valiosos. Sin embargo, solamente unas pocas bacterias, asociadas principalmente con la microfauna o macrofauna, tienen los sistemas enzimáticos necesarios para descomponer los taninos y liberar las proteínas y sus nutrientes químicos. Por lo tanto, la tendencia es de enfocar el reciclaje de nutrientes desde la perspectiva de derivados de la lignina, aún cuando permanecemos fuertemente convencidos de que primero debemos entender y mejorar nutrición. **Por lo tanto, necesitamos comprender la nutrición del suelo e identificar los componentes responsables para la distribución de energía y nutrientes.**

3.7. El conocimiento de la lignina y la pedogénesis obtenido del estudio de la descomposición y degradación

Casi toda la literatura científica publicada hasta ahora trata solamente con el desarrollo de la lignina y la celulosa desde una perspectiva de degradación de la madera. Esta aproximación estorba seriamente nuestros intentos en comprender los mecanismos pedogenéticos y, consiguientemente, la comprensión de las pruebas inexplicables realizadas entre 1978 y 1986. Podríamos comentar nuestras observaciones y datos, como se reportan en numerosas publicaciones: **Guay et al. (1982), Lemieux & Lapointe (1985), Lemieux & Lapointe (1989), Lemieux & Lapointe (1990), Lemieux & Toutain (1992).**

4. "Materia Orgánica": término sin contenido

4.1. Primeras referencias a humificación

Unos pocos años más tarde y frente a alteraciones continuas en el suelo y en el color, concluimos que estábamos tocando los mecanismos pedogenéticos, ya que las enmiendas tradicionales del suelo no tenían una base científica aparte

de la **mineralización**, un término grandemente inspirado por la agricultura y usado para describir el proceso que transforma la materia vegetal y animal en productos químicos usados para fertilizar los cultivos. Habíamos alcanzado los principios básicos de la **humificación**¹⁰, un proceso que provee al suelo con su estructura física y biológica y que desarrolla en "humus". Por lo tanto, la pedogénesis del ecosistema forestal y sus reacciones en la agricultura orientada a la producción: el productivismo.

Gradualmente nos dimos cuenta que estábamos entrando en el misterioso mundo biológico de formación del suelo. A largo plazo, la madera rameal fragmentada proveerá una comprensión de la función y la dinámica biológica del ecosistema hipogeo que, combinado con la geología, y las leyes de la física, química y bioquímica, gobierna este mundo desconocido excepto desde aspectos químicos.

4.2. Desarrollo del conocimiento actual

Debido a que no comprendemos completamente los mecanismos del suelo, consistentemente comentamos desde el lado químico a través de fertilización, enmiendas del suelo y similares. Mirando este razonamiento un paso adelante, vemos el suelo como un soporte meramente físico, y eventualmente en favor de fertilizantes líquidos y método hidropónico para crecer cultivos.

4.3. Descomposición y degradación: una interpretación negativa

La evaluación de los tejidos vegetales en el suelo como una transición hacia fertilizantes químicos liberados para el crecimiento vegetal ha sido tomada hace mucho tiempo. La "materia orgánica" se asocia con la absorción química mientras mantiene ciertos parámetros físicos, tales como control del aire del suelo y eliminación de gases de la actividad biológica, que siempre está asociada con la descomposición. Solamente fertilizantes y, particularmente, nitrógeno son nociones reconocidas.

4.4. MRF: una puerta nueva al conocimiento sobre la pedogénesis

Subsecuentemente postulamos que la MRF podría ser una manera perfecta para estudiar y comprender la formación del suelo y la dinámica relacionada, evaluada primariamente en términos de un sistema de distribución de nutrientes químicos para el crecimiento de las plantas. Luego de varios años, empezamos a comprender las interioridades de los mecanismos establecidos, su evolución y aún su desintegración. Aún cuando en la década previa se había visto aparecer muchas publicaciones importantes sobre los mecanismos biológicos con relación a

¹⁰ Mecanismos como un todo que permiten que el suelo construya su propia estructura física y biológica y entonces dando lo que llamamos «humus».
Departamento de la Madera y Ciencias Forestales
Universidad Laval, Quebec, Canadá.

la dinámica de los nutrientes. El primer trabajo comprehensivo había sido el publicado por **Perry et al.** (1989), de experimentos realizados en la Universidad Estatal de Oregon en Corvallis, enfocados en el comportamiento y efectos de varios organismos biológicos, incluyendo las micorrizas.

4.5. Control biológico y químico de los nutrientes

Los trabajos de investigación realizados por el equipo de Corvallis estuvieron esencialmente dirigidos a explicar el significado a un solo nivel, esto es vida, en un espíritu de competitividad y complementariedad, que en el momento era la única manera de aprehender nuestro mundo. El concepto de MRF nos permitió prestar más atención tanto a la silvicultura como a la agricultura, debido a que estábamos convencidos que en el centro de nuestra economía estaba este mundo complejo que es el suelo. El suelo es responsable del control de nutrientes pero también de un número sorprendente de formas vivientes con incontables nichos, incluyendo todas las formas de vida, desde virus hasta los mamíferos más altamente evolucionados. El suelo también es el "banco", "gerente" y la "fuerza impulsora" para toda la vida sobre la Tierra. Todos los nutrientes químicos y bioquímicos resultantes de la síntesis o retrosíntesis de los compuestos polifenólicos se derivan generalmente de la lignina y, hasta donde sabemos, son los elementos principales del humus en las fracciones húmicas y fúlvicas.

4.6. Razonamiento lógico

Las explicaciones para las anteriores observaciones y medidas deben ser de varias clases: tantos resultados e implicaciones envueltos deben revelar alguna homogeneidad en los parámetros fundamentales, sean físicos, químicos o biológicos. Paradójicamente, cuando se encuentra una entidad coherente debe haber una cara externa mostrando incoherencia; de otra manera, tendríamos un sistema rígido produciendo consistentemente los mismos resultados. Para formular hipótesis válidas, el asunto debe considerarse desde todos los lados.

Numerosas reuniones y discusiones en varios países y una literatura completa nos indican que estamos explorando un nuevo campo de conocimiento que trata con la pedogénesis forestal. Más aún, las pruebas de campo indicaban que la aplicación de MRF tiene efectos significativos sobre el comportamiento del ecosistema, particularmente germinación y competición vegetal.

4.7. Fragmentación

Durante mucho tiempo, los investigadores estaban convencidos que las hojas y ramas eran beneficiosas al suelo, pero sin ser capaces de medir los efectos exactos. De hecho, poca gente estaba interesada, y esperaban sólo eliminar las ramitas y otros desechos, considerados como una "molestia", del corte de árboles. Por ejemplo, la eliminación de las ramas del piso forestal durante el corte y troceado de árboles se hace para un mayor beneficio (**Freedman [1990]** en **Lemieux, 1991**). Al inicio, la fragmentación fue vista como una necesidad y una

técnica simple para la preparación del suelo, manejo y distribución de fertilizantes. Sin embargo, a medida que comprendíamos los mecanismos involucrados, la fragmentación de la madera rameal mostró ser importante. Puede compararse al masticado de los animales, ya que los ataques por enzimas eran más eficientes.

5. Nutrientes + Energía = Alimento

5.1. Pedogénesis y "composting": las diferencias fundamentales

La noción de alimento implica una combinación de dos cosas: la energía necesaria para que funcione el organismo vivo, y los compuestos químicos (fertilizantes) lo mismo que sus intermediarios bioquímicos (proteínas, aminoácidos, azúcares, celulosa, etc.). Rápidamente, tuvimos que olvidar nuestros conceptos tradicionales conducentes directamente a la mineralización, esto es, la disociación de energía y nutrientes. Se consideraba que la mejor manera para el reciclado de materia orgánica, vegetal o animal, era a través de "composting", durante el cual se realizaba la disociación energía - nutriente por fermentación termofílica bacteriana y fúngica, con pérdida de energía térmica y la recuperación de nutrientes y algunos residuos orgánicos, principalmente ligninas degradadas y compuestos polifenólicos. Aunque el proceso involucra combustión enzimática, en muchos aspectos es similar a la combustión del fuego (**Kirk & Farrell**, 1987). La pedogénesis, el cual está en el extremo opuesto de "compost", da estructura orgánica u organo-mineral al suelo favoreciendo la biodiversidad al nivel trófico.

5.2. Principios subyacentes a la MRF

Aún cuando los efectos beneficiosos de la MRF eran cada vez más obvios, los principios básicos subyacentes a su transformación en el suelo estaban bajo escrutinio. En 1989, empezamos a comprender los mecanismos que permitían la liberación de energía mientras conservaban los anillos aromáticos con alto contenido energético de la lignina.

A principios de los años 80, muchos autores de Norte América, Asia y Europa publicaron trabajos importantes sobre la lignina, su estructura y degradación enzimática (**Kirk & Fenn**, 1982; **Tien & Kirk**, 1983; **Lewis et al.**, 1987; **Leisola & Waldner**, 1988; **Leisola & Garcia**, 1989; **Leatham & Kirk**, 1982). Sin embargo, todas estas investigaciones estaban enfocadas hacia el uso, degradación y disposición final de la lignina como uno de los principales contaminantes generados por la industria de la pulpa y el papel. Hay que admitir que este enfoque "negativo" de la lignina no estaba ausente de valor y era perfectamente comprensible para las industrias que usan capital generado para auspiciar su propio crecimiento, olvidándose de cualquier cosa que se interponga en el camino de la rentabilidad.

5.3. Producción de las fracciones fúlvicas y húmicas

La principal contribución para una comprensión real fue provista por **Leisola y Garcia** (1989), quienes explicaron el mecanismo enzimático responsable para la despolimerización de la lignina en dos macromoléculas, una de bajo peso molecular (1,000 a 300,000 daltones) asimilada con ácido fúlvico, y la otra con mucho mayor peso, identificada como ácido húmico. Aún más interesante, los mismos autores demostraron que, bajo la acción de una enzima dependiente de manganeso llamada lignoperoxidasa, la molécula más pesada se pegaba al micelio de basidiomicetos (*Chrysosporium phanerochaete*), evitando las recombinaciones de la fracción del ácido fúlvico. Esto puede resultar en compuestos polifenólicos estables con propiedades antibióticas u otras propiedades. La fijación al micelio de estas macromoléculas pesadas da al suelo una apariencia marrón oscuro característica de suelos marrones. Se observó consistentemente un cambio similar en el color del suelo luego de la aplicación de MRF a suelos cultivados.

Numerosos trabajos de investigación han tratado el comportamiento de diferentes sistemas enzimáticos que juegan un papel fundamental en la degradación de la lignina: **Dordick et al.** (1986), **Garcia et al.** (1987), **Rayner & Boddy** (1984), **Jones & O'Carroll** (1989).

Todas estas publicaciones científicas se apoyan en el hecho de que los Basidiomicetos están en el suelo forestal pero totalmente ausentes en suelos agrícolas. Muchos autores llaman a los Basidiomicetos como "pudriciones blancas", de nuevo un término negativo que se refiere a la función descomponedora de estos hongos. El papel de los Basidiomicetos en la formación ectomicorrizal fue discutido por **Amaranthus & Perry** (1987), **Amaranthus et al.** (1987), **Hintikka, V.** (1982), **Tate, R.L.** (1987) y **Vaughan & Ord** (1985).

5.4. "Materia orgánica" para la fertilidad agrícola sin significación forestal

Todos los autores ya mencionados nos enseñaron mucho acerca de la degradación de la madera en los ecosistemas forestales. Mientras más nos entremos en la lógica de la "materia orgánica" y sus beneficios agrícolas, más nos alejamos de la unión lignina fertilidad y más vemos la fertilidad anual en términos de producción, siendo subsidiarios todos los demás parámetros. La noción de materia orgánica claramente se deriva de la agricultura y fue adoptada por el sector forestal sin ningún cuestionamiento, una barrera que tuvimos que pasar para poder interpretar nuestras observaciones.

Tuvimos que analizar la relación entre las varias formas de vida, particularmente microfauna, y sus efectos según han sido reportados por diferentes autores. Estábamos llegando al centro del asunto, y se volvía claro que

los hongos, aún cuando su papel era tan importante, no explicaban la dinámica ni de formación del suelo ni del ciclo de nutrientes. Otras formas de vida tenían que estar involucradas para formar los niveles tróficos donde interaccionan todos los organismos en el proceso vital que controla la disponibilidad de nutrientes de fuentes químicas, minerales o bioquímicas a través de almacenamiento y liberación de energía.

5.5. Transferencia de nutrientes: un enfoque inequívoco

Aprendimos bastante acerca de transferencia de nutrientes de **Anderson** (1988), **Anderson et al.** (1981), **Bachelier, G.** (1978), **Bouché, M.B.** (1981), **Larochelle** (1993), **Larochelle et al.** (1993), **Parkinson, D.** (1988), **Sauvesty et al.** (1993), **Seastedt, T.R.** (1984), **Swift, M.J.** (1976), **Swift et al.** (1979), **Toutain, F.** (1993). Sin embargo, para todos ellos la cuestión era presentada desde la perspectiva de dinámica, depredación y transferencias energéticas de un nivel a otro, con efectos generales sobre la transferencia de nutrientes. Ninguno de ellos discute o cuestiona la mecánica de transferencias energéticas aparte de la comúnmente conocida conversión de adenosín trifosfato a adenosín difosfato con la liberación de una kilocaloría, donde la glucosa es la fuente primaria de energía.

5.6. Ligninas y polifenoles

Como se mencionó previamente, ya que ni las ramas ni la madera rameal habían sido antes descritas o consideradas como material útil, las ligninas monoméricas nunca habían sido consideradas desde un ángulo energético como tales. Sin embargo, numerosos autores sí hacen referencia a la complejidad de esta macromolécula y sugieren que ella juega un papel importante en la formación de humus y la producción de polifenoles "indeseables": **Erikson et al.** (1990), **Rayner & Boddy** (1988), **Kirk & Farrell** (1987), **Lewis et al.** (1987), **Leisola & Garcia** (1989), **Leatham & Kirk** (1982), **Kirk & Fenn** (1982), **Leisola & Waldner** (1988), **Dordick et al.** (1986), **Garcia et al.** (1987), **Jones & O'Carroll** (1989), **Glenn & Gold** (1985), **Stott et al.** (1993), **Vaughan & Ord** (1985), **Vicuna, R.** (1988).

Usando enfoques diferentes, los autores citados discuten la estructura de la lignina y la importancia de los grupos metoxilos basados en el origen, "fragilidad" y "digestibilidad" de lignina ligeramente polimerizada y su habilidad de ser despolimerizada. Nos dimos cuenta entonces de la importancia de esta lignina joven como una fuente de energía, no solamente siguiendo la conversión celulósica, sino también a través de la energía substancia contenida en los anillos bencénicos, algunos de los cuales están reservados para la formación de humus. Parecería que la lignina podría jugar un papel doble tanto como proveedor de energía como constructor de suelo, donde el suelo controla y regula los organismos vivientes y nutrientes a través del proceso cíclico.

5.7. Controles polifenólicos y regulación biológica

Los polifenoles aparentemente podrían causar un decrecimiento en la fertilidad, aún cuando estén presentes en los ecosistemas hipogeos todos los nutrientes necesarios para un apropiado crecimiento vegetal. Nuestro objetivo no es seguir los varios caminos seguidos por los nutrientes para llegar a las plantas en el "orden correcto". Sin embargo, algunos ejemplos puede citarse, tales como lombrices de tierra que usan las grandes colonias de bacterias en sus tubos digestivos para destruir el pigmento marrón de las hojas. Este pigmento marrón viene de la asociación de un polifenol (tanino) con proteínas, evitando así la degradación de los nutrientes (**Toutain**, 1993). Similarmente, durante el reciclaje de nutrientes, los basidiomicetos y varias especies de Acaridae y Collembola rompen en partículas más finas por masticación, permitiendo los ataques enzimáticos y bacterianos (**Swift, M.J.**, 1977; **Larochelle et al.**, 1993).

5.8. Definición de nutrientes

Tradicionalmente, los nutrientes han sido promovidos de acuerdo a sus papeles en la producción de cultivos. Los elementos principales son nitrógeno, fósforo y potasio, pero ellos pueden ser combinados con numerosos otros elementos, incluyendo hierro y silicio, y los varios "elementos traza". Esta forma de clasificación muestra nuestro punto de vista de productividad agrícola que, a través de los años, se ha difundido igualmente en la silvicultura.

La idea de usar compuestos minerales para calificar y evaluar el crecimiento vegetal es algo extraño. Este enfoque orientado a la producción ha demostrado sus limitaciones en varias maneras: erosión del suelo, número cada vez mayor de parásitos, enfermedades fúngicas, virales y bacterianas en continua evolución. Las enormes inversiones de las naciones industriales para controlar estas epidemias están más allá de cualquier comprensión.

Para varios autores, particularmente **Amaranthus & Perry** (1987), **Gosz et al.** (1978) y **Martin et al.** (1986), es posible alterar el comportamiento del ecosistema modificando los factores biológicos que pudieran tener un impacto importante sobre los nutrientes, esto es, sus formas, que a su vez tendrán efectos fisicoquímicos de largo alcance.

Podemos concluir en que hay una relación directa entre los parámetros biológicos y la disponibilidad de nutrientes. Mientras que la relación química/física está bien documentada, mucho menos se conoce tanto de la relación química/bioquímica como de las transferencias de energía.

5.9. Organismos microbiológicos en los bosques pluviales tropicales: del suelo al dosel

Tomando en cuenta los hallazgos impresionantes en cuanto a los doseles de los bosques pluviales que siempre están asociados con suelos relativamente pobres, mi reacción fue prestar una mayor atención a los ecosistemas tropicales. Estos hallazgos sugieren, cada vez más y tal como uno podría pensar, que la vida del ecosistema está estructurada solamente alrededor de mecanismos que dependen del bosque y, en un menor grado, de los árboles. Esto podría explicar la situación en Africa luego de eliminar los árboles, donde solamente fueron dejados, creciendo bajas producciones de alimentos, insuficientes para asegurar un standard de vida decente y estable.

5.10 Agua

Todo el mundo sabe que el agua es esencial para la vida. Bajo condiciones tropicales, la disponibilidad de agua es vital para todas las formas de vida y se refleja en la estructura de los ecosistemas forestales y sus habilidades para resistir sequía. En climas templados, los ecosistemas forestales tienen que enfrentar un exceso de agua, el cual afecta la fertilidad interrumpiendo el desarrollo biológico del suelo, conduciendo así a una acumulación de residuos vegetales, siendo el resultado final los pantanos turbosos. *Hipótesis: los ecosistemas hipogeos, esto es, el suelo viviente, han tenido éxito en sobreponerse a todos los problemas relacionados con el clima creando un sistema de múltiples formas de vida en los cuales la asimilación de nutrientes no es afectada por los ciclos químicos y desarrollados por la agricultura en climas templados. Esto es de vital importancia en relación con el manejo del agua, donde el agua actúa como nutriente, inmune a la presión osmótica causada por las altas concentraciones de sales en el suelo.*

Sin embargo, es obvio que las restituciones biológicas y químicas en los bosques templados, particularmente los bosques climácicos latifoliados, están ligados a la despolimerización de la lignina, la cual no puede ocurrir en agua (**Dordick et al.**, 1986) ya los hongos responsables no pueden.

5.11. Nitrógeno

5.11.1. Fijación no simbiótica: N₂

Desde el primer día, asumimos que el nitrógeno encontrado en el suelo era el resultado directo de la degradación proteica de la biomasa microbiana. Sin embargo, ya que no hay deficiencia de nitrógeno luego de tres años, empezamos a mirar el por qué era así. Como muchos autores, concluimos que el proceso empezaba dentro del suelo forestal y estaba esencialmente relacionado a la fijación no simbiótica del nitrógeno por bacterias de la rizosfera (**Rouquerol et al.**, 1975; **Thomas-Bauzon et al.**, 1990; **Thomas-Bauzon et al.**, 1990;

Parkinson, 1988; Stott et al., 1993; Swift, 1976; Tate, 1987; Vaughan & Ord, 1985.

5.11.2. Disponibilidad de nitrógeno

La fijación del nitrógeno generalmente es realizada por un grupo de bacterias a través de una enzima especial que contiene hierro, tal como sucede en la hemoglobina. Apartadas de las *Rhizobium* fijadoras de nitrógeno en las raíces de leguminosas, esto podría explicar la alta cantidad de nitrógeno en la hojarasca forestal lo mismo que en los suelos tratados con MRF. En este punto, pensamos que el *ciclo de nitrógeno es iniciado principalmente por la fijación de N₂ a través de procesos microbiológicos y, secundariamente, a través de hongos y micorrizas en suelos tratados con MRF.*

5.12. Fósforo y fosfatos

La disponibilidad de fósforo siempre ha sido un problema en nutrición vegetal debido principalmente a su inmovilización por el hierro en suelos ácidos y por el calcio en suelos alcalinos y, consiguientemente, está poco disponible en las soluciones del suelo. Sin embargo, las deficiencias de fósforo solamente suceden en suelos agrícolas pero no hay reportes de deficiencias en ecosistemas forestales. La enzima conocida como fosfatasa alcalina es capaz de tomar fósforo durante las transferencias energéticas y "liberarlo" para el crecimiento vegetal. También se sabe que la micorrización apropiada incrementa la disponibilidad de fósforo (**Rouquerol et al., 1975**).

Seck & Lemieux (1996) encontraron que la enzima fosfatasa alcalina presente en la biomasa microbiana tiende a aumentar en suelo agrícola tratado con MRF. Otro estudio para detectar alguna disponibilidad enzimática mostró una concentración significativa de fosfatasas tanto alcalinas como ácidas en ramitas de roble rojo (**Toutain, 1996**), una de las fuentes más promisorias de MRF en clima templado. Es muy pronto para sacar conclusiones sobre diferentes enzimas, tales como lipasas. Sin embargo, esperamos publicar algunos datos nuevos en el futuro próximo, y traer nuevas piezas de evidencia en el campo de la pedogénesis, que pudieran añadirse a los hallazgos de **Flaig (1972)**, **Ratnayake et al. (1978)**, **Swift et al. (1979)**, y **Vaughan & Ord (1985)**. Hipótesis: *La MRF no solamente añade nutrientes al suelo, sino que también apoya estos mecanismos que construyen el suelo mientras permite la actividad enzimática que suministra fósforo a la vegetación epigea.* Los estudios publicados por **Lalande et al. (1997)** y **Seck & Lemieux (1996)**, han demostrado algunos cambios biológicos luego de la adición de MRF.

6. Biología telúrica: limitaciones de adaptación

De los ensayos agrícolas y forestales realizados par explorar los efectos de la MRF sobre el abastecimiento de nutrientes, se demostró claramente que los

análisis cualitativos o cuantitativos no eran conclusivos. Todos los resultados preliminares fueron de valor limitado cuando se comparan con la literatura actual. Las publicaciones más recientes en el campo de la MRF son: **Beauchamp** (1993), **Guay et al.** (1982), **Larochelle et al.** (1993), **Lemieux et Lapointe** (1985), **Lemieux et Lapointe** (1989), **Lemieux & Toutain** (1992), **Michaud** (1993), **Sauvesty** (1993), **Seck** (1994), **Toutain** (1993) y **Tremblay** (1985). Estos documentos, publicados en un período de diez años, han inspirado solamente unas pocas preguntas, generalmente enfocadas en técnicas empíricas de producción usadas para extraer nutrientes de los residuos de cultivo.

6.1. Arrojando alguna luz sobre la dinámica de la biología telúrica

Era obvio que no había interés científico por nuestro enfoque, lógico pero en muchos aspectos confusos, tomando en cuenta el actual contexto económico y técnico. La unión entre estos mecanismos biológicos, para los cuales los mecanismos enzimáticos son parcialmente responsables, no deben separarse de la importancia de los nutrientes químicos y bioquímicos. Mientras antes dependíamos de datos químicos y físicos para comprender la dinámica del suelo, ahora podemos proponer algunas explicaciones biológicas que arrojan alguna luz sobre los ecosistemas forestales.

Antes de ir más lejos, debemos mirar detenidamente a la visión moderna del universo, propuesta por algunos físicos como **Prigogine & Stenger** (1988) y **Prigogine** (1996). Venimos en la búsqueda del equilibrio generado por los ecosistemas forestales y como trabaja la MRF en ese proceso. Así, nos movemos de un mundo orientado a la producción y en desequilibrio a otro mundo caracterizado por el equilibrio y la diversidad. Necesitamos buscar la metaestabilidad, esto es, un mundo en el cual los ecosistemas sean a la vez estables y frágiles. Esta es la esencia de los ecosistemas forestales hipogeos, caracterizados por moléculas complejas del suelo resultantes de la degradación de la lignina y los varios niveles tróficos que regulan toda la vida y todos los intercambios químicos, físicos o temporales. Este es un mundo que todos parecen estar buscando, a juzgar por los gritos de alarma en todos los círculos durante el pasado medio siglo.

6.2. Ecosistemas forestales y generación diferencial del suelo

Mientras más comprendemos acerca de la vida y procesos de fertilidad, más claramente podemos definir los varios roles. En la biología del suelo, los equilibrios químicos y bioquímicos son el elemento clave para todos los ecosistemas forestales, tanto en términos de tiempo como de espacio. La referencia a los orígenes forestales de los suelos en este documento implica que los mecanismos de formación del suelo tienen millones de años de edad. Más

aún, tenemos argumentos para considerar a los suelos desarrollados en bosques de latifoliadas y de coníferas diferentes no solamente basándose en diferencias climáticas, sino en los orígenes de su estructura y su evolución.

Es interesante subrayar la evolución de estos dos ecosistemas forestales a través de los siglos. Los bosques de coníferas fueron tan resistentes que todavía ocupan un alto porcentaje de tierra cuyo clima está próximo a lo que era en el pasado. Sin embargo, es sorprendente encontrar un número tan grande de especies arcaicas en estos bosques (Gimnospermas, *Equisetum*, Briofitas, helechos, musgos, líquenes) y encontrar Gimnospermas como las especies dominantes.

Estas especies dominantes heredaron las formas y comportamientos de especies autóctonas inferiores que eran, de por mucho, menos dependientes de sus ambientes. Sin embargo, como los saurios, anfibios y reptiles, ellas pueden contar con una variedad de defensas "químicas" para asegurarse un lugar bajo el sol. Las coníferas han desarrollado sus propias técnicas de supervivencia, incluyendo la eliminación de la competencia. Estas técnicas son las más efectivas debido a que no permiten que las plantas crezcan, inhibiendo incluso la germinación de la vegetación competitiva. Como veremos más adelante, la producción extra de polifenoles, tales como terpenos, y una función especial de la lignina guayacil durante la despolimerización, son, claramente, formas antiguas de supervivencia que no dependen de la adaptación a nuevos ambientes, sino en hacer que todo el ecosistema se adapte a su propio comportamiento. Basados en el comportamiento, es difícil comprender el manejo y evolución del ecosistema. Los siguientes autores, aunque enfocados en la descripción comparativa de la dinámica sin alguna experimentación, pueden suministrar información significativa: **Dommergue & Mangenot** (1970), **Duchaufour** (1974), **Duchaufour** (1980), **Duchaufour** (1991), **Duchaufour & Jacquin** (1975), **Duchaufour & Toutain** (1990), **Toutain** (1981), **Ranger & Bonneau** (1984), **Frontier & Pichot-Viale** (1993).

6.3. Enfoque teórico sobre la energía en lugar de los nutrientes

Aunque la siguiente descripción se refiere a todos los ecosistemas forestales, los tropicales son los más dependientes y avanzados en cuanto a las altas temperaturas y períodos extendidos sin fluctuaciones de calor o agua. Los bosques tropicales tienen una base biológica más elaborada que los bosques boreales, con más "historias de éxito" y, consecuentemente, una mayor variedad de equilibrios. La energía parece ser central a todos ellos. Esta energía está bajo la forma de nutrientes, esto es, energía exógena que puede ser infundida en los ciclos vitales y asociada con los nutrientes bioquímicos (azúcares, ceras, aceites), los cuales a su vez producen energía endógena. Sin embargo, parece claro que todos los sistemas telúricos fértiles y productivos depende de una transferencia regular y directa de energía desde el ecosistema epigeo al hipogeo.

6.4. Ochenta por ciento de la energía en forma de fotosintetizados es transferido directamente al suelo

Entre 70 y 80 por ciento de la energía endógena producida por los árboles es transferida directamente al suelo, dejando solamente entre 20 y 30 por ciento de la producción energética total para el crecimiento tisular (**Fogel & Hunt, 1983; Meyer & Linderman, 1986; Rambelli, 1973; Reid & Mexal, 1977; Vogt et al., 1982; Whipps & Lynch, 1986**). En las Monocotiledóneas, sólo entre 10 y 40 por ciento de la energía producida es dirigida al ecosistema hipogeo, lo cual puede afectar la estabilidad del suelo.

6.5. La contribución energética del ecosistema epigeo: la base de la vida terrestre

La energía endógena es así transportada al ecosistema hipogeo a través del sistema radicular, donde las micorrizas juegan un papel principal transportando los nutrientes del suelo a la planta y la energía necesaria de la planta de regreso al suelo, mientras al mismo tiempo beneficiándose de ello. Los hongos, particularmente los basidiomicetos, son grandemente responsables de la nutrición de las plantas y de los intercambios planta/suelo (**Allen & Starr, 1982; Amaranthus & Perry, 1987; Amaranthus et al., 1987; Anderson et al., 1985; Borchers & Perry, 1987; Clarholm, 1985; Coleman, 1985; Fogel & Hunt, 1983; Ingham et al., 1985; Janos, 1988; Lynch & Bragg, 1985; Malloch et al., 1980; Olsen et al., 1981; Perry et al., 1987; Trappe, 1962; Vogt et al., 1982**).

6.6. Fuentes de lignina con polimerización mínima: raíces y ramitas

Numerosas veces a lo largo de este documento hemos mencionado la importancia de la lignina en la formación del suelo y el control de nutrientes a los diferentes niveles tróficos. En los bosques de coníferas y de latifoliadas, hay dos fuentes regulares de lignina ligeramente polimerizada, esto es, el tejido rico en lignina constantemente arrojado del dosel en forma de hojas, frutos, y pequeñas ramitas de todas clases, y las pequeñas raíces y raicillas metabolizadas por la microfauna. Extremadamente ricos en lignina ligeramente polimerizada, estas pequeñas raíces y raicillas son devoradas ávidamente por la microfauna. En un rodal de alce de azúcar, la producción anual se estima en 2-3 toneladas/ha (**Sauvesty et al., 1993**). Esta producción es mayor en bosques decíduos de Dicotiledóneas que en bosques siempreverdes compuestos de Gimnospermas o Angiospermas.

7. Algunas Pistas para Comprender los Resultados de las Pruebas

Todos los resultados obtenidos tanto en ambientes forestales como agrícolas fueron luego substanciados: **Aman et al. (1996), Beauchamp (1993), Guay et al. (1982), Lemieux (1985), Lemieux & Lapointe (1986), Lemieux &**

Lapointe (1988), Lemieux & Lapointe (1989), Lemieux & Lapointe (1990), Lemieux & Tétreault (1993), Lemieux & Toutain (1992), Lemieux (1995), Seck (1993). En la mayoría de los casos, los resultados, que pueden ser reproducidos con ciertas variaciones debido a fluctuaciones anuales en las condiciones climáticas y ambientales, fueron positivos. En los casos donde no resultaron las verificaciones, fuimos capaces de averiguar que estuvo mal y las explicaciones para confirmar los principios básicos. Así, un exceso de agua evita la despolimerización de la lignina por el lavado de los basidiomicetos responsables. Sin embargo, también es posible que estos basidiomicetos puedan no estar presentes en el ecosistema por razones del tipo de MRF usada.

En esta etapa de nuestra investigación, con seguridad podemos postular la siguiente hipótesis: La madera rameal que es invadida por basidiomicetos puede reemplazar todas las funciones biológicas que requieren nutrientes químicos o bioquímicos. Sin embargo, la presencia dominante de bacterias capaces de despolimerizar la lignina no tendrá los mismos efectos positivos.

7.1. La forma de los árboles: una breve historia evolucionaria

Muchas de nuestras observaciones y pensamientos sobre energía en relación con la vida del suelo no estaban apoyadas ni discutidas en la literatura científica, y una de nuestra publicación fue ignorada por la comunidad científica (**Lemieux, 1995**). Constantemente, nos sorprendíamos en los trópicos en el nivel de degradación del suelo por la baja productividad (**Lemieux, 1993**), mientras que en los climas norteros los tejidos vegetales eran abundantes pero ni eran transformados ni productivos en términos de biomasa anual.

La rápida transformación de la MRF bajo condiciones tropicales y el estancamiento de los desechos orgánicos bajo condiciones árticas son el resultado directo de una inversión de la distribución de la energía exógena o de disponibilidad del sol. **Godron & Lemieux (1996)** han demostrado la importancia estratégica de las ramas en la evolución de la forma de los árboles para una captura más eficiente de fotones de onda corta, una teoría a la cual nos suscribimos. Estamos mistificados en el tronco, mientras se acelera el proceso de reciclaje de los tejidos vegetales, mejorando la calidad del ecosistema hipogeo. Como resultado, los bosques latifoliados climáticos pueden tolerar "todas" las competencias vegetativas a casi todos los niveles y permiten beneficiarse a todo el ecosistema. Esto lleva a una máxima biodiversidad con máxima **metaestabilidad**. Todos los elementos convergen para crear estabilidad con máxima complejidad donde todos los organismos vivos pueden reemplazarse unos a otros. La selección natural de las especies e individuos ocurrirá, pero sin efectos conocidos sobre la distribución de papeles en la estabilidad del ecosistema.

Hablando en términos generales, las coníferas (Gimnospermas) tienen la forma opuesta a la de los latifoliados (Dicotiledóneas). Ya que las coníferas

aparecieron antes que las latifoliadas, asumimos que su desarrollo genético refleja condiciones ambientales que no existen más. Así como cambió la calidad de la atmósfera que filtra la luz solar, también cambió la calidad de la luz que llega a las cimas de los árboles. Ya que las ramas superiores son cortas en lugar de largas y anchas como en las latifoliadas, parecería indicar que las coníferas no tienen la misma necesidad de dominar el suelo. Como un todo, esto significa que las coníferas están adaptadas a condiciones ambientales que no existen más excepto en unos pocos lugares restantes tales como los ambientes de bosques boreales y de alta altitud. Las coníferas están, hasta cierto punto, asociadas directamente con los paleoclimas. Es posible que la calidad de la luz a una altitud dada haya cambiado y que la proporción de fotones de onda corta sea substancialmente diferente.

7.2. La pedogénesis bajo las coníferas

Lo más probable es que los bosques de coníferas se hayan desarrollado en sistemas restrictivos eliminando la vegetación competitiva basándose grandemente en los efectos inhibitorios de los polifenoles. Su lignina tiene una estructura asimétrica con anillos aromáticos compuestos de un sólo grupo metoxilo, dando origen a numerosos polifenoles, ácidos grasos, resinas, terpenos, etc. e inhibiendo la acción de ciertas lipasas, cuando presentes. Muchas especies de las familias Umbelliferae y Labiatae han heredado esta característica de las Gimnospermas, al igual que los eucaliptos australianos, los cuales eliminan la competición vegetativa, destruyendo los cultivos agrícolas en el proceso.

Estos dos métodos de manejar la competencia, uno "viejo" (coníferas) y otro "moderno" (latifoliadas), sugiere que **la estructura y evolución de la lignina, entre los mecanismos pedogenéticos como un todo, sean directamente responsables del tipo de competición que existe en los ecosistemas, a través tanto de los cambios que sufre en el suelo como por sus efectos sobre la disponibilidad de nutrientes químicos y bioquímicos.**

8. Algunas ideas sobre la Madera Rameal

El incremento de la productividad habilitada por los mecanismos armoniosos nos condujo a ver la MRF como un enfoque "nutricional" básico a la agricultura dentro de un marco de causas y factores pedogenéticos. Si la MRF influye tanto en los suelos agrícolas como en los forestales, concluimos que ésta debe ser la base de todo un nuevo campo de conocimiento el cual, si la literatura científica publicada durante este siglo es una indicación, nunca ha sido aproximado desde esta perspectiva.

La capacidad de la MRF en restablecer los diversos intercambios y ciclos vitales indica claramente que la metaestabilidad es la culminación de una serie de procesos vitales cuya importancia se demuestra a través de nuevos descubrimientos que se hacen cada día en el campo de la física. Hemos iniciado a

estudiar más detenidamente los aspectos biológicos del suelo, un enfoque que ha enfrentado resistencia, pero que está ganando, lentamente, aceptación.

8.1. Fertilidad: Una Definición

En breve, debemos buscar la diversidad para permitir que la naturaleza construya un puente entre el mundo geológico y los organismos vivientes usando mecanismos químicos y bioquímicos familiares y cuya interdependencia en ningún lugar está tan cercana como en el suelo. Esto nos obligaría a definir el suelo solamente en estos términos, en lugar de criterios químicos con el sólo propósito de clasificación para definir e inducir fertilidad, como es el caso actualmente. **La fertilidad puede definirse como el flujo bien ordenado y equilibrado de nutrientes químicos y bioquímicos, lo mismo que el agua y las transferencias energéticas de acuerdo a las demandas, y que es controlado por cambios climáticos.**

8.2. El impacto de la biotecnología

Durando años, la tendencia ha sido manipular el capital genético para corregir deficiencias biológicas e incrementar la productividad. Aunque estas nuevas biotecnologías parecen proveer infinitas posibilidades y resultados, no se puede enfatizar lo suficiente que el actual sistema genético y la metaestabilidad necesitaron millones de años para construirse. Por lo tanto, sólo estaríamos tratando de corregir contratiempos sin presentar retos a la lógica de los equilibrios establecidos. Estos "accidentes" casi siempre están impresos en la herencia genética individual y, por extensión, la herencia ambiental de una dada población. Deben ser identificados antes de tomar acción.

Producir más con menos y producir con mejor calidad, particularmente en suelos con degradación en aumento, parece garantizar una gran inversión en un espíritu de avaricia. Debemos protegernos nosotros mismos contra esta clase de acción a través del conocimiento apropiado en lugar de a través de nuevas tecnologías, no importa que tan atractiva puedan éstas parecer.

9. Prácticas Modernas de Silvicultura

9.1. Lógica Silvícola versus Agrícola

Como se vio anteriormente, la silvicultura está marcada por vocabulario, técnicas y conceptos agrícolas dentro de un contexto industrial de producción y producción económica medida en términos monetarios. Es perfectamente lógico, entonces, que se esperara que la silvicultura operara igual que la agricultura, con las mismas limitaciones. Quisiéramos proponer una **lógica silvícola**, en lugar de la lógica agrícola que tan escrupulosamente hemos seguido desde los inicios de los tiempos.

Como en agricultura tradicional, donde las producciones esperadas eran bajas debido a técnicas primitivas, los bosques del Este de Norte América no habían sido grandemente molestados dado que la tumba y corte de árboles se realizaba básicamente en el invierno, con cosechas de pocos volúmenes. El incremento de operaciones luego de la Segunda Guerra Mundial y una mayor mecanización de las operaciones, particularmente desde los años 60, han conducido a cambios significativos.

Esta tendencia ha continuado ganando momentum con la globalización de los mercados, pero sin ninguna promesa de alivio en las disputas de mercado, ya que ahora es la competencia que gobierna el mercado, y es una obligación la innovación constante. ¿Cómo podríamos imponer esta clase de lógica en un ecosistema metaestable, la misma esencia de la vida terrestre desde los albores del tiempo y ligado por las leyes de la física? Hemos pasado años de duro trabajo y reflexión tratando de contestar esta pregunta.

He repasado las conclusiones a las que se ha llegado a través de la revisión de la literatura científica y de nuestras pruebas forestales y agrícolas tanto en Quebec como en los Trópicos, mientras culpamos a nuestra "percepción agrícola" del bosque cuando la aproximación lógica debía haber sido justo lo opuesto. Ya que no podemos cambiar el curso de la historia humana, solamente podemos exponer los hechos y entonces intentar en cambiar nuestra percepción para así adoptar una aproximación "silvo-forestal", esto es, el bosque visto desde su propia perspectiva.

9.2. De regreso a las técnicas silvícolas

A diferencia de la agricultura, la productividad forestal se basa en un ecosistema estable. Donde el ecosistema no es estable, los "enemigos" del bosque o destruyen completamente la vida o lo someten, a veces por miles de años, como es el caso en la cuenca mediterránea. Tradicionalmente, y aún hoy, sólo estamos interesados en los tallos de los árboles. Aún cuando no se exporte el capital de nutrientes, terminamos agotando a todo el sistema biológico. Ya que la única exportación de nutrientes ocurre a través de lixiviación, ¿de dónde sale la creencia de que los ecosistemas no pueden regresar a su estado natural antes de ser cortados? Irónicamente, sólo cuando se rompen los enlaces responsables de la metaestabilidad del ecosistema es que los ecosistemas no pueden ser recolonizados (**Perry et al.**, 1990).

Mientras más complejo sea el sistema "megabiológico", más depende de los enlaces entre los elementos constituyentes. La lógica agrícola no hace caso a estas limitaciones e impone sus propias reglas siempre que la humanidad invierta el capital y el trabajo necesario para mantener los equilibrios ecológicos y las rotaciones a corto plazo de cultivos. Y esa es la debilidad: la silvicultura se ha

convertido en una industria que está tratando de asegurar su sostenibilidad sometiendo a los límites agrícolas y tomando prestado sus técnicas.

Lo sorprendente es que mientras se clama que los "residuos del corte y troceado" son beneficiosos al suelo y que su descomposición "mejora la estación", al igual que el estiércol hace en los campos agrícolas, las compañías madereras tumban árboles completos y eliminan todos los desechos de los lugares de labores en nombre de la rentabilidad. Cuando estos desechos se acumulan y se vuelven problemáticos, se realiza una quema controlada para facilitar la regeneración artificial.

Freedman (en **Lemieux**, 1990) demuestra justamente que tan perjudicial puede ser la eliminación de los residuos para el balance total de nutrientes. Una vez más, esta es una perspectiva agrícola basada en el razonamiento de que los nutrientes químicos son la única base de evaluación.

9.3. Una diferencia necesaria entre Madera del Tronco y Madera Rameal

Como se demostró previamente, los silvicultores no hacen distinción entre los tipos de desechos: generalmente son puestos juntos como "material homogéneo" de ningún valor. Sin embargo, los análisis realizados por **Guay et al.** (1982) indican claramente que las ramas son ricas en nutrientes, con una relación C/N mucho mayor que la de los troncos o corteza.

Siguiendo con la tradición de percibir la silvicultura desde una perspectiva agrícola, no se hace una distinción entre troncos y ramas, ambos siendo considerados como desechos del corte. Proponemos que tal distinción forma la base de un nuevo enfoque hacia el manejo forestal en el cual las ramas, que son ricas en energía y nutrientes químicos y bioquímicos disponibles, se dejan para que entre a formar parte del ciclo de vida a través de los procesos vitales de pedogénesis.

Así, las ramas y hojas, consideradas como los mayores estorbos y los desechos del corte más peligrosos en términos de peligro de incendio, deberían ser fragmentadas inmediatamente luego del corte y dejadas sobre el piso forestal. Los basidiomicetos del suelo inmediatamente invadirán esta materia orgánica para extraer los mejores nutrientes, incluyendo muchas proteínas y enzimas. Siendo así completo el ciclo árbol - suelo, todos los otros mecanismos pedogenéticos caerán inmediatamente en su lugar.

9.4. El papel de los Basidiomicetos

Es de extrema importancia que sean los basidiomicetos los primeros en colonizar esta materia; de otra manera, los otros niveles biológicos serán capaces de consumir una gran porción de este "pastel" sin formar cadenas tróficas apropiadas o eficientes. Si, encima de esto, hay un exceso de agua, hay una gran oportunidad de que el humus se desarrolle en turba.

9.5. El ciclo del Carbono

Me gustaría señalar que ninguna de las discusiones en relación con el carbono en cualquiera de sus formas nos permite predecir fertilidad, ya que éste es una evaluación puramente bioquímica de formas desde el CO₂ hasta diamantes o desde azúcares hasta carbón lo cual deja fuera cualquier comprensión de los mecanismos pedogenéticos. En mi opinión, esta evaluación basada en el carbono de nuestro planeta es pura locura; en su lugar, deberíamos estar mirando a la metaestabilidad del ecosistema para una comprensión de como estos mecanismos funcionan. Visto desde esta perspectiva, el carbono tomará la forma de su evolución biológica, donde los anillos aromáticos juegan un papel cuya importancia no hemos ni siquiera a sospechar. Esta es la dirección que debemos tomar si deseamos comprender la evolución de la vida sobre la Tierra. El carbono se volverá el elemento estructural básico responsable para la conservación de energía, aunque también puede ser usado para otras funciones bajo la acción de sistemas enzimáticos.

9.6. Percepción de los desechos de corte y troceado

Actualmente, los desechos de corte y troceado se ven bajo una luz negativa y han fallado todos intentos hechos en Europa para reclamar estos llamados desechos por reintroducción en el suelo. La percepción es, por lo tanto, la de un material sin valor o una "molestia" cuyos únicos efectos son causar fuegos forestales extremadamente costosos y destructivos. Por lo cual, los esfuerzos se dirigen a cómo eliminarlos. Se descompone a través de la acción de numerosos hongos, o se quema en humo durante los fuegos forestales, no haciendo nada para mejorar el ecosistema, sino degradándolo aún más a través de pérdida de nutrientes y diversidad.

La mayoría de los silvicultores arguyen (sin substanciación) que el desecho maderero se transforma en una clase de fertilizante que condiciona el suelo y promueve la regeneración. Sin embargo, nada podría estar más lejos de la verdad. La degradación fúngica y microbiana de este desecho emite dióxido de carbono y nitrógeno en la atmósfera, liberando para nada preciosa energía de los anillos aromáticos, mientras que los componentes químicos se lixivian en el suelo cuando llueve y se trasladan hacia los lagos, corrientes y ríos. En climas más secos o durante sequías, este desecho es soplado por el viento. Consiguientemente, lo que ha tomado décadas sino siglos para convertirse en componente integral del ecosistema productivo se pierde para siempre en el tiempo de unas estaciones.

9.7. Salvaguardando una herencia bien ganada

En contraste, el fragmentado de ramas y el esparcimiento de MRF sobre el piso forestal ayudan a proteger la "herencia química" lo mismo que a los valiosos anillos aromáticos con un alto contenido energético además de contribuir a la construcción del suelo. En lugar de llevar a la degradación del suelo y la

desertificación, la MRF inicia un proceso de mejoramiento, promueve la regeneración y recrea la herencia química perdida a través del uso de las técnicas silvícolas actuales, técnicas que han sido transmitidas a través de las generaciones sin que alguna vez fueran cuestionadas a no ser en términos agrícolas.

9.8. El papel de las micorrizas

La manía por las micorrizas observada en décadas recientes y los efectos positivos de las micorrizas sobre la producción agrícola han sido, con frecuencia, evaluados solamente en términos de incremento de la productividad, particular a través de la mayor absorción de fósforo. En nuestra opinión, las micorrizas juegan un papel aún mayor almacenando fósforo en los tejidos de los micelios gracias a una mayor actividad de la fosfatasa. Otro papel, todavía más importante, es el transporte de nutrientes sin obstáculos por las limitantes químicas del suelo, particularmente en los suelos pobres. Este aspecto de la fertilidad es posible por el hecho de que los micelios de los basidiomicetos no tiene divisiones y actúan como una "tubería", protegiendo y transportando los nutrientes de un punto a otro, lo mismo que de la planta al suelo y viceversa.

Este "sistema de transportación" de los basidiomicetos, compuesto principalmente por micorrizas, representa el instrumento viviente básico de los ecosistemas boscosos. Es necesaria energía para que este sistema viviente pueda existir y funcionar. Y de donde más vendría esta energía si no es de la transformación de materia orgánica existente: los azúcares son los primeros en convertirse y los últimos son los anillos bencénicos. Este es el primer ciclo donde los agregados del suelo sufren cambios constantes en los suelos fértiles, siendo usados tanto como alimento como albergue de numerosos microorganismos, incluyendo bacterias y esporas de hongos.

9.9. Qué hacer con la madera del tallo?

Aparte de las hojas y ramas, los desechos de corte y troceado incluyen troncos de bajo grado y grandes ramas de la corona que no pueden ser tratados como ramas y que no son de la misma calidad. Se deja la madera del tallo en el piso forestal precisamente porque está podrida o ha sido atacada por bacterias. Debido a la lignina altamente polimerizada y la presencia de numerosos polifenoles y altos niveles de manganeso, esta madera no es muy probable que beneficie la pedogénesis. La lignina es despolimerizada por otras enzimas, como las laccasas bacterianas. Este tipo de polimerización produce fracciones que se recombinan como polifenoles diferentes, tales como ácidos grasos, en lugar de producir solamente fracciones húmica y fúlvica. Estas sustancias negras, pobremente estructuradas son relativamente pobres en nutrientes y relativamente inmóviles con una tendencia a formar turba en las condiciones apropiadas de agua.

9.10. Lignina y Manganeso

Sospechamos que este proceso es el medio básico para controlar la competencia vegetativa en los bosques de coníferas donde el manganeso es abundante. Varios de nuestros análisis, todavía no publicados, muestran que el metabolismo de latifoliadas que compite con éxito con las coníferas, sea directamente o en estados de transición, no es afectado por altas concentraciones de manganeso.

Discusiones recientes con ingenieros europeos de la pulpa y el papel indican que aún una traza de manganeso trastorna la transformación de la lignina en las nuevas técnicas de blanqueado. Estamos inclinados a ver el papel del manganeso en el suelo de forma similar, una teoría que requiere una mayor investigación conceptual. Por el momento, lo vemos como uno de los principales factores que controlan los ecosistemas boscosos y la pedogénesis, una hipótesis que obviamente necesita ser probada.

9.11. Métodos de fragmentación y tiempo

Claramente, los troncos y las ramas deben ser tratados diferentemente. Mientras que es crucial que las ramas sean fragmentadas y esparcidas sobre el suelo inmediatamente luego del corte, lo mismo no es necesario para los troncos, aunque es importante que ellos estén en contacto con el suelo para permitir los intercambios microbiológicos y proveer valiosos refugios para los mamíferos pequeños.

9.12. Potencial de la MRF de conífera y de latifoliada

La mayoría de los científicos estarían de acuerdo que las coníferas son capaces de reciclar los nutrientes sin depender del suelo. Esta es una de las principales razones por la que las coníferas, especialmente pino, son sembradas en todo el mundo. Sin embargo, las coníferas no son aptas para mejorar los ecosistemas boscosos en los cuales son introducidos. Aunque ellos no tengan efectos positivos a largo plazo, su robustez les permite sobrevivir eliminando la competencia vegetativa o tolerando especies que tengan éxito en adaptarse a estas condiciones.

Por comparación, las plantaciones latifoliadas son menos productivas en términos de crecimiento, aunque ellas son más productivas en términos de volumen. Las latifoliadas climácicas del este de Norte América tienen que reciclar sus nutrientes a través del suelo, una condición primaria para el metabolismo del calcio del suelo, donde el calcio es aislado y concentrado de las hojas muertas por los basidiomicetos (**Toutain**, 1993). Este papel fundamental del ecosistema hipogeo contribuye grandemente a la fertilidad y biodiversidad, ya que el suelo es capaz de transformar los varios insumos biológicos y hacer sus nutrientes

constituyentes disponibles para la absorción por las plantas en el ecosistema epigeo.

9.13. Energía almacenada en los suelos forestales latifoliados

Esto pudiera grandemente explicar las razones por la que **Gosz et al.** (1978) observaron tan gran cantidad de energía almacenada en los suelos bajo el dosel forestal y pérdidas tan grandes luego del corte. Entran en juego una serie de mecanismos para mantener la energía y la biodiversidad, lo que no es el caso con las coníferas. Esta es la razón por la que los rodales de coníferas son considerados como extremadamente **resistentes**, a pesar de su pobre adaptación a las condiciones climáticas actuales. En contraste, los bosques de latifoliados son capaces de adaptarse a la competencia y la biodiversidad usando el ecosistema hipogeo como un "banco de alimento", lo que explica su productividad superior comparando con los bosques de coníferas.

En este contexto, sugerimos, por lo menos con propósitos experimentales, que no solamente sean fragmentadas las ramas, sino que también se fragmente el crecimiento de regeneración forestal para restituir las reservas energéticas tan rápidamente como sea posible, siempre que esto sea seguido por una selección de tallo. Procediendo de esta manera asegurará una estructura del rodal fértil y "natural" con una mejor distribución de tallos. La fragmentación debería ser la herramienta a escoger para mantener y reconstruir la distribución de tallos. Nos permitiría reducir, si no eliminar completamente, el uso de silvicidas. Además, todos los desechos de corte o troceado deberían ser inmediatamente fragmentados y regresados al piso forestal.

9.14. Los argumentos económicos y logísticos están perdiendo terreno

A pesar de los argumentos económicos y logísticos en contra de la fragmentación, creemos que es la técnica más sensible. Pero debemos darle tiempo; de otra forma, estamos dirigidos directamente a una crisis ecológica y, a mediano plazo, económica. En apenas un siglo, los grandes bosques han sido llevados al borde de la extinción; esperemos que no se tarde en restablecer el orden ecológico. De otra forma, cualquier bosque restante será improductivo.

Un estudio reciente realizado por la sección forestal del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (**Smith et al.**, 1994) mostró la progresión de la acción maderera en los Estados Unidos. El equilibrio entre crecimiento y cosecha fue roto hace casi cincuenta años, y en los últimos diez años la cantidad de bosque perdido se ha duplicado. Aún cuando nuestro propósito no es discutir este problema, el cual es tanto social como económico, tales ejemplos no pueden ser ignorados, ya que la comprensión y rehabilitación de nuestros bosques requiere

un esfuerzo tremendo por todas las partes. Estamos conscientes de que un balance crucial fue roto hace tiempo.

Con relación al ciclo del carbono, un término usado con frecuencia y que, en mi opinión, no tiene sentido en un contexto forestal, es claro que debido a que el carbono es un componente de los niveles tróficos lo mismo que de las proteínas, azúcares, celulosa, lignina y, consiguientemente, los anillos bencénicos, la fragmentación tiene un impacto considerable sobre la disponibilidad de carbono. La metaestabilidad requiere intercambios constantes para establecer y mantener el balance entre los varios elementos. Todos estos sistemas se basan primero y principalmente en el balance del carbono. En contraste, los sistemas que están en desequilibrio como resultado del desgaste liberan grandes cantidades de carbono libre, el cual tiene un efecto de bola de nieve que sólo ahora estamos empezando a comprender. Obviamente, este carbono puede ser atrapado y finalizar formando turba, carbón o petróleo. Las concentraciones máximas de carbono en las cadenas tróficas deberían ocurrir cuando hay una metaestabilidad completa. Puede ser algo temerario pensar que, dejados por su cuenta, los bosques pueden corregir los balances de carbono; sin embargo, pensemos en el período Carbonífero. Los bosques existentes de latifoliadas contienen de tres a cinco más carbono en su ecosistema epigeo, haciendo que la degradación del suelo sea la principal fuente de emisión de CO₂ a la atmósfera.

9.15. Ciclo del agua

No hay que decir que un sistema telúrico bien equilibrado requiere un ciclo regular del agua, esto es, ni exceso ni deficiencia, aunque pueden ocurrir extremos temporales dependiendo de la estación. Una evaluación exacta de los ciclos biológicos del agua es difícil en climas templados como los nuestros, aunque sea solamente por las condiciones meteorológicas impredecibles. Por comparación, aumentos notables en producción fueron medidos bajo condiciones tropicales semiáridas, lo cual nos lleva a creer que el agua del suelo tiene su propio ciclo que pasa a través de los diferentes niveles tróficos donde grandes cantidades de agua puede ser almacenada bajo membranas semipermeables dentro de la biomasa microbiana. El papel del dosel en el ciclo diario del agua atmosférico donde la temperatura del suelo es inferior que la temperatura ambiental ha sido bien documentado para los bosques pluviales tropicales. El incremento de la porosidad del suelo debido a la estructura del suelo, grado de vida telúrica, y el aire del suelo permite que las aguas superficiales sean absorbidas, reduciendo así las pérdidas de agua y de nutrientes. En este contexto, la polimerización de la lignina es regular, siempre que haya aerobiosis. Otro importante sistema de control lo constituye las transferencias controladas desde los micelios por las bacterias que modifican la permeabilidad de la membrana en los puntos de contacto. Estas bacterias son lavadas bajo condiciones de exceso de agua.

10. Recomendaciones

Estamos ahora en el punto donde necesitamos proponer recomendaciones que ayuden a incrementar nuestro conocimiento y comprensión científicos. Estas recomendaciones tendrán impacto sobre la silvicultura, agricultura y las ciencias generales, entre los cuales la física podría ser la primera en beneficiarse.

10.1. Experimentación técnica en bosques

Las experiencias discutidas en este documento demuestran que es posible, en un plazo mediano, medir cambios en el suelo que tendrán impactos importantes en el futuro. Estos cambios se centran en la reconstitución de la estructura biológica y bioquímica del suelo para crear nuevos ecosistemas basados en la metaestabilidad. Por lo tanto recomendamos que:

- a) Luego del corte, todas las ramas por debajo de 10-15 cm en diámetro sean **fragmentadas y esparcidas sobre el piso forestal** ya sea inmediatamente o, si esto no es posible, no más tarde de una semana después.
- b) Dependiendo de la fertilidad del sitio, el primer crecimiento de regeneración sería fragmentado con vistas a mejorar el almacenamiento de energía y biodiversidad;
- c) Los ensayos iniciales incluirían parcelas de control de igual tamaño y localización geográfica similar a las parcelas de prueba. Sería útil usar dos pequeñas e idénticas cuencas para comparar las pérdidas de nutrientes luego de las operaciones madereras. Ellas también permitirían una evaluación más exacta de las discrepancias en metaestabilidad;
- d) Realizar estudios de cinco años (o más tiempo) sobre la vida vegetal, regeneración, insectos, enfermedades fúngicas, etc. Deben instalarse cercas para evitar que la vida silvestre ramonee y altere la nueva estructura de la vegetación;
- e) Los resultados de estudio serían publicados y presentados en talleres internacionales para así discutir los mecanismos observados y medidos bajo condiciones tropicales. La asistencia de instituciones extranjeras tales como el Centro Internacional de Investigación en Agroforestería (ICRAF) en Nairobi debe ser solicitado para interpretar los resultados.

10.2. Pruebas con hongos

Numerosos campos científicos han sido explorados para comprender completamente nuestros hallazgos y determinar como continuar e interpretar nuestros logros. Ya que los procesos biológicos primarios en la pedogénesis suceden al nivel fúngico, y dado que sólo una experimentación mínima ha sido realizada en esta área, sentimos que aquí es donde debe estar la prioridad.

- a) Deben dedicarse esfuerzos importantes para identificar y cultivar los tipos principales de hongos del suelo encontrados tanto en bosques jóvenes como en bosques de viejo crecimiento. También deben realizarse estudios similares en el laboratorio para crear nuevos protocolos;
- b) Necesita identificarse apropiadamente el papel de las varias familias fungosas para comprender su comportamiento. Aunque esta es una tarea difícil, no debe descuidarse, ya que contribuirá considerablemente a la comprensión de los resultados de manejo;
- c) Para cada una de las principales especies de basidiomicetos, debemos ser capaces de identificar cuales, donde y bajo que condiciones se producen las enzimas. Estos son mecanismos importantes subyacentes a las funciones básicas del ecosistema hipogeo y su fertilidad.

10.3. Mesofauna y Microfauna

Es necesario realizar estudios importantes sobre los diferentes niveles de microfauna y mesofauna que ocurren en cada estado sucesional. Estas micro y mesofauna son, con frecuencia, centrales a los dilemas relacionados con los polifenoles y taninos en particular. Entre otras cosas, ellos pueden llevar los hongos y bacterias responsables de producir varias enzimas ligadas a la disponibilidad de nutrientes, aún en la presencia de importantes limitantes químicas. Este es uno de los parámetros más dinámico en la pedogénesis.

10.4. Hojas de balance del Fósforo y el Nitrógeno

Los sistemas de enzima son obviamente la base de la función del ecosistema hipogeo, la misma esencia del suelo viviente. En este respecto, debe hacerse considerable esfuerzo para tratar de comprender como el fósforo es transferido y transportado a través de las micorrizas y las enzimas responsables. Ciertamente deben estar involucrados sistemas específicos de transferencia energética y que vale la pena examinar.

Necesita realizarse investigaciones importantes sobre el papel de las bacterias responsables para la fijación **no simbiótica** del nitrógeno. Estas bacterias definitivamente tienen un impacto considerable sobre el balance del nitrógeno en el ecosistema, pero bajo ciertas condiciones su papel puede ser justamente lo opuesto, esto es, mantener un balance entre el abastecimiento y la demanda de nitrógeno planta - suelo. Cada vez más nos inclinamos en creer que la capacidad de las Leguminosae para fijar nitrógeno por medio de rizobios es una respuesta a la deficiencia de nitrógeno en el ecosistema hipogeo.

10.5. Lignina y Polifenoles

Mientras más comprendemos sobre los mecanismos básicos involucrados, más seguros estamos de que la química de los polifenoles es la base bioquímica

de la pedogénesis. Esta creencia no deja de estar relacionada con el hecho de que la despolimerización de la lignina coincidió con la aparición de los hongos hace varios cientos millones de años. Tenemos grandes sospechas de que la despolimerización de la lignina es la base bioquímica del suelo y, al mismo tiempo, controla la liberación biológica y química de los nutrientes para el crecimiento de las plantas. En lugar de ver a los millones de compuestos fenólicos como "el enemigo" o como una amenaza, debería realizarse una revisión crítica de la química fenólica a la luz de lo que acabamos de describir. Los polifenoles se comportan diferentemente dependiendo del tipo, esto es coníferas o latifoliadas, y edad de los rodales. Ellos deben ser tratados como elementos fundamentales de la fertilidad y del control de fertilidad. A través de sus anillos de benceno, los polifenoles almacenan energía necesaria para mantener una estructura dinámica compuesta por muchas cadenas tróficas que permiten o inhiben la disponibilidad de nutrientes.

11. Trabajando más estrechamente con la industria de la pulpa y el papel

Necesitamos trabajar más estrechamente con la industria de la pulpa y el papel la cual, gracias a las nuevas tecnologías, está ahora sensibilizada a la importancia de los sistemas enzimáticos iguales o, si no, similares a aquellos responsables por la fertilidad del suelo forestal.

11.1. Ciencia básica

Podemos ahora prestar nuestra atención a la lignina, esa importante macromolécula que sabemos como degradar, pero que también ahora sospechamos que juega un papel fundamental en todos los mecanismos pedogenéticos. La lignina no solamente produce polifenoles sino que también da la estructura física al suelo, es la fuente de las fracciones húmicas y fúlvicas, la base de la estructura orgánica y mineral y de los agregados polifenólicos condensados en suelos desprovistos de minerales finos.

12. La necesidad del involucramiento de institutos de investigación y universidades al nivel internacional

Teniendo en cuenta la universalidad de los mecanismos pedogenéticos, una de mis metas es llevar a cabo un cambio en nuestras instituciones nacionales e internacionales y hacer que ellas se hagan cargo de los desarrollos en las ciencias relacionadas con la pedogénesis. Un instituto internacional de pedogénesis pudiera conducir estudios para ayudar a solucionar los actuales problemas de desertificación, erosión del suelo, y la pérdida irreparable de bosques en todo el mundo.

12.1. De la Filosofía a la Física

La teoría de Newton de que el tiempo no tiene final, es lineal y continuo, con el pasado siendo igual al futuro, trajo confianza sin paralelo a las ciencias,

particularmente a aquellas propias de la ingeniería. Esta es la raíz del capitalismo al desarrollo de las ciencias en general. La permanencia que fluyó de este nuevo sentido de poder salvó a la humanidad de su precariedad, abriendo las puertas a un futuro más brillante que anteriormente. Sin embargo, los semejantes de Einstein, Bohr, Planck y Curie cambiaron este optimismo dando origen a la física de partículas, que habría de cambiar completamente nuestro conocimiento del universo mostrando que el espacio es curvo y que el tiempo no es lineal.

Nos gustaría enfatizar que el tiempo no tiene el mismo peso en la agricultura que en la silvicultura. Si la agricultura puede darse el lujo de olvidarse del tiempo, por lo menos a largo plazo, la silvicultura no puede. Y esta es la diferencia fundamental que tiende a ser olvidada cuando tratamos los bosques igual que los campos de cultivo. Los mecanismos subyacentes de la metaestabilidad están sujetos al tiempo y los ciclos y, por lo tanto, debemos antes que nada pensar en términos de sostenibilidad y no de eternidad.

El principal propósito de esta investigación es llamar la atención a la importancia de la física y las tendencias actuales que con frecuencia oscilan entre la física y la filosofía. Si he sido capaz de demostrar este hecho hasta cierto grado, habré conseguido algo. Pero todavía hay un largo camino enfrente de nosotros. Hemos pasado el anterior medio siglo recolectando datos, nunca pensando en discutir y renovar nuestra base de ideas sobre lo que hemos aprendido.

Ha llegado el tiempo de repensar nuestros puntos de vista del universo. Como apuntó Prigogine, el tiempo es irreversible; la evolución es inevitable y estamos predestinados a redefinir la nuestra. Los bosques no son excepción a esta regla. Sin la intervención humana, ellos continuarían existiendo, mientras que la agricultura no. Por lo tanto, es apropiado que, colectivamente, repensemos nuestros conceptos fundamentales. Tal ejercicio estaría a la par con nuestra preocupación acerca del final de un milenio y el nacimiento de otro.

BIBLIOGRAFIA

Allen, T.F.H. and Starr, T. B. 1982. *Hierarchy: Perspectives for Ecological Complexity*. University of Chicago Press, Chicago.

Aman, S., Despatie, S., Furlan, V., Pagé, F. and Lemieux, G. 1997. *Effects of chopped twig wood (CTW) on maize growth and yields in the forest-savanna transition zone of Côte d'Ivoire*. (In press.)

Amaranthus, M.P. and Perry, D. A. 1987. The effect of soil transfers on ectomycorrhizal formation and the survival and growth of conifer seedlings on old, none reforested clear-cuts. *Can. Jour. For. Res.* **17**:944-950.

- Amaranthus, M.P., Li, C.Y. and Perry, D. A.** 1987. Nitrogen fixation within mycorrhizae of Douglas-fir seedlings. In: Sylvia, D. M., Hung, L.L. and Graham, J.H. (eds.), *Mycorrhizae in the Next Decade: Practical Applications and Research Priorities*. University of Florida, Gainesville, Florida, USA. p. 79.
- Anderson, J.M.** 1988. Spatio-temporal effects of invertebrates on soil processes. *Biol. Fertil. Soils*. **6**:216-227.
- Anderson, R. V., Coleman, D.C. and Cole, C.V.** 1981. Effects of saprotrophic grazing on net mineralization. In: Clark, F. E. and Rosswal, T. (eds.), *Terrestrial nitrogen cycles*. Ecol. Bull. **33**:210-216.
- Anderson, J.M., Hulsh, S. A., Ineson, P., Leonard, M. A. and Splatt, P. R.** 1985. Interactions of invertebrates microorganisms and tree roots in nitrogen and mineral element fluxes in deciduous woodland soils. In: Fitter, A.H., Atkinson, D., Read, D. J. and Ushers, M. B. (eds.), *Ecological Interactions in Soil*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK. pp. 377-392.
- Bachelier, G.** 1978. *La faune des sols, son écologie et son action*. Document technique n° 38. Office de la Recherche Scientifique et Technique Outremer (ORSTOM), route d'Aulnay, 93140 Bondy, France. 391 pages.
- Beauchamp, C.** 1993. La caractérisation et la valorisation agricole des BRF et leurs impacts sur le sol et les cultures. In: *Les actes du quatrième colloque international sur les bois raméaux fragmenté*, édité par le Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux. Département des Sciences Forestières, Université Laval, Québec, Canada. pp. 42-49.
- Borchers, S. and Perry, D. A.** 1987. Early successional hardwoods as refugia for ectomycorrhizal fungi in clearcut Douglas-fir forests of southwest Oregon. In: Sylvia, D. M., Hung, L.L. and Graham, J.H. (eds.), *Mycorrhizae in the Next Decade: Practical Applications and Research Priorities*. University of Florida, Gainesville, Florida, USA. p. 84.
- Bouché, M.B.** 1981. Contribution des lombriciens aux migrations d'éléments dans les sols tempérés. In: *Migrations organo-minérales dans les sols tempérés*. Colloques Internationaux du CNRS n° 303, Nancy 24-28 septembre 1979. Éditions CNRS, Paris. pp. 145-154.
- Clarholm, M.** 1985. Possible roles for roots, bacteria, protozoa and fungi in supplying nitrogen to plants. In: Fitter, A.H., Atkinson, D., Read, D. J. and Ushers, M. B. (eds.), *Ecological Interactions in Soil*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK. pp. 355-365
- Coleman, D.C.** 1985. Through a ped darkly: an ecological assessment of root-soil-microbial-faunal interactions. In: Fitter, A.H., Atkinson, D., Read, D. J. and Ushers, M. B. (eds.), *Ecological Interactions in Soil*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK. pp. 1-21.
- Dommergue, S.Y. et Mangenot, F.** 1970. *Écologie microbienne du sol*. Masson, Paris. 796 pages

- Dordick, J.S., Marletta, M. A. and Kilbanov, A.M.** 1986. Peroxidases depolymerise lignin in organic media but not water. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **83**:6255-6257.
- Duchaufour, P.** 1974. Le climax du sol forestier. In: Pesson, P. (ed.), *Écologie Forestière*. Gauthier-Villars, Paris. pp. 129-134.
- Duchaufour, P.** 1980. Écologie de l'humification et pédogénèse des sols forestiers. In: Pesson, P. (ed.), *L'Actualité d'Écologie Forestière*. Gauthier-Villars, Paris. pp. 177-201.
- Duchaufour, P.** 1991. *Pédologie: sol, végétation, environnement*. Masson, Paris. 3ème édition. 189 pages.
- Duchaufour, P. et Jacquin, F.** 1975. Comparaison des processus d'humification dans les principaux types d'humus forestiers. *Science du Sol* **1**:29-36.
- Duchaufour, P. et Toutain, F.** 1985. Apport de la pédologie à l'étude des écosystèmes. *Bull. Écol.* **17**(1):1-9.
- Erikson, K.E.L., Blanchette, R.A. and Ander, P.** 1990. *Microbial and enzymatic degradation of wood and wood components*. Springer-Verlag, Berlin. 407 pp.
- Fogel, R. and Hunt, G.** 1983. Contribution of mycorrhizae and soil fungi to nutrient cycling in a Douglas-fir ecosystem. *Can. Journ. For. Res.* **13**:219-232.
- Frontier, S. & Pichot-Viale, D.** 1993. *Écosystèmes: structure, fonctionnement, évolution*. Masson, Paris. 2ème édition. 447 pages.
- Garcia, S., Latge, J.P., Prévost, M.C. and Leisola, M.S.A.** 1987. Wood degradation by white-rot fungi: cytochemical studies using lignin peroxidase-immunoglobulin-gold-complex. *Appl. Environ. Microbiol.* **53**: 2384-2387.
- Glenn, J.K. and Gold, M.H.** 1985. Purification and characterization of an extracellular MN(II)-dependent peroxidase from the lignin-degrading by the Basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium*. *Arch. Biochem. Biophys.* **242**:329-341.
- Godron, M. et Lemieux, G.** 1996. Les cycles de la "matière organique forestière". In: Lemieux, G., *Rapport des missions internationales de 1996*. pp. 166-185.
- Gosz, J.R., Holmes, R.T., Likens, G.E. et Bormann, F.H.** 1978. Le flux d'énergie dans un écosystème forestier. In: *Pour la Science*, Juin 1987. pp. 101-110.
- Guay, E., Lachance, L. et Lapointe, R.A.** 1982. *Emploi des bois raméaux fragmentés et des lisiers en agriculture*. Ministry of Energy and Resources. 74 pages. Québec.
- Hintikka, V.** 1982. The colonisation of litter and wood by basidiomycetes in Finnish forest. In: Frankland, J.C., Hedger, J.N. and Swift, M.J. (eds.), *Decomposer basidiomycetes: their biology and ecology*. Cambridge University Press, Cambridge. pp. 227-239.
- Ingham, R. E., Trofymow, J. A., Ingham, E. R. and Coleman, D.C.** 1985. Interactions of bacteria, fungi, and their nematode grazers: effects on nutrient cycling and plant growth. *Ecol. Monogr.* **55**:119-140.

- Janos, D. P.** 1988. Mycorrhiza applications in tropical forestry: are temperate-zone approaches appropriate?. In: Ng, S. P. (ed.) *Trees and Mycorrhiza*. Forest Research Institute, Kuala Lumpur, Malaysia. pp. 133-188.
- Jones, A. and O'Carroll, L.** 1989. *Biotechnological modification of lignin*. Alberta Research Council, Technical Report, Edmonton, Canada. 18 pages polycopiées.
- Kirk, T.K. and Farrell, R.L.** 1987. Enzymatic combustion: The microbial degradation of lignin. *Ann. Rev. Microbiol.* **41**:465-505.
- Kirk, T.K. and Fenn, P.** 1982. Formation and action of ligninolytic system in Basidiomycetes». In: Frankland, J.C., Hedger, J.N. and Swift, M.J. (eds.), *Decomposer basidiomycetes: their biology and ecology*. Cambridge University Press, Cambridge. pp. 67-90.
- Lalande, R.L., Furlan, V. et Angers, D. A.** 1997. *Changes in microbial population and biological activity following addition of Ramial Chipped Wood on a sandy loam soil*. (Submitted for publication to the American Journal of Alternative Agriculture).
- Larochelle, L.** 1993. L'influence de la qualité des bois raméaux fragmentés (BRF) appliqués au sol: effets sur la dynamique de leur transformation. In: *Les actes du quatrième colloque international sur les bois raméaux fragmenté*, édité par le Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux. Département des Sciences Forestières, Université Laval, Québec, Canada. pp. 77-84.
- Larochelle, L., Pagé, F., Beauchamp, C. et Lemieux, G.** 1993. La mésofaune comme indicateur de la dynamique de la transformation de la matière ligneuse appliquée au sol. *AGROSOL* **6**(2):36-43.
- Leatham, G.F. and Kirk, T.K.** 1982. Regulation of lignolytic activity by nutrient nitrogen in white-rot basidiomycetes. *FEMS Microbiol. Lett.* **16**:65-67.
- Leisola, M. and Garcia, S.** 1989. The mechanisms of lignin degradation. In: *Enzyme systems for lignocellulose degradation*. Workshop on organic matter degradation, Galway, Ireland. Published by Elsevier Applied Science. pp. 89-99.
- Leisola, M. and Waldner, R.** 1988. Production, characterization and mechanism of lignin peroxidases. In: Zadrazil, F. and Reiniger, P. (eds.), *Treatment of lignocellulosics with white rot fungi*. Elsevier Appl. Sci. Publ. New York. p. 37-42.
- Lemieux, G.** 1986. *Le bois raméal et les mécanismes de fertilité du sol*. Université Laval. Faculté de Foresterie. 17 pages.
- Lemieux, G.** 1991. La perte de nutriments par la récolte des grumes: une absurdité. (Traduction et commentaires de B. Freedman: "Nutrient Removals during Forest Harvesting: Implications for Site Fertility"). Traduction en langue française et commentaires. Publication n° 20.
- Lemieux, G.** 1993. *Rapport de mission au Sénégal du 5 au 15 décembre 1992 pour le compte de l'Agence Canadienne de Développement International*. Université Laval. 25 pages.

- Lemieux, G.** 1995. *La dynamique de l'humus et la méthode expérimentale: l'apport de la forêt à l'agriculture par le bois raméal fragmenté*. Texte présenté à la Conférence Constitutive du Réseau Africain du Compost, Dakar, 26 avril. Université Laval, Québec, Canada. 13 pages.
- Lemieux, G.** 1995. Passer de l'enthalpie à l'entropie. *Ecodecision*, winter 1995, pp. 72-73. Royal Society of Canada. Université Laval, Québec, Canada.
- Lemieux, G.** 1995. *Rapport de mission en Afrique (Sénégal)*. CIDA and Université Laval, December 1994. 48 pages.
- Lemieux, G. et Lapointe, R. A.** 1985. *Essais d'induction de la végétation forestière vasculaire par le bois raméal fragmenté*. Université Laval, Faculté de Foresterie. 109 pages.
- Lemieux, G. et Lapointe, R.A.** 1986. *Le bois raméal et les mécanismes de fertilité du sol*. Département des Sciences Forestières, Université Laval, Québec. 17 pages.
- Lemieux, G. et Lapointe, R.A.** 1988. *L'importance du bois raméal dans la 'synthèse' de l'humus*. Département des Sciences Forestières, Université Laval, Québec. 29 pages.
- Lemieux, G. et Lapointe, R.A.** 1989. *La régénération forestière et les bois raméaux fragmentés: observations et hypothèses*. Département des Sciences Forestières, Université Laval, Québec. 223 pages.
- Lemieux, G. et Lapointe, R.A.** 1990. *Le bois raméal et la pédogénèse: une influence agricole et forestière directe*. Département des Sciences Forestières. Université Laval et Ministère de l'Énergie et des Ressources (Forêts), Québec. 35 pages.
- Lemieux, G. y Marciano, J.** 1994. *Informe sobre la misión realizada en la República Dominicana del 24 abril al 8 mayo 1994*. Département des Sciences Forestières, Université Laval, Québec, Canada.
- Lemieux, G. et Tétréault, J.-P (eds.)**. 1993. *Les actes du quatrième colloque international sur les bois raméaux fragmenté*. Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux. Département des Sciences Forestières, Université Laval, Québec, Canada. 187 pages.
- Lemieux, G. et Toutain, F.** 1992. *Quelques observations et hypothèses sur la diversification: l'aggradation des sols par l'apport de bois raméal fragmenté*. Université Laval. Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux publication n° 23. 13 pages.
- Lewis, N.G., Razal, R.A. and Yamamoto, E.** 1987. Lignin degradation by peroxidase in organic media: a reassessment. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. 7925-7927.
- Lynch, J.M. and Bragg, E.** 1985. Microorganisms and soil aggregate stability. *Adv. Soil Sci.* 2:133-171.
- Malloch, D.W., Pirozynski, K.A. and Raven, P.H.** 1980. Ecological and evolutionary significance of mycorrhizal symbioses in vascular plants. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 77:2112-2118.

- Martin, W.C., Pierce, R. S., Likens, G. E. and Bormann, F.H.** 1986. *Clearcutting Affects Stream Chemistry in the White Mountains of New Hampshire*. USDA Northeastern Forest Experiment Station Research Paper NE-579.
- Meyer, J. R. and Linderman, R.G.** 1986. Selective influence on population of rhizosphere or rhizoplane bacteria and actinomycetes by mycorrhizas formed by *Glomus fasciculatum*. *Soil Biol. Biochem.* **18**:191-196.
- Michaud, M.** 1993. *Les bois raméaux fragmentés: un amendement organique pour les sols en production horticole*. In: Les actes du quatrième colloque international sur les bois raméaux fragmenté, édité par le Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux. Département des Sciences Forestières, Université Laval, Québec, Canadá. pp. 49-55.
- Olsen, R.A., Clark, R.B. and Bennet, J.H.** 1981. The enhancement of soil fertility by plant roots. *Am. Sci.* **69**:378-384.
- Parkinson, D.** 1988. Linkage between resource availability, microorganisms and soil invertebrates. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **24**:21-32.
- Perry, D. A., Amaranthus, M.P., Borchers, J.G., Borchers, S. L. and Brainerd, R. E.** 1989. Bootstrapping in Ecosystems. *BioScience* **39**(4):230-237.
- Perry, D. A., Molina, R. and Amaranthus, M.P.** 1987. Mycorrhizae, mycorrhizosphere, and reforestation: current knowledge and research needs. *Can. Journ. For. Res.* **17**:929-940.
- Prigogine, I.** 1996. *La fin des certitudes*. Ed. Odile Jacob, Paris. 223 pages.
- Prigogine, I. et Stenger, I.** 1988. *Entre le temps et l'éternité*. Ed. Fayard, Paris.
- Rambelli, A.** 1973. The rhizosphere of mycorrhizae. In: Marks, A. C. and Kozlowski, T.T. (eds.), *Ectomycorrhizae: Their Ecology and Physiology*. Academic Press, London. p. 229-249.
- Ranger, J. et Bonneau, M.** 1984. Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de la forêt. I - Le cycle biologique en forêt. *Rev. For. Fr.* **2**:93-112.
- Ratnayake, R., Leonard, R.T. and Mengue, J. A.** 1978. Root exudation in relation to supply of phosphorus and its possible relevance to mycorrhizal formation. *New Phytol.* **81**:543-552.
- Rayner, A.D.M. and Boddy, Lynne.** 1988. *Fungal Decomposition of Wood*. John Wiley & Sons. 597 pp.
- Reid, C.P.P. and Mexal, J.G.** 1977. Water stress effects on root exudation by lodgepole pine. *Soil Biol. Biochem.* **9**:417-422.
- Rouquerol, T., Bauzon, D. & Dommenguez, Y.** 1975. *Les ectomycorhizes et la nutrition azotée et phosphate des arbres*. Congrès DGRST, mai 1975.
- Sauvesty, A., Pagé, F. et Giroux, M.** 1993. Impact des milieux pédologiques en bosses et creux sur les teneurs en composés phénoliques et en éléments minéraux dans les

- feuilles d'érable à sucre en dépérissement au Québec. *Can. Jour. For. Res.* **23**:190-198.
- Seastedt, T.R.** 1984. The role of microarthropods in decomposition and mineralization processes. *Ann. Rev. Entomol.* **29**:25-46.
- Seck, M.A.** 1994. Appui au développement pour les maraîchers des Niayes (Sénégal). In: Lemieux, G., *Rapport de mission africaine au Sénégal du 2 au 13 décembre 1994*. Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux (ed.) and Canadian International Development Agency. pp. 1-12.
- Seck, M.A. et Lemieux, G.** 1996. *Fertilisation organique par l'utilisation des Bois Raméaux Fragmentés (BRF) de filao (*Casuarina equisetifolia*) dans les cuvettes maraîchères des Niayes (Sénégal)*. Conférence de l'IFOAM, Copenhague, Denmark, august 1996. Université Cheikh Anta Dlop, Dakar. 19 pages. Publication n^o 69 GCBR Université Laval, Québec, Canada.
- Smith, B.W., Faulkner, G. L. and Powell, D.S.** 1994. *Forest Statistics of the United States, 1992*. General Technical Report NC-168. 145 pages.
- Stott, D. E., Kassim, G., Jarrell, M., Martin, J.P. and Halder, K.** 1993. Stabilisation and incorporation into biomass of specific plant carbons during biodegradation in soil. *Plant and Soil* **70**:15-26.
- Swift, M.J.** 1976. Species diversity and structure of microbial communities. In: Anderson, J.M. and MacFaden, A. (eds.), *Decomposition processes*. Blackwell Scientific Publications. Oxford. p. 185-222.
- Swift, M.J.** 1977. The role of fungi and animals in the immobilisation and release of nutrient elements from decomposing branch-wood. In: Lohm, U. and Penson, T. (eds.), *Soil Organisms as Components of Ecosystems*. p. 913-203. *Ecol. Bull.* 25 Swedish Natural Science Research Council, Stockholm.
- Swift, M.J., Healt, O.W. and Anderson, J.M.** 1979. The influence of resource quality on processes. In: *Studies in Ecology*, vol. 5 "*Decomposition in Terrestrial Ecosystems*". University of California Press, Berkeley. p. 118-167.
- Tien, M. and Kirk, T.K.** 1983. Lignin-degrading enzyme from Hymenomycete Phanerochaete chrysosporium. *Burds. Science* **221**:661-663.
- Tate, R.L.** 1987. *Soil organic matter: biological and ecological effects*. Wiley-Interscience Publ. New York, USA. 291 pp.
- Thomas-Bauzon, D., Kiffer, E., Pizelle, G. et Petidemange, E.** 1990. *Fixation d'azote et cellulolyse: activités de la nitrogénase et/ou de la cellulase d'organismes fixateurs d'azote et/ou cellulolytiques*. Presses de l'Université de Nancy. 89 pages.
- Thomas-Bauzon, D., Kiffer, E., Janin, G. et Toutain, F.** 1995. Méthodologie de recherche des bactéries cellulolytiques diastrophes appliquée à Spaherotermes sphaerotorax. *Science de la Vie/Life Science* **318**:699-707.
- Toutain, F.** 1966. Les entretiens de Nancy. In: Lemieux, G. (ed.), *Rapport des missions internationales de 1996*. Université Laval, Québec, Canada. pp. 186-191.

- Toutain, F.** 1981. Les humus forestiers: structures et modes de fonctionnement. *Rev. For. Fr.* **6**:449-464.
- Toutain, F.** 1993. Biodégradation et humification des résidus végétaux dans le sol: évolution des bois raméaux (étude préliminaire). In: *Les actes du quatrième colloque international sur les bois raméaux fragmenté*, édité par le Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux. Département des Sciences Forestières, Université Laval, Québec, Canada. pp. 103-110.
- Trappe, J.M.** 1962. Fungus associates of ectotrophic mycorrhizae. *Bot. Rev.* **28**:538-602.
- Tremblay, Y.** 1985. *Essais comparatifs de l'utilisation de la biomasse forestière et du lisier de porc dans la culture des pommes de terre par le compostage de surface avec apports variables d'engrais de synthèse*. Rapport interne, Ministère de l'Agriculture du Québec. 8 pages.
- Vaughan, D. & Ord, B.G.** 1985. Soil organic matter: a perspective on its nature, extraction, turnover and role in soil fertility. In: Vaughan, D. and Malcolm, R. E. (eds.), *Soil Organic Matter and Biological Activity*. Martinus Niljhoff & W. De Junk Publ., Dordrecht, Holland. pp. 469.
- Vicuna, R.** 1988. Bacterial degradation of lignin. *Enzyme Microb. Technol.* **10**:646-655.
- Vogt, K.A., Grier, C.C. and Meier, C. E.** 1982. Mycorrhizal role in net primary products and nutrient cycling in *Abies amabilis* ecosystems in western Washington. *Ecology* **63**:370-380.
- Whipps, J.M. and Lynch, J.M.** 1986. The influence of the rhizosphere on crop productivity. *Adv. Microb. Ecol.* **9**:187-244.

ISBN: 2-921728-36-2 (version espagnole)

Dépôt légal: Bibliothèque nationale du Québec. mai 1998

NOTA: Esta es traducción del “**Les fondements pédogénétiques des écosystèmes forestiers: une approche de la métastabilité par la biologie tellurienne**” del Prof. Gilles Lemieux. No es una traducción oficial ya que no se ha hecho las revisiones cuidadosas debidas; su única función es para que sirva como información adicional a estudiantes.

José E. Marcano M.
Departamento de Recursos Naturales
Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña
Santo Domingo, R. D.
Enero 1998

Mayo1997
Editario por
Grupo de Coordinación sobre Madera Rameal
Departamento de la Madera y Ciencias Forestales
Facultad de Ciencias Forestales y Geomática
Universidad Laval
Québec G1K 7P4
QUÉBEC
Canada
e. mail
gilles.lemieux@sbf.ulaval.ca
<http://forestgeomat.for.ulaval.ca/brf>
FAX 418-656-3177
tel. 418-656-2131 poste 2837
ISBN: 2-921728-36-2