

DOCTORADO EN CIENCIA Y TECNOLOGIA

**Interrelaciones entre la comunidad de lombrices de
tierra y la estructura y uso del suelo que habitan:
Dominios funcionales y cambios estructurales**

Trabajo de tesis para optar por el título de Doctor en Ciencia
y Tecnología de la Universidad Nacional de General Sarmiento

Autor: **Ing. Agr. Andrés Duhour**

Director: Dr. Fernando Momo

Co-Director: Dr. Marcelo Massobrio

16 de marzo de 2011

DOCTORADO EN CIENCIA Y TECNOLOGIA

Niveles de acceso al documento autorizados por el autor

El autor de la tesis puede elegir entre las siguientes posibilidades para autorizar a la UNGS a difundir el contenido de la tesis:

- a) Liberar el contenido de la tesis para acceso público
- b) Liberar el contenido de la tesis solamente a la comunidad universitaria de la UNGS.....
- c) Retener el contenido de la tesis por motivos de patentes, publicación y/o derechos de autor por un lapso de cinco años
- a. Título completo del trabajo de Tesis:
Interrelaciones entre la comunidad de lombrices de tierra y la estructura y uso del suelo que habitan: Dominios funcionales y cambios estructurales.
- b. Presentado por: Duhour Andrés Esteban.
- c. Correo electrónico: aduhour@unlu.edu.ar
- d. Estudiante del Postgrado: Doctorado en Ciencia y Tecnología.
- e. Institución o Instituciones que dictaron el Posgrado (consignar los nombres desarrollados y completos): Universidad Nacional de General Sarmiento.

- f. Para recibir el título de (consignar completo):
 - a) Grado académico que se obtiene: Doctor.
 - b) Nombre del grado académico: Doctor en Ciencia y Tecnología.
- g. Fecha de la defensa: 16/03/2011.
- h. Directores de la Tesis:
 - Director: Dr. Momo, Fernando Roberto.
 - Co-Director: Dr. Massobrio, Marcelo Juan.
- i. Tutor de la Tesis: Dr. Montserrat, Javier.
- j. Colaboradores con el trabajo de Tesis: No se registran.
- k. Alcance geográfico y/o temporal de la Tesis: El trabajo de campo se realizó en Luján, Provincia de Buenos Aires, Argentina y los resultados relacionados son aplicables en general a sitios que presentan suelos con las mismas características.
- l. Descripción física del trabajo de Tesis: 173 páginas, 66 figuras, código fuente de 10 programas para el análisis estadístico y de imágenes.
- m. Temas tratados en la Tesis (palabras claves): Estructura del suelo, Perturbaciones, Fractales, Dimensión fractal de masa, Dimensión fractal de superficie, Distribución de tamaño de poros, Fauna del suelo, Lombrices, Estructura de la comunidad, Índices de diversidad, Funciones de distribución de abundancias relativas, Complejidad.

Resumen

En la actualidad el ecosistema pampeano está sometido a un intenso régimen de perturbación debido a la intensificación de la agricultura observada en los últimos treinta años. Argentina ha sufrido un proceso de agriculturización, caracterizado por la expansión de la superficie utilizada con cultivos anuales sobre diferentes ambientes, en competencia con usos tradicionales de la tierra como la rotación de agricultura con ganadería. La degradación de esta estructura del suelo y su relación con las comunidades de fauna del suelo se ha vuelto un tema crucial para el manejo del recurso. En este trabajo se analizan los cambios producidos en la estructura del suelo en sitios con distinto uso en la búsqueda de relacionar estos con la estructura de las comunidades de lombrices encontradas. En este trabajo el análisis de la estructura del suelo se realiza mediante la caracterización de su estructura fractal y el análisis de la distribución de tamaño de poros. Una descripción completa de la comunidad de lombrices es realizada a los efectos de comprender sus relaciones con los usos del suelo estudiados y con los patrones geométricos encontrados.

Resumo

Atualmente, o ecossistema pampas está sujeito a um regime intenso de perturbação devido à intensificação agrícola observada nos últimos trinta anos. Argentina sofreu um processo de agriculturização, caracterizado pela expansão das terras utilizadas para culturas anuais em diferentes ambientes, em concorrência com os usos tradicionais como a rotação entre a agricultura e pecuária. A degradação da estrutura do solo e sua relação com as comunidades de fauna que habita se tornou uma questão crucial para a gestão do recurso. Este trabalho analisa as mudanças na estrutura do solo em locais com uso diferente na tentativa de relacioná-los com a estrutura das comunidades de minhocas. Neste trabalho a análise da estrutura do solo é feita através da caracterização de sua estrutura fractal e análise da distribuição de tamanho dos poros. A descrição completa da comunidade de minhocas é feita com o propósito de compreender as suas relações com os usos da terra estudados e os padrões geométricos encontrados.

Abstract

At present the pampas ecosystem is under an intense disturbance regime due to agricultural intensification observed in the last thirty years. Argentina has suffered an agriculturization process characterized by the advance of annual crops over different environments in competition with previous and traditional land uses such as the rotation of agriculture with grazing. Soil structure degradation and its relationship with soil fauna communities has become a crucial issue for resource management. In this work we analyze the changes in soil structure in sites with different land uses in the search of to establish relationships with the structure of earthworm communities. In this work the analysis of changes in soil structure is performed by the characterization of its fractal structure and the analysis of pore size distribution. A complete description of the earthworm community is conducted for the purpose of understanding their relationships with land uses studied and the geometric patterns found.

Jurado

Aprobado por (Apellidos y Nombres del Jurado):

Dr. Coviella, Carlos E.

Dr. Martínez Pablo A.

Dr. Saravia Leonardo A. C.

Firma y aclaración de la firma del Presidente del Jurado:

.....

Firma del autor de la tesis:

.....

Publicaciones

- A. Duhour, M. C. Costa, F. Momo, y L. Falco. Estructura fractal del suelo bajo distintos sistemas de manejo. *Ciencia del Suelo*, 22:36–39, 2004.
- A. Duhour, L. Falco, L. Sabatté, F. Momo, y L. Malacalza. Comunidad de lombrices y estructura fractal en relación con el uso del suelo. En *Conferencia Internacional Ecological Society of America*, Mérida, México, 2006.
- A. Duhour, C. Costa, F. Momo, L. Falco, y L. Malacalza. Response of earthworm communities to soil disturbance: Fractal dimension of soil and species' rank-abundance curves. *Applied Soil Ecology*, 43:83–88, 2009.

Aportes originales

El planteo del problema de la tesis constituye un aporte original ya que es el primer trabajo en el que se intenta relacionar el deterioro del suelo según su uso, descrito a través de dimensiones fractales del espacio poroso y la matriz sólida, con los dominios funcionales de las lombrices de tierra y su acción particular sobre el suelo. Se han establecido cuáles son los cambios producidos por los diferentes usos del suelo en su estructura de poros y de agregados y, en particular, en la complejidad de configuración de esa estructura (cap. 3); además se han demostrado las relaciones existentes entre esos cambios y los que sufren las comunidades de lombrices en abundancia, biomasa, estructura de edades y diversidad (cap. 3). También se ha demostrado cómo esos cambios tienen diferentes grados de intensidad y reversibilidad a lo largo del tiempo (cap. 4) y de qué forma los cambios en el ambiente edáfico tanto físicos como químicos y en aporte de alimento para las lombrices, provocan variaciones predecibles en las comunidades de oligoquetos (cap. 4). Se han caracterizado mediante las dimensiones fractales y métricas relacionadas las morfologías de los poros que producen diferentes especies endógenas de lombrices. Esto se asocia con los cambios en el suelo que las propias lombrices producen con su acción (cap. 5). En definitiva se ha logrado una síntesis entre los indicadores estructurales de uso del suelo, los indicadores biológicos, los efectos del suelo sobre las lombrices y viceversa; todo en el marco de la geometría fractal para el caso de la caracterización de las estructuras y en el contexto de la teoría ecológica de comunidades para la explicación de los cambios biológicos.

A Catalina

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a las distintas personas que participaron desde el comienzo -hace un poquito más de 10 años!- en la concreción de esta tesis...

- A Cristina Costa y Fernando Momo, con los que inicié este camino...
- A todos los que colaboraron en los muestreos.
- Al personal de laboratorios de la Universidad Nacional de Luján y de la Universidad Nacional de General Sarmiento.
- A todos los compañeros del Laboratorio de Ecología de la Universidad Nacional de Luján.

Índice general

1	Introducción	1
1.1	Antecedentes	1
1.2	La estructura del suelo	2
1.3	Métodos de análisis de la estructura del suelo	3
1.4	Fractales	5
1.5	La fauna edáfica: las lombrices de tierra	6
1.6	Dominios funcionales	8
1.7	Objetivos	10
1.8	Hipótesis	10
2	Materiales y Métodos	12
2.1	Sitios de estudio	12
2.2	Análisis químicos y físicos del suelo	15
2.3	Técnicas de análisis de la estructura fractal del suelo	19
2.3.1	Preparación de bloques pulidos y secciones delgadas	20
2.3.2	Corte y pulido de bloques de suelo impregnados	21

2.3.3	Digitalización y Procesamiento de Imágenes	21
2.3.4	Cálculo de la dimensión fractal	22
2.3.5	Análisis de formas y tamaño de poros	24
2.4	Técnicas de análisis de la comunidad de lombrices de tierra . .	25
2.4.1	Muestreo e identificación de especies	25
2.4.2	Análisis de la estructura de la comunidad	26
2.4.3	Funciones de distribución de abundancias relativas . .	28
2.5	Análisis multivariado de las diferencias entre sitios	30
2.6	Análisis estadístico	31
3	Comunidad de lombrices y estructura del suelo I	33
3.1	Materiales y Métodos	34
3.2	Resultados	37
3.2.1	Descripción de la comunidad de lombrices	37
3.2.2	Biomasa	37
3.2.3	Abundancia	37
3.2.4	Estructura de edades	39
3.2.5	Diversidad de especies	41
3.2.6	Distribución de abundancias relativas en relación con el uso del suelo	45
3.2.7	Análisis fractal de la estructura del suelo	48
3.3	Discusión y conclusiones	53
4	Comunidad de lombrices y estructura del suelo II	57
4.1	Materiales y Métodos	58
4.2	Resultados	62

4.2.1	Análisis físico-químicos	62
4.2.2	Descripción de la comunidad de lombrices	64
4.2.3	Biomasa	64
4.2.4	Abundancia	67
4.2.5	Diversidad de especies	68
4.2.6	Distribución de abundancias relativas en relación con el uso del suelo	75
4.2.7	Análisis multivariado de las diferencias entre sitios	78
4.2.8	Espectro de tamaño de los animales encontrados	78
4.2.9	Análisis fractal de la estructura del suelo	80
4.3	Discusión y conclusiones	86

5 Dominios Funcionales: Relación entre la Comunidad de Lombrices y el Suelo **90**

5.1	Distribución de tamaños y forma de poros	91
5.1.1	Materiales y métodos	91
5.1.2	Resultados	92
5.2	Patrones espaciales de cada especie	98
5.2.1	Materiales y métodos	101
5.2.2	Resultados	103
5.3	Clasificación de poros producidos por lombrices por métodos de análisis multivariado	108
5.3.1	Materiales y Métodos	108
5.3.2	Resultados	110
5.4	Discusión y conclusiones	112

6 Síntesis y conclusiones	115
6.1 Gradiente de perturbación	115
6.2 Cambios asociados al uso del suelo	118
6.3 Caracterización del dominio funcional	120
A Material adicional	123
A.1 Gráficos y Tablas	123
A.2 Fotos	124
A.3 Métodos para discriminar la estructura generada por las lom- brices de tierra de la estructura edáfica: Uso de ImageJ	124
A.4 Cálculo de la dimensión fractal. Uso de ImageJ con el comple- mento Fraclac.	128
A.5 Programas en R para el análisis estadístico	129
A.5.1 Test de Nemenyi	129
A.5.2 Indices de diversidad	130
A.5.3 Especies indicadoras	132
A.6 Test de χ^2 para evaluar las diferencias estadísticas entre his- togramas de frecuencias	135
Bibliografía	137

Índice de figuras

1.1	Un fractal determinístico, la curva de Koch. En cada iteración, su longitud es $\frac{4}{3}$ la del paso anterior.	7
2.1	Datos meteorológicos para el mes de muestreo.	15
2.2	Ubicación geográfica.	16
2.3	Plano del campo de la Universidad Nacional de Luján.	18
2.4	Cajas de Kubiena utilizadas para la obtención de muestras de suelo sin disturbar.	20
2.5	Dispositivo para iluminar las muestras con luz ultravioleta, para la toma de fotos. Se observa el contraste obtenido entre poros y suelo.	21
2.6	Medición de área, perímetro y factor de forma. Poro seleccionado: Área: 2,21 mm ² , Perímetro: 6,78 mm, F: 0,60.	24
3.1	Biomasa de lombrices en g/m ²	38
3.2	Abundancia de lombrices (ind/m ²).	40
3.3	Abundancia relativa de las especies en el sitio Nat.	43

3.4	Abundancia relativa de las especies en el sitio P3.	43
3.5	Abundancia relativa de las especies en el sitio P2.	44
3.6	Abundancia relativa de las especies en el sitio P1.	44
3.7	Abundancia relativa en el sitio Nat, y su ajuste al modelo de serie geométrica.	46
3.8	Abundancia relativa en el sitio P3, y su ajuste al modelo de serie geométrica.	47
3.9	Abundancia relativa en el sitio P2, y su ajuste al modelo de serie geométrica.	47
3.10	Abundancia relativa en el sitio P1, y su ajuste al modelo de serie geométrica.	48
3.11	Dimensión fractal de masa del suelo D_{ms} en cada sitio estudiado.	50
3.12	Dimensión fractal de masa del espacio de poros D_{mp} en cada sitio estudiado.	50
3.13	Dimensión fractal de superficie de los poros D_s en cada sitio estudiado.	51
4.1	Contenido de materia orgánica en porcentaje.	63
4.2	pH.	63
4.3	Densidad aparente (δ_{ap}) en $Mg/3m$	64
4.4	Biomasa de lombrices en cada temporada desde el comienzo del muestreo (g/m^2).	66
4.5	Biomasa de lombrices en g/m^2	66
4.6	Abundancia de lombrices en cada temporada desde el comienzo del muestreo (individuos/ m^2).	68

4.7	Abundancia de lombrices, individuos/m ²	70
4.8	Abundancia relativa de las especies de lombrices en el sitio A1.	71
4.9	Abundancia relativa de las especies de lombrices en el sitio A2.	72
4.10	Abundancia relativa de las especies de lombrices en el sitio P1.	72
4.11	Abundancia relativa de las especies de lombrices en el sitio P2.	73
4.12	Abundancia relativa de las especies de lombrices en el sitio EC.	73
4.13	Abundancia relativa de las especies de lombrices en el sitio R.	74
4.14	Especies indicadoras por temporada.	79
4.15	Especies indicadoras por lote.	79
4.16	Largo promedio de lombrices encontradas en el Otoño de 2005.	80
4.17	Imágenes registradas en los distintos sitios para el cálculo de la dimensión fractal de masa de los poros del suelo (D_{mp}).	82
4.18	Dimensión fractal de masa del sistema poroso D_{mp}	83
4.19	Dimensión fractal de masa de la parte sólida del suelo D_{ms}	83
4.20	Dimensión fractal del contorno de los poros D_s	84
4.21	Dimensión fractal de masa del sistema poroso D_{mp} según sitio y temporada.	85
4.22	Dimensión fractal de masa del espacio sólido D_{ms} según sitio y temporada.	85
4.23	Dimensión fractal de superficie D_s según sitio y temporada.	86
5.1	Número de poros por clase de forma y por sitio de muestreo. Temporada: Primavera 2004. Se encontraron diferencias signi- ficativas para los poros redondeados (ver cuadro 5.2).	95

5.2	Número de poros por clase de forma y sitio de muestreo. Temporada: Verano 2005. Se encontraron diferencias significativas para los poros redondeados (ver cuadro 5.2).	95
5.3	Número de poros por clase de forma y sitio de muestreo. Temporada: Invierno 2005. Se encontraron diferencias significativas para los poros redondeados (ver cuadro 5.2).	96
5.4	Número de poros por clase de forma y sitio de muestreo. Temporada: Primavera 2005. No se encontraron diferencias significativas para ninguna de las clases de forma (ver cuadro A.2).	96
5.5	Número de poros por clase de forma y sitio de muestreo. Temporada: Verano 2006). Se encontraron diferencias significativas para los poros irregulares (ver cuadro 5.3).	97
5.6	Número de poros por clase de forma y sitio de muestreo. Temporada: Otoño de 2006. No se encontraron diferencias significativas para ninguna de las clases de forma (ver cuadro A.2).	97
5.7	Histograma de frecuencias de tamaño de poros (Primavera 2004).	98
5.8	Histograma de frecuencias de tamaño de poros (Verano 2005).	99
5.9	Histograma de frecuencias de tamaño de poros (Invierno 2005).	99
5.10	Histograma de frecuencias de tamaño de poros (Primavera 2005).	100
5.11	Histograma de frecuencias de tamaño de poros (Verano 2006).	100
5.12	Histograma de frecuencias de tamaño de poros (Otoño 2006).	101
5.13	Caja de vidrio utilizada para cada unidad experimental.	102
5.14	Histogramas de frecuencias de tamaño de poros.	105
5.15	Poros redondeados por tratamiento.	105
5.16	Dimensión fractal de masa del sistema de poros.	106

5.17	Dimensión fractal de masa del espacio sólido del suelo.	107
5.18	Dimensión fractal de superficie del sistema de poros.	107
5.19	Conjunto de entrenamiento de bioporos.	109
5.20	Conjunto de entrenamiento de no-bioporos.	109
A.1	Imágenes registradas en el ensayo del efecto de dos especies de lombrices.	125
A.2	Captura de pantalla mostrando el programa ImageJ junto al complemento Fraclac para el cálculo de la dimensión fractal. .	129
A.3	Tabla ingresada en R para el análisis de datos de especies. . .	133

Índice de cuadros

2.1	Características morfológicas, químicas y físicas del horizonte superficial de los sitios de estudio.	16
2.2	Historia de uso de los sitios seleccionados en la Universidad Nacional de Luján. Abreviaturas y nombres científicos: PP, Pasturas permanentes, Rg: , Av: , Mijo: , Mz: , Sg: , Moha: , Ec:	17
3.1	Secuencia de cultivos y escala de agresión física propuesta. . .	35
3.2	Biomasa de lombrices en g/m ²	38
3.3	Abundancia de lombrices (ind/m ²).	39
3.4	Número promedio de adultos, subadultos y juveniles encontrados en cada lote bajo estudio. Se presenta la proporción de juveniles por adulto.	40
3.5	Especies presentes en cada lote. Se presenta la categoría ecológica de cada una, la familia y se marcan las especies dominantes.	42

3.6	Diversidad de especies. Índices de Shannon (H'), Simpson y Margalef (k), riqueza observada, riqueza estimada mediante rarefacción ($E(S)$) y el estimador jackknife del índice de Shannon con intervalos de confianza. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).	45
3.7	Valores de AIC para la bondad de ajuste de los modelos de serie geométrica y bastón roto a las curvas de rango - abundancia en todos los sitios analizados. Para el modelo de SG se muestran los valores de k . Los menores valores del AIC (*) indican mejor ajuste al modelo.	46
3.8	Resultados obtenidos para D_{ms} , D_{mp} , D_s y δ_{ap} . Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$). Para cada medida se presentan valores medios seguidos de su respectivo error estándar.	49
4.1	Sitios de estudio.	59
4.2	Análisis químicos y composición textural en cada sitio de estudio.	61
4.3	Biomasa de lombrices en $g/m^2 \pm$ error estándar para cada sitio y temporada evaluados. Letras distintas indican diferencias significativas por el test no paramétrico de Nemenyi.	65
4.4	Abundancia promedio de lombrices \pm error estándar para cada sitio y temporada evaluados. Letras distintas indican diferencias significativas por el test no paramétrico de Nemenyi.	69
4.5	Especies presentes en los sitios estudiados.	70

4.6	Especies presentes en los sitios estudiados (Número de individuos).	71
4.7	Índices de diversidad de especies. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$). S : Riqueza observada H' : Índice de Shannon, H'^* : Estimador jackknife de H' , $E(S)$: Riqueza estimada mediante rarefacción.	74
4.8	Valores de AIC para la bondad de ajuste de los modelos de serie geométrica y bastón roto a las curvas de rango - abundancia en todos los sitios analizados. Para el modelo de SG se muestran los valores de k . Los menores valores del AIC (*) indican mejor ajuste al modelo.	76
4.9	Dimensiones fractales de masa de los poros (D_{mp}) y del suelo (D_{ms}) y dimensión fractal de superficie (D_s). Letras distintas indican diferencias significativas con una probabilidad $p < 0,05$ según los tests de Kruskal-Wallis y de Nemenyi.	84
5.1	Número de poros totales por lote y temporada. Se muestran las temporadas para las que el test de Kruskal-Wallis dió significativo. Letras distintas implican diferencias significativas por el test de comparaciones múltiples de Nemenyi.	94
5.2	Número de poros redondeados por lote y temporada. Se muestran las temporadas para las que el test de Kruskal-Wallis dió significativo. Letras distintas implican diferencias significativas por el test de comparaciones múltiples de Nemenyi.	94

5.3	Número de poros irregulares por lote. Este tipo de poros mostró diferencias significativas solamente en el Verano de 2006. Letras distintas implican diferencias por el test de comparaciones múltiples de Nemenyi.	94
5.4	Número de poros totales, redondeados y dimensiones fractales calculadas en cada tratamiento.	104
5.5	Coefficientes de la función discriminante ordenados de mayor a menor valor absoluto.	111
5.6	Matriz de clasificación. Para cada categoría de poros se muestra el porcentaje de los mismos que fue clasificado correcta e incorrectamente.	111
A.1	Valor p del test de normalidad de Shapiro para los valores de forma de los poros en cada temporada. Valores mayores a 0,05 indican que los datos se ajustan a una distribución normal. . .	123
A.2	Valor p para el test de Kruskal-Wallis realizado con los resultados de forma de los poros en cada temporada. Valores menores a 0,05 (en negritas) indican un resultado significativo.	124

Capítulo **1**

Introducción

1.1 Antecedentes

La Argentina ha sufrido en los últimos treinta años un proceso de agriculturización, caracterizado por la expansión de la superficie utilizada para realizar cultivos anuales sobre diferentes ambientes, en competencia con usos tradicionales de la tierra como la rotación de agricultura con ganadería [66, 102]. Este incremento se asocia a cambios tecnológicos, el auge del monocultivo de soja transgénica, la utilización de la siembra directa como sistema de manejo del suelo, la intensificación de la ganadería y su desplazamiento a zonas extrapampeanas y también a nuevos modelos de gestión empresarial que permiten la concentración productiva [9, 65]. Como resultado de estas tendencias, el ecosistema pampeano está sometido a un intenso régimen de perturbación.

Las consecuencias de este proceso presentan aspectos productivos, económicos, sociales y ecológicos [41]. Entre estos últimos, el proceso de degradación física de los suelos, descrito en los trabajos de diferentes autores

[18, 72, 87], muestra sus efectos en el deterioro de la estructura del sistema edáfico. Este deterioro se manifiesta también en cambios en las comunidades de organismos que habitan debajo de la superficie [18, 25].

Estos procesos de cambio en la agricultura y la consecuente degradación ambiental observada ocurren a una escala mundial, Altieri y Nicholls [2] afirman que la ciencia agrícola ha llegado a un consenso general sobre la crisis ambiental que enfrenta la agricultura moderna. La caracterización del estado del suelo, la necesidad de definir su calidad o salud y la aparición de una nueva conceptualización del mismo basada en un enfoque holístico, han sido objeto de numerosas investigaciones y forman parte del esfuerzo por comprender las complejas causas de estos procesos [1, 42, 52, 81].

1.2 La estructura del suelo

La estructura es considerada uno de los caracteres morfológicos principales de los suelos [88]. Su importancia radica en el papel que le corresponde en el control de distintas propiedades de los mismos.

Algunos autores definen a la estructura del suelo como el arreglo espacial entre partículas sólidas, que forman agregados de orden cada vez mayor, y el espacio de poros que se combina con ellas [46, 68]. Puede ser definida también, de manera más completa, como la heterogeneidad de los distintos componentes y propiedades de los suelos [27]. Como propiedad morfológica tiene relación con procesos físicos, químicos y biológicos del suelo. Como ejemplo, la geometría de los poros y de sus interconexiones y la distribución de tamaño de poros interviene en el movimiento de fluidos [88]; el espacio

poroso es el hábitat de diversos organismos y el medio para el desarrollo de las raíces. Por otro lado, la geometría de las paredes de los agregados controla la velocidad de intercambio químico entre el sólido y la solución del suelo influyendo en la dinámica microbiana [22].

Todos estos procesos, que se producen en distintas escalas de tamaño de partículas y agregados, tienen en definitiva relación con el flujo de agua y aire a través del perfil, con la respuesta vegetal y con la aptitud del suelo para el tránsito de la maquinaria y el laboreo mecánico [27, 68, 88, 106], características que hacen a la capacidad productiva de los suelos y a la calidad del ambiente. De lo dicho anteriormente, se desprende que la estructura del suelo es un aspecto clave para la sustentabilidad de la agricultura [47, 59, 79, 106].

1.3 Métodos de análisis de la estructura del suelo

Para la descripción de esta estructura se ha seguido tradicionalmente un esquema cualitativo que analiza la forma, el tamaño y el grado de desarrollo de los agregados [14, 23, 88]. Pero una descripción de este tipo no es útil para relacionar la estructura con los procesos que se asocian a ella, para establecer comparaciones con otros suelos, sistemas de manejo, etc. o para ser utilizada como medida del estado de la estructura. En consecuencia, debe desarrollarse un modelo cuantitativo para el análisis de la estructura del suelo [3, 23, 59]. El análisis de la estabilidad de agregados [49] es un método

cuantitativo que permite analizar los efectos del manejo en los aspectos que controlan la formación de los agregados y se ha propuesto como indicador de sustentabilidad [79, 105]. Sin embargo, este método no puede ser utilizado para el estudio de aspectos relacionados con el arreglo espacial, y con la forma y tamaño de los poros y agregados, y por lo tanto, tampoco utilizarse en el modelado de la estructura o los procesos que ocurren en el suelo. Para ello se requieren métodos vinculados al campo general de la morfología matemática [89].

Los agroecosistemas son sistemas complejos, de manera que las herramientas derivadas de la geometría fractal pueden ser utilizadas para integrar los procesos edáficos permitiendo una descripción cuantitativa de la estructura del suelo [4, 8, 22, 80]. La ciencia del suelo ha realizado un número creciente de aplicaciones con este enfoque en los últimos 20 años, mostrando la utilidad de la geometría fractal en la descripción de la estructura del suelo y en la comprensión de fenómenos físicos, químicos y biológicos que suceden en el mismo. Numerosos autores han utilizado estos conceptos para estudiar los procesos de difusión y convección en medios porosos, la actividad microbiana [22], los procesos de agregación y fragmentación [84, 85], los cambios que se producen en la morfología de poros y agregados con relación al uso del suelo [32, 36, 78, 85, 97]. Por su parte, Giménez y colab. [44] realizan una revisión de los modelos que aplican la geometría fractal al estudio de las propiedades hidráulicas de los suelos.

Las dimensiones fractales se han utilizado para la caracterización del hábitat y el análisis de las modificaciones producidas por diferentes comunidades de organismos del suelo. Kampichler [56] desarrolla el potencial que tienen

los conceptos de la geometría fractal en diferentes estudios de la fauna del suelo. Este autor realiza una revisión de este enfoque para describir el patrón de movimiento de nematodos y para el análisis del impacto de la complejidad del hábitat en la relación tamaño corporal:abundancia de microartrópodos de suelo. Finlay y Fenchel [37] sugieren por su parte que la riqueza observada y la abundancia de protozoos del suelo está explicada por la estructura fractal del suelo. Romañach y Le Comber [94] analizan la correlación entre las dimensiones fractales con otras medidas geométricas de las galerías de *Thomomys bottae*.

1.4 Fractales

Este enfoque, permite describir objetos conceptuales o concretos que realizan un “cierto grado” de ocupación del espacio euclídeo [40]. Una de las características de los objetos fractales es la autosemejanza. Esta propiedad, conocida también como invariancia por cambio de escala, consiste en que no existe una escala característica del objeto fractal a la que se pueda definir su medida, asimismo, significa que el grado de irregularidad del objeto es independiente del detalle con el que es observado [4, 5]. Esta propiedad puede observarse en fractales determinísticos, como la curva de Koch (ver figura 1.1).

Un concepto central en esta temática es el de dimensión fractal. Según Frontier [40], la dimensión fractal es una medida del grado de ocupación que un objeto geométrico hace del espacio, o del grado de irregularidad del mismo. Los objetos irregulares como la curva de Koch y otros objetos naturales como los analizados posteriormente en este trabajo, presentarán dimensiones

fractales no enteras, mayores que su dimensión topológica¹. En este tipo de objetos geométricos puede calcularse exactamente su dimensión fractal (D) a partir de conocer el proceso iterativo que las construye, en el caso de la curva de Koch, $D = \frac{\log 4}{\log 3} = 1,261$, que es mayor que 1, la dimensión topológica de una curva. Para profundizar este tema puede verse Frontier [40] o Peitgen y colab. [83].

Las estructuras naturales, sin embargo, no parecen las mismas a las distintas escalas de observación, no son fractales en el sentido estricto puesto que no muestran autosemejanza en un rango infinito de escalas. Por ello, sólo pueden aproximarse a un fractal entre dos escalas características [22]. Además, muchas veces la variable que estamos midiendo es de tipo gradual, y la estructura no presenta una dimensión fractal única sino un espectro de dimensiones fractales. Este tipo de objetos se conoce con el nombre genérico de multifractal [48]. Por razones físicas, no pueden obtenerse representaciones de los mismos con un infinito nivel de detalle. Su dimensión fractal no puede calcularse a partir de sus propiedades de autosemejanza como en la curva de Koch sino que debe estimarse a partir, por ejemplo, del método de *Box-Counting*, explicado en la sección 2.3.4.

1.5 La fauna edáfica: las lombrices de tierra

Además de los efectos de la agriculturización en la parte física del suelo mencionados al comienzo, es creciente el interés en analizar las relaciones entre

¹Los objetos geométricos euclídeos, esto es: puntos, líneas y curvas, superficies y volúmenes regulares, se caracterizan por tener una dimensión entera. Su valor es conocido: los puntos tienen una dimensión 0, las líneas y curvas 1, las superficies 2 y los volúmenes 3. Esta dimensión se denomina dimensión topológica (D_T).

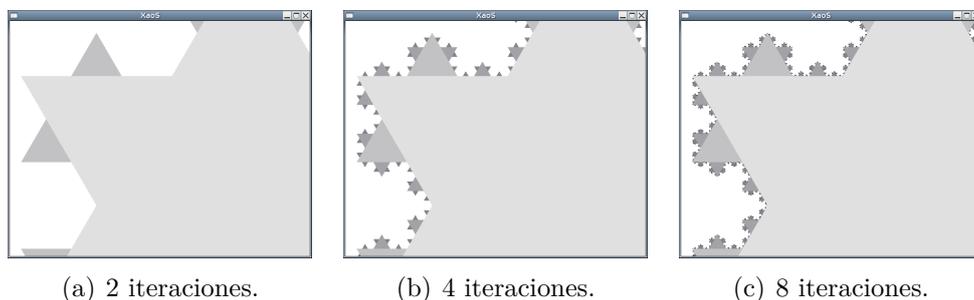


Figura 1.1: Un fractal determinístico, la curva de Koch. En cada iteración, su longitud es $\frac{4}{3}$ la del paso anterior.

los aspectos estructurales del suelo y las diferentes comunidades de organismos que componen la fauna del mismo [25]. Cabrera y Crespo [16] dan una descripción de la fauna del suelo y analizan el rol de algunos grupos de organismos en la modificación de aspectos físicos y químicos del suelo. La criptofauna (del griego *κρυπτός*: oculto, escondido), es el grupo de organismos que habita debajo de la superficie del suelo, la hojarasca o en sitios de difícil acceso. La descripción de las interacciones con su hábitat claramente presenta condicionamientos físicos, que dificultan su análisis en la búsqueda de estudiar los efectos que pueden tener sobre ella los cambios en el suelo, como así también qué aporte estructural realizan al mismo.

Diversos autores han documentado cómo el deterioro físico afecta la fauna edáfica, modificando su composición específica, su biomasa y abundancia y también por qué muchos de los grupos funcionales que habitan en el mismo son posibles indicadores de este deterioro [10, 17, 81]. Römcke y colab. [95] proponen el uso de las comunidades de lombrices en la clasificación ecológica de los suelos. Recientemente en nuestro país Momo y Falco [74] recopilan información sobre los principales grupos taxonómicos de organismos que habitan en el suelo, haciendo hincapié en cuestiones taxonómicas y la relación

de cada grupo con el manejo de los suelos.

1.6 Dominios funcionales

Las lombrices de tierra conforman uno de los grupos más importantes de la fauna edáfica y son uno de los componentes más relacionados con la estructura del suelo. Las comunidades de estos organismos están involucradas en procesos clave del suelo, como son la descomposición de la materia orgánica, el reciclado de nutrientes, la formación de agregados estables y la creación de macroporos [33, 39, 62]. Jones y colab. [54] caracterizan a las lombrices como ingenieros del ecosistema, debido a su capacidad de modular la disponibilidad de recursos para otros organismos por medio de las modificaciones del suelo que realizan con sus movimientos y hábitos alimentarios [10, 11, 82, 96]. Sin embargo, las lombrices también son afectadas por las acciones humanas que modifican físicamente el suelo [19, 24, 28, 33].

Cuando un organismo de la fauna edáfica es capaz de generar un microambiente específico, separado físicamente de la matriz del suelo, se denomina a ese microambiente dominio funcional [61]. En el caso de las lombrices de tierra, dicho dominio funcional se conoce como drilosfera y representa el conjunto del volumen del suelo que es influenciado por las lombrices. Brown y colab. [13] exploran las relaciones de la drilosfera con los demás dominios funcionales presentes en el suelo. Sus características variarán en función de las especies de lombrices presentes y su abundancia.

En la región pampeana se encuentran principalmente especies de lombrices provenientes de Europa y nativas. En el contexto de intensidad de

perturbaciones observado, se hace importante conocer el impacto real que tienen como posibles ingenieros del ecosistema, e intentar definir las características de su dominio funcional.

Es evidente que la principal estructura macroscópica generada por las lombrices en el suelo son sus galerías, que constituyen en sí la base del dominio funcional generado. La caracterización del sistema de galerías será entonces una herramienta para describir la drilosfera. Existen diversos estudios sobre las características geométricas de las galerías de lombrices [6, 53, 55, 60, 104], pero en su mayoría están aplicados a especies que no se encuentran en la provincia de Buenos Aires, o que se desarrollan en suelos diferentes a los que presenta nuestra zona de estudio. Estos autores utilizan técnicas relacionadas con el análisis de imágenes, técnicas de tomografía computada, o de medición de propiedades hidráulicas del suelo. No se ha documentado hasta el momento la aplicación de herramientas derivadas de la geometría fractal.

La estructura y complejidad de las galerías que realizan las lombrices puede ser analizada mediante el estudio de la dimensión fractal, técnica utilizada para el estudio del suelo como hábitat de diversos organismos o para la descripción de las galerías que realizan [37, 56, 94]. En trabajos previos hemos encontrado una relación relevante entre la estructura de la comunidad de lombrices y la dimensión fractal del sistema poroso del suelo en estudios realizados en lotes de uso agrícola o de pastoreo [29, 31].

El interrogante que este trabajo pretende responder es si, dadas las condiciones de uso predominantes en la región pampeana y las características de sus suelos, la influencia de las lombrices de tierra llega a ser lo suficientemente importante como para considerarlas con propiedad de ingenieras del ecosiste-

ma y pueden observarse las estructuras asociadas a su dominio funcional. Del mismo modo, se intenta evaluar si la utilización de técnicas derivadas de la geometría fractal, con un enfoque que parte de conceptualizar la complejidad del sistema en análisis, son útiles en la caracterización de estas estructuras y proveen información valiosa en la comprensión de los procesos asociados a su generación en el suelo.

1.7 Objetivos

1. Analizar y comparar las dimensiones fractales mediante técnicas de análisis de imágenes en suelos pertenecientes al subgrupo Argiudol típico.
2. Describir la estructura de la comunidad de lombrices de los mismos suelos y relacionarla con las dimensiones fractales.
3. Analizar los patrones, formas y tamaños de las estructuras generadas por lombrices de tierra en un suelo Argiudol típico.
4. Establecer la relación entre el uso del suelo y la estructura de la comunidad de lombrices.

1.8 Hipótesis

- Las lombrices de tierra producen estructuras características de su acción que en conjunto constituyen un dominio funcional llamado drilosfera. Estas estructuras serán encontradas en suelos de la cuenca media

del río Luján.

- Un uso del suelo más intensivo afecta negativamente la actividad de la comunidad de lombrices de tierra.
- A mayor actividad de la comunidad de lombrices, será mayor el número de estructuras características observadas en el suelo.
- El análisis fractal ofrece herramientas útiles en la descripción cuantitativa de las estructuras asociadas a la drilosfera.
- Suelos con diferente grado de perturbación (intensidad de uso) presentarán diferencias en sus dimensiones fractales y en la estructura de las comunidades de lombrices.
- Suelos con diferente tipo de uso presentarán diferencias en sus dimensiones fractales y en la estructura de las comunidades de lombrices.
- Las variables físicas no presentarán diferencias en un análisis temporal mientras que las comunidades de lombrices presentarán una dinámica estacional.
- Las lombrices producen cambios en la distribución de tamaños de poros, en el volumen de los mismos, en la conectividad de los macroporos.
- Las lombrices modifican el patrón espacial del sistema poroso del suelo, aumentando la dimensión fractal.

Capítulo 2

Materiales y Métodos

2.1 Sitios de estudio

El presente trabajo se realizó en Luján, Provincia de Buenos Aires, Argentina. El clima de la región es templado húmedo, presentando una precipitación anual media de 1000 mm y una temperatura media anual de 17 °C. Fitogeográficamente se ubica en la región Neotropical, dominio Chaqueño, distrito Oriental de la provincia Pampeana [15] y por lo tanto la vegetación dominante es la estepa o pseudoestepa de gramíneas. Los sitios de estudio se encuentran ubicados en la cuenca media del río Luján. La misma se encuentra en la subregión geomorfológica de la Pampa Ondulada, subzona I según Scoppa y Vargas Gil [99], entre las características sobresalientes de esta subzona se encuentra la presencia de lomas de escasa pendiente que alternan con líneas de vaguada. La carta de suelos de la provincia de Buenos Aires, describe la unidad cartográfica a la que pertenece el sitio de estudio como un suelo formado por una asociación de tres series: Mercedes 13, Portela y Gowland con

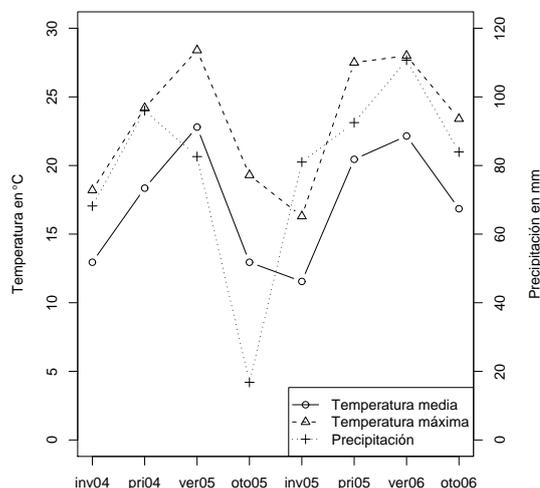
una composición de Argiudol típico (60 %), Natracualf (10 %) y Argialbol (30 %). Los suelos representativos pertenecen al subgrupo Argiudoles típicos, caracterizados por ser oscuros, profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados. El horizonte superficial es oscuro, de textura franco limosa, estructura en bloques subangulares a granular, se continua con horizontes transicionales que descansan sobre un horizonte argílico de textura franco arcillosa, estructura prismática con abundantes barnices de arcilla iluvial.

Uno de los sitios donde se realizaron los estudios de campo, es el campo experimental de la Universidad Nacional de Luján, que se encuentra ubicado en el Km 65 de la ruta nacional 5, y cuyas coordenadas geográficas son (34° 35' 50" de latitud Sur y 59° 04' 00" de longitud Oeste) (ver figura 2.2) El sitio tiene una superficie en explotación de 164,8 hectáreas, siendo su actividad productiva principal la cría de ganado vacuno para producción lechera (*Bos taurus*, raza Holando Argentino). De acuerdo al mapa básico de suelos [100], el sitio presenta un relieve de lomas planas que alternan con líneas de vaguada. El predio se asienta sobre Argiudoles típicos, que se organizan en el paisaje formando complejos de suelos. Estos complejos están integrados por distintas fases caracterizadas por el grado de erosión hídrica, problemas de drenaje o por pendiente modificadas a partir de un concepto central. El mapa básico de suelos presenta dos series de suelos. La serie 1 se ubica en las zonas más altas del campo, presentando un escurrimiento divergente dando lugar a suelos bien drenados. Esta zona corresponde al sitio donde se asienta el tambo y una pequeña porción de los lotes 1 y 2. El resto del campo presenta distintos complejos de la serie 2 y sus fases (ver figura 2.3). Esta serie ocupa posiciones positivas, lomas planas extendidas

donde se asocia con microdepressiones que poseen síntomas de hidromorfismo y medias lomas altas. Ha sido clasificada como Argiudol típico, y su secuencia de horizontes es: $A_p1-A_p2-A1-B_t1-B_t2-BC1-BC2$. El horizonte superficial es de textura franco limosa, estructura en bloques subangulares finos, débiles a moderados, blando en seco, muy friable en húmedo; plástico y ligeramente adhesivo, presenta raíces muy abundantes, el porcentaje de MO es de 3,65 y el pH al agua de 5,59. Presenta rasgos de hidromorfismo en la interfase entre los horizontes A y B. Los suelos analizados en este trabajo pertenecen a los complejos 2, 3 y 4. El complejo 2 (CO2) se ubica en lomas planas amplias y es una asociación de la serie 2 en un 80 % con el mismo suelo en fase pobremente drenado en un 20 %. El Complejo 3 (CO3) se ubica en posiciones intermedias entre las lomas planas, como las que definen el CO2, y las líneas de vaguada en áreas con una pendiente entre 1 y 3 %. Está compuesto por el suelo Argiudol típico descrito precedentemente, en un 50 %, en una fase por pendiente, que no presenta síntomas de erosión. El 50 % restante se compone de fases que presentan erosión hídrica ligera y moderada. El complejo 4 (CO4) se encuentra al pie del complejo anterior, en el pie de loma, rodeando áreas de vaguada, siendo una asociación de fases de la serie 2: fase engrosada (50 %), fase engrosada e imperfecta a pobremente drenada (35 %) y fase moderadamente erosionada (15 %).

Como sitios de referencia se tomaron, por un lado, un campo localizado a unos 10 Km hacia el Oeste del anterior en la localidad de Cortines ($34^{\circ} 33' 15''$ de latitud Sur y $59^{\circ} 11' 27''$ de longitud Oeste), seleccionado considerando que fue un pastizal natural durante los últimos 30 años. Y por otro lado, el sitio de Reserva de la Universidad Nacional de Luján, que es un lote de la

Figura 2.1: Datos meteorológicos para el mes de muestreo.



misma donde no se realizaron prácticas agropecuarias en los últimos 30 años. En el Cuadro 2.1 se presentan datos analíticos de los suelos pertenecientes a los sitios de estudio.

En la figura 2.1 se muestran los datos meteorológicos de temperatura y precipitación para el período de muestreo correspondiente al capítulo 4, presentando para cada temporada el dato correspondiente al mes en que fue realizado el relevamiento. La temperatura media se calculó como el promedio entre la máxima y mínima registrada en ese mes.

2.2 Análisis químicos y físicos del suelo

Se realizaron análisis químicos y físicos complementarios en las muestras de suelo. El análisis de materia orgánica se realizó por el método de pérdida

Figura 2.2: Ubicación geográfica.



Sitio	Espesor de horizonte A (cm)	Estructura	Carbono orgánico (%)	Nitrógeno Total (%)	Textura		
					Arcilla	Limo	Arena
UNLu	32	Bloques subangulares finos	1,0	0,170	26,6	59,2	14,2
Referencia	24	Granular	1,9	0,198	27,4	60,0	12,6

Cuadro 2.1: Características morfológicas, químicas y físicas del horizonte superficial de los sitios de estudio.

Sitio	Año																
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
12	PP	PP	PP	PP	PP	Av/Mz	Av/Mz	PP	PP	PP	PP	PP	PP	PP	PP	PP	PP
3	Mz	Mz	PP	PP	PP	Mz	Mz	Rg	PP	PP	PP	PP	PP	PP	PP	PP	PP
23	Mz	Mz	Sg	Moha	Rg	PP	PP	Mz	Rg/Sg	PP	PP	PP	PP	PP	PP	PP	PP
2	Mz	Rg	Av	Mz	Av	PP	PP	Moha	Av/Mz	Av/Mz	PP	PP	PP	Mz	Av/Mz	Rg	Rg
EC						Ec	Ec	Ec	Ec	Ec	Ec	Ec	Ec	Ec	Ec	Ec	Ec
R																	

Cuadro 2.2: Historia de uso de los sitios seleccionados en la Universidad Nacional de Luján. Abreviaturas y nombres científicos: PP, Pasturas permanentes, Rg: *Lolium multiflorum*, Av: *Avena sativa*, Mijo: *Panicum sp.*, Mz: *Zea mays*, Sg: *Sorghum bicolor*, Moha: *Setaria italica*, Ec: *Eucalyptus camaldulensis*.

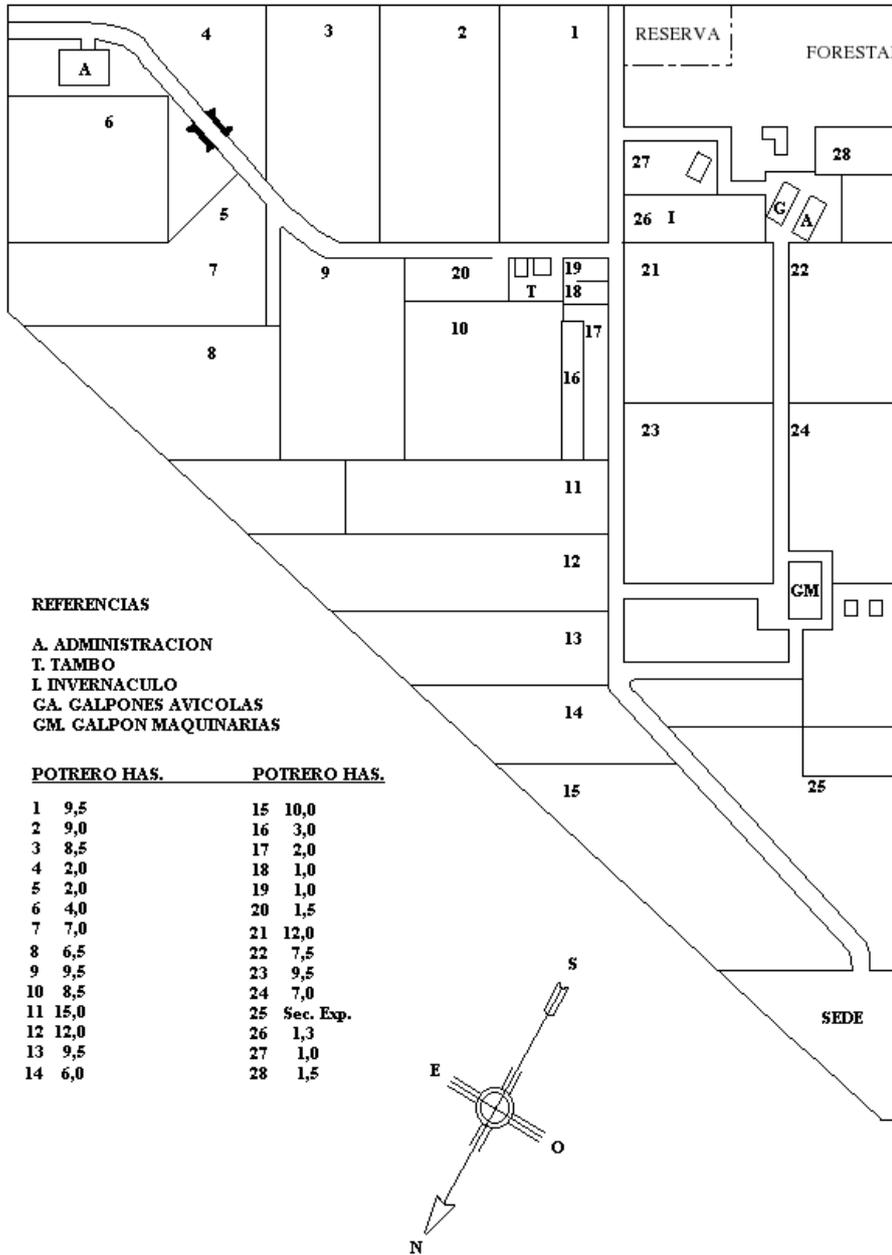


Figura 2.3: Plano del campo de la Universidad Nacional de Luján.

de peso por ignición [58]. La muestra se pasa por un tamiz de 2 mm y se toma una alícuota de 10 g en una cápsula de porcelana o de aluminio que se seca en estufa a 105 °C para obtener el peso inicial. Se coloca en mufla a 430 °C. Luego de una hora el contenido de materia orgánica en porcentaje se calcula haciendo $\%MO = (\text{Peso}_{105\text{ °C}} - \text{Peso}_{430\text{ °C}}) \cdot 100/\text{Peso}_{105\text{ °C}}$. El pH de cada muestra se mide en una dilución suelo:agua de 1:2,5. Para estimar la densidad aparente se toman muestras en cilindros metálicos de 73 mm de diámetro y 80 mm de altura.

2.3 Técnicas de análisis de la estructura fractal del suelo

La estructura del suelo se estudió mediante el análisis de imágenes de cortes del mismo [30]. En cada punto de muestreo, se extrajeron bloques de suelo sin disturbar en cajas de Kubiena. Para ello se cava para descubrir una cara vertical del primer horizonte y se presiona la caja sobre ella con ayuda de una pala, ubicando la caja evitando los primeros 5 cm para separar la influencia de las raíces. Las cajas utilizadas están construidas en chapa galvanizada de 0,55 mm de espesor. Consisten en un marco de 10 cm x 5 cm x 5 cm, con un lado superpuesto y abierto para permitir el desmolde y dos tapas de 5 cm x 10 cm (figura 2.4). En el laboratorio las muestras se transfieren al molde de impregnación que consiste en una bandeja de aluminio moldeada con un taco de madera de 10 cm x 5 cm de base y 7,5 cm de alto. Luego se secan al aire y se llevan a estufa a 40 °C durante 48 hs antes de la impregnación.



Figura 2.4: Cajas de Kubiena utilizadas para la obtención de muestras de suelo sin disturbar.

2.3.1 Preparación de bloques pulidos y secciones delgadas

Para la impregnación deben seguirse las instrucciones cuidadosamente y el aparato debe estar en excelente condición de trabajo y absolutamente limpio. Las muestras a impregnar se colocan en un desecador de vacío, se vuelca una cantidad de resina para cubrir las muestras hasta la mitad. Se hace vacío para permitir que la resina acceda a los poros por capilaridad. Las muestras quedan al vacío tres horas. Luego se quita la tapa, se completa cada muestra con resina, se hace vacío nuevamente. Transcurridas tres horas las muestras se cubren completamente, y se dejan al vacío uno o dos días. La mezcla utilizada para la impregnación es la siguiente: Resina poliéster de colada, 53.4 %, Monómero de estireno, 45 %, Catalizador (Metil Etil Cetona) 0,5 %, colorante fluorescente (Amarillo Oracet 8GF, Ciba Geigy ®) 0,1 % y pasta pigmentada blanca 1 %. El objetivo de este procedimiento es lograr un fraguado lento, que permita el acceso de la mezcla en todos los poros y la formación correcta del polímero evitando cambios de volumen o rajaduras. La muestra está en condiciones de cortarse luego de dos o tres semanas de curado.

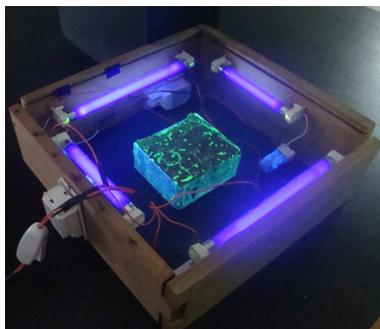


Figura 2.5: Dispositivo para iluminar las muestras con luz ultravioleta, para la toma de fotos. Se observa el contraste obtenido entre poros y suelo.

2.3.2 Corte y pulido de bloques de suelo impregnados

El corte de los bloques de suelo se realiza con sierra circular, utilizando un disco de corte diamantado. Luego los bloques se pulen con lijas de grano progresivamente menor, comenzando con grano 80. Posteriormente cada bloque se pule manualmente con lija al agua, utilizando grano 100, 120, 150 y 220. El proceso de lijado se controla con lupa para verificar que desaparezcan marcas de las lijas más gruesas.

2.3.3 Digitalización y Procesamiento de Imágenes

Cuando se considera terminado el pulido, se procede a la fotografía de las caras pulidas de los bloques. Para ello la muestra se ilumina con luz ultravioleta, evitando el efecto de otras luces del ambiente (ver figura 2.5). La imagen se toma con cámara digital y se transfiere al equipo de computación.

La imagen es procesada con el programa ImageJ [91]. El procesamiento de la imagen obtenida consiste en primer lugar en transformarla en escala de grises, lo que se realizó mediante la función *8-bit*. Para realizar los análisis morfológicos y de dimensión fractal sobre las imágenes se requiere que

estas estén en forma binaria, en blanco y negro. Para ello se seleccionó un umbral de segmentación del histograma de niveles de gris de cada imagen mediante la función *threshold*. Las imágenes obtenidas se compararon con las originales en escala de grises para controlar la separación de las estructuras de interés y en algunos casos se realizó una corrección mínima del nivel de gris automáticamente seleccionado [43]. Sobre estas imágenes se analizaron el espacio de poros, el espacio sólido y la pared de los poros. Esta última se obtiene aplicando la función *Outline* a una imagen que muestre en negro el espacio de poros.

2.3.4 Cálculo de la dimensión fractal

El cálculo de la dimensión fractal se realizó por el método de *Box-counting* en ImageJ mediante el programa FracLac [57], que funciona como complemento (*plug-in* en inglés). El método de cálculo de la D se aplica a imágenes binarias (blanco y negro), en las que aparece en negro la estructura de interés: la parte sólida del suelo o los poros, para su respectiva dimensión fractal de masa (D_m), o la pared de los poros para el cálculo de su dimensión fractal de superficie (D_s). La D_m toma valores entre 1 y 2 para objetos contenidos en un espacio euclídeo de dos dimensiones ($E = 2$), y entre 2 y 3 para objetos de tres dimensiones ($E = 3$). La dimensión fractal de superficie (D_s) indica la rugosidad o la tortuosidad de una línea o un plano [4]. La D_s toma valores entre 1 y 2 para líneas o curvas cuya dimensión euclídea E es igual a 2, como es el caso de imágenes tomadas de secciones de suelo.

El método de *Box-counting* consiste en superponer a la imagen grillas con

diferente tamaño de malla ε , y contar el número de cajas $N(\varepsilon)$ que contienen pixels del objeto de interés. En el caso de que la figura considerada sea fractal, el número de casillas contadas en cada paso se relaciona con el tamaño de malla ε utilizado según una función potencial de la forma 2.1 [83]:

$$N(\varepsilon) = \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^D \quad (2.1)$$

donde D es la dimensión fractal de *Box-counting*, Tomando el logaritmo a ambos lados de la ecuación 2.1 tenemos

$$\log(N(\varepsilon)) = D \cdot \log\left(\frac{1}{\varepsilon}\right) \quad (2.2)$$

considerando el siguiente cambio de variables: $y = \log(N(\varepsilon))$ y $x = \log(1/\varepsilon)$, la ecuación (2.2) toma la forma de una ecuación lineal en la que D es la pendiente de la recta. Finalmente, la pendiente de la línea de regresión entre $\log(N(\varepsilon))$ y $\log(1/\varepsilon)$ será la dimensión de *Box-counting*. Los tamaños de malla seleccionados se variaron entre 2 pixels y el 45% del tamaño de la imagen. La posición de la grilla se cambió aleatoriamente cuatro veces y se caracterizaron las imágenes por el promedio de 4 mediciones de la dimensión fractal.

Cuando la D se calcula sobre el espacio sólido se denomina dimensión fractal de masa del espacio sólido (D_{ms}), sobre los poros, dimensión fractal de masa de los poros (D_{mp}) y sobre el contorno de los poros, se denomina dimensión fractal de superficie (D_s).

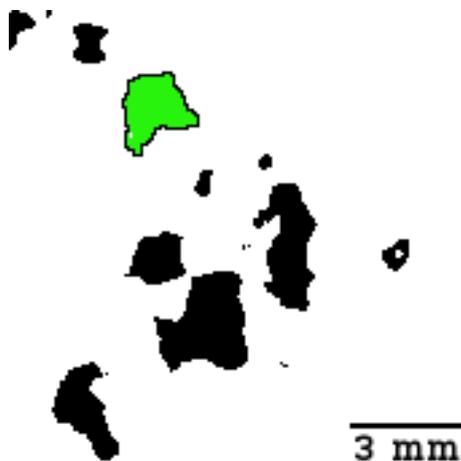


Figura 2.6: Medición de área, perímetro y factor de forma. Poro seleccionado: Área: 2,21 mm², Perímetro: 6,78 mm, F: 0,60.

2.3.5 Análisis de formas y tamaño de poros

Sobre las imágenes en blanco y negro se contabilizaron la totalidad de los poros. Se midió en los mismos el área y el perímetro, y se calculó un factor de forma según la ecuación (2.3). Para cada muestra se realiza el histograma de frecuencias de tamaño de poros. Los poros se clasifican de acuerdo al factor de forma en: Redondeados $F > 0,5$; Irregulares $0,5 > F > 0,2$ y Elongados $F < 0,2$.

$$F = \frac{4 \cdot \pi \cdot \text{área}}{\text{perímetro}^2} \quad (2.3)$$

2.4 Técnicas de análisis de la comunidad de lombrices de tierra

2.4.1 Muestreo e identificación de especies

En esta sección se presenta el conjunto de técnicas utilizadas en el presente trabajo para el análisis de las comunidades de lombrices. Este análisis comienza con el muestreo y conservación de ejemplares obtenidos y el registro de los valores de biomasa y número de ejemplares encontrados, continúa con la determinación de las especies presentes y luego con el análisis de la diversidad de especies.

La evaluación de la comunidad de lombrices se realiza mediante la exploración manual de unidades de muestreo de 25 cm por 25 cm por 20 cm [10, 98, 109]. Las lombrices se recolectaron en recipientes de vidrio para la posterior determinación de biomasa y la identificación de las especies. Los individuos se contaron vivos en el laboratorio. Para la obtención de la biomasa, se limpiaron y se pesaron en balanza electrónica. Para conservar las lombrices se las sumerge inicialmente en una mezcla de partes iguales de alcohol 96° y formol 10%. Luego se las extiende sobre una mesa para que se fijen en forma de bastón. Esto facilita la observación de los distintos caracteres taxonómicos, permitiendo girar el animal bajo la lupa. Para la determinación taxonómica de las especies se conservaron en formol 10% y glicerina [98]. Las muestras que no se pesaron inmediatamente luego de extraídas se conservaron a 4 °C en heladera.

Los ejemplares de cada lote se clasificaron en adultos, subadultos y juve-

niles, según el siguiente criterio: adultos, los que presentaron clitelo; subadultos, tamaño similar y clitelo incipiente; juveniles, sin clitelo y tamaño menor. Para la determinación de las especies se utilizan las claves taxonómicas de Righi [93] y Reynolds [92]. En cada sitio las lombrices encontradas se clasifican en las categorías ecológicas propuestas por Bouché [12]: anécicas, epígeas y endógeas. En cada sitio de muestreo se tomaron entre 5 y 15 muestras en forma sistemática sobre una transecta o sobre una grilla [21, 30, 107]. Los resultados de biomasa y número se promediaron entre todas las muestras obtenidas para cada sitio, mientras que los resultados de composición específica se analizaron por sitio, sumando los datos obtenidos en cada muestra.

2.4.2 Análisis de la estructura de la comunidad

La estructura de la comunidad de lombrices se estudió analizando los cambios en la riqueza y diversidad de especies. Las comparaciones de estos parámetros entre sitios presentan dificultades metodológicas, relacionadas con que normalmente se obtienen muestras de diferente tamaño (número de ejemplares analizados). En cuanto a la riqueza, o número de especies, Hurlbert [51] y Magurran [63] proponen el cálculo del número esperado de especies por rarefacción (ecuación 2.4), que estima el número de especies para el caso de que todas las muestras obtenidas fueran del mismo tamaño. Su expresión matemática es la siguiente:

$$E(S) = \sum_{i=1}^S \left\{ 1 - \left[\frac{\binom{N-N_i}{n}}{\binom{N}{n}} \right] \right\} \quad (2.4)$$

donde $E(S)$ es el número esperado de especies en una muestra de n individuos seleccionados al azar (sin reemplazo), tomados de una colección de N individuos y S especies.

Se calculó la diversidad específica de cada lote mediante los índices de Shannon–Wiener (H), el índice de Simpson ($SimpsonD$), según Southwood y Henderson [101], y el de Margalef (k) según Margalef [67].

El índice de Shannon (ecuación 2.5) fue propuesto originariamente dentro de la teoría de la información y nos da una idea de la complejidad de la comunidad combinando los datos de riqueza con la abundancia relativa de las especies. Su formulación matemática es

$$H' = \sum_i^S p_i \cdot \log_2 p_i \quad (2.5)$$

donde S es la riqueza, y p_i es el cociente n_i/N_T , la abundancia relativa de la especie i -ésima [101].

Para analizar las diferencias entre los sitios relevados, se calculó el intervalo de confianza del 95 % para el índice de Shannon por el método de jackknife y se consideró que aquellos sitios cuyo intervalo de confianza no se superpone, son diferentes estadísticamente [63].

Se calculó la equitatividad ($H'/H_{máx}$) y la redundancia (R) de especies para complementar las medidas de diversidad (ecuación 2.6):

$$R = 1 - V, \quad V = \frac{H' - H_{mín}}{H_{máx} - H_{mín}} \quad (2.6)$$

en esta ecuación, H' es el valor observado del índice de Shannon, $H_{máx}$ se

calculó como $\log_2(S)$ y H_{min} es el valor de H' si una especie es representada por $N - (S - 1)$ individuos y las restantes por un individuo cada una [51].

El índice de Simpson se calculó con la ecuación 2.7,

$$\text{Simpson} = 1 - \sum_i^S p_i^2 \quad (2.7)$$

donde p_i tiene la misma forma de cálculo que en el índice de Shannon (ecuación 2.5). Este índice describe la probabilidad de que un segundo individuo tomado de una población sea de una especie distinta que el primero [101]. En la bibliografía de la temática este índice se simboliza con la letra D , que aquí es utilizada para representar la dimensión fractal, por ello se utiliza el nombre completo para no introducir nuevas denominaciones.

El índice de Margalef se calculó mediante la ecuación 2.8:

$$k = \frac{S}{\log N} \quad (2.8)$$

En la sección A.5.2 se presenta el código fuente en R para la implementación de las funciones para el cálculo de los índices de diversidad.

2.4.3 Funciones de distribución de abundancias relativas

La estructura de la comunidad puede también analizarse utilizando funciones de distribución de abundancias relativas [101]. Los modelos que representan la abundancia relativa en función del rango proveen información sobre la distribución de recursos entre las especies. Para estas curvas de rango *vs*

abundancia se han propuesto variados modelos. Tokeshi [103] propone diferentes modelos para la descripción de comunidades con pocas especies, que están estrechamente relacionadas en cuanto a sus requerimientos de recursos (gremios). Entre ellos, el modelo de Serie Geométrica propuesto por Motomura (SG) y el de Bastón Roto de MacArthur (BR) constituyen modelos contrastantes, representando condiciones extremas en cuanto a la forma en que un recurso puede ser distribuido entre especies competidoras [34, 103]. El ajuste relativo de estos modelos a las distribuciones observadas puede utilizarse para distinguir comunidades a lo largo de un gradiente de perturbación y distinguir si la comunidad tiene una estructura simple con elevada dominancia (SG) o compleja y balanceada (BR) [34]. En efecto, el modelo de SG (ecuación 2.9) es típico de comunidades con marcada dominancia en la que los recursos se asignan jerárquicamente entre las especies, mientras que el modelo BR (ecuación 2.10) ajusta mejor a comunidades más equitativas, cuyos recursos se distribuyen al azar [34, 69, 103]. Para realizar este análisis se calcula el logaritmo de la abundancia observada y se evalúa el ajuste de la misma a las abundancias predichas por los modelos probados en función del rango. Los valores de abundancia relativa para la i -ésima especie en los modelos de Serie Geométrica y Bastón Roto se expresan como:

Modelo de Serie Geométrica

$$N_i = N_T \cdot k \cdot (1 - k)^{i-1} \quad (2.9)$$

Modelo de Bastón Roto

$$N_i = \frac{N_T}{S} \cdot \sum_{i=1}^S \frac{1}{S} \quad (2.10)$$

donde i es el rango de la especie, N_i el número de individuos para el rango i , N_T el número total de individuos, S la riqueza observada de especies, y k el coeficiente de dominancia. Este último varía entre 0 y 1 y representa la proporción de recursos utilizados por cada especie. El ajuste relativo a estos modelos puede evaluarse mediante el Criterio de Información de Akaike, (AIC, por su sigla en inglés) [34]. El ajuste a estos modelos y la evaluación de la bondad de ajuste mediante el AIC se realizó mediante el paquete ‘vegan’ del programa estadístico R [76].

2.5 Análisis multivariado de las diferencias entre sitios

Se realizó un análisis MRPP (Multi-response permutation procedure), que permite estudiar las diferencias entre grupos de unidades de muestreo, evaluando en nuestro caso a partir de la composición de la comunidad de lombrices, las diferencias entre grupos. Este test calcula en primer lugar la matriz de distancias entre cada punto de muestreo, para lo cual en este caso se usó la medida euclídea de esta distancia. Luego realiza un promedio de las distancias dentro de cada grupo y posteriormente el promedio ponderado de las distancias entre grupos. Este último valor se denomina δ , y se compara con el que resulta de permutar las unidades de muestreo un número de veces, en este caso se realizaron 999 permutaciones. El estadístico $A = 1 - \frac{\delta_{obs}}{\delta_{esp}}$, mide el grado de concordancia entre los grupos; un valor de $A = 1$ se obtiene cuando todos los ítem son iguales entre sí dentro de los grupos, mientras que

un valor de $A = 0$ indica que la heterogeneidad entre los grupos iguala a la esperada por azar. El valor de probabilidad p se calcula como la proporción de permutaciones en que $\delta_{esp} < \delta_{obs}$ [70, 76].

Para la descripción de las diferencias encontradas entre los grupos se aplicó el análisis de especies indicadoras, que permite obtener el valor indicativo de cada especie individual para la diferenciación de los grupos. La significación estadística del análisis de especies indicadoras se estimó por el método de Monte Carlo, reasignando al azar las unidades de muestreo a los grupos 1000 veces, la probabilidad de un error de tipo I se calculó como la proporción de veces que el valor indicador para el conjunto aleatorio fue mayor o igual que el valor calculado para el conjunto original. La implementación en R [90] se presenta en la sección A.5.3. Una referencia más completa de estos métodos se encuentra en McCune y Grace [70].

2.6 Análisis estadístico

Los resultados según tipo de uso, intensidad, especie de lombriz de tierra, obtenidos en relevamientos de campo y experimentos se trataron mediante análisis de varianza. Las relaciones entre cada indicador y parámetro, se analizaron mediante la prueba de asociación de Pearson con $p < 0,05$. En los casos en que los resultados no cumplieron con requisitos de normalidad, evaluada con el test de Shapiro, se analizaron mediante la prueba de Kruskal-Wallis. Se realizaron tests de comparaciones múltiples no paramétricos por el método de Nemenyi [108]. Las diferencias entre histogramas de frecuencias se analizaron por un test de χ^2 detallado en el Apéndice (sección A.6). En

todos los análisis se utilizó el entorno estadístico R [90]. La implementación en R de algunos de los análisis realizados se presenta en la sección A.5 en Apéndices.

Capítulo 3

Comunidad de lombrices y estructura del suelo I

El laboreo y la compactación degradan la estructura del suelo, cambiando la distribución de tamaño de poros debido a la destrucción de los macro y mesoporos y a la homogeneización de los tamaños de agregados y los espacios vacíos que quedan entre ellos [46]. El espacio poroso pierde así continuidad y se dificulta el movimiento del agua y el aire. Se requiere caracterizar esa degradación de la estructura mediante la utilización de indicadores que permitan valorar los cambios que se producen en la geometría del espacio poroso. El suelo es un sistema geoméricamente complejo que puede ser concebido como un objeto fractal [4]. Esto quiere decir que conserva un patrón similar de forma a través de varias escalas de tamaño, lo que se conoce como autosemejanza. Como fue presentado en la Introducción a este trabajo (sección 1.4), el patrón de autosemejanza puede ser caracterizado mediante una dimensión fractal que se relaciona con la estructura de agregados y poros del suelo [4].

Los parámetros fractales pueden ser relacionados con los cambios inducidos por el laboreo del suelo [45]. Por ejemplo, una homogeneización del tamaño de partículas producirá, inevitablemente, un descenso en el valor numérico de la dimensión fractal [48]. En la Argentina se han realizado algunos trabajos enfocados en el análisis de la estructura fractal del suelo por medio del estudio de la distribución de tamaños de agregados, encontrando una clara relación entre este parámetro y el uso del suelo [35].

El objetivo del presente capítulo es caracterizar, a través de sus dimensiones fractales, el estado de deterioro de horizontes superficiales de suelos sometidos a diferentes intensidades de un mismo uso y evaluar a lo largo de un gradiente propuesto de perturbación, la actividad de la comunidad de lombrices de tierra. La hipótesis de trabajo es que una mayor intensidad de uso, con mayor deterioro físico, afectará negativamente la actividad de la comunidad de lombrices de tierra, y estará asociado a menores valores de las dimensiones fractales del suelo.

3.1 Materiales y Métodos

Las muestras se obtuvieron en los sitios descritos previamente, el campo experimental de la Universidad Nacional de Luján (UNLu) y un sitio de referencia (Nat) ubicado a 10 Km en la localidad de Cortines.

La principal actividad en el sitio UNLu es agrícola - ganadera; se seleccionaron tres lotes con distinta historia de uso en un período que comprende los 12 años anteriores al muestreo, con pasturas sembradas en 1997 (P3, lote 12), 1998 (P2, lote 3) y en 1999 (P1, lote 23) (Ver cuadro 2.2). El sitio Nat

Lote	Rotación	Grado de Agresión Física
Nat	30 años sin cultivo	Bajo
P3	Ca 1 - PP 5 - Ca 2 - PP 3	Medio
P2	Ca 3 - PP 4 - Ca 2 - PP 2	Medio
P1	Ca 6 - PP 2 - Ca 2 - PP 1	Alto

Cuadro 3.1: Secuencia de cultivos y escala de agresión física propuesta.

no ha sido sometido al uso agrícola o ganadero durante los últimos 30 años. En el Cuadro 3.1 se presenta la rotación de cultivos y la escala de agresión física de los lotes. El gradiente de perturbación fue establecido considerando el tiempo (desde el momento del muestreo hacia atrás) con permanencia de pasturas y el número de cultivos anuales en la historia de uso. Un sitio con más tiempo de uso en pasturas y menos cultivos anuales en la historia de uso fue considerado menos perturbado. Con esta definición, la escala de perturbación fue $P1 > P2 > P3$. El sitio Nat fue considerado el menos perturbado, esto es el sitio de referencia. La preparación del suelo en estos sitios se realizó mediante laboreo convencional con arado de reja y vertedera y rastra de discos de doble acción. La composición de las pasturas fue la siguiente: P3: *Medicago sativa*, *Trifolium pratense*, *Dactylis glomerata* y *Bromus catharticus*; P2: *M. sativa*, *T. pratense*, *Trifolium repens*, *D. glomerata*, *B. catharticus* y *Lolium perenne*; P3: *T. pratense*, *T. repens*, *Lotus corniculatus*, *D. glomerata*, *B. catharticus* y *Lolium multiflorum*. Todos los sitios recibieron el pastoreo de ganado vacuno para la producción de leche, con la excepción de P1, que fue cosechado mecánicamente. En el sitio de referencia se encontraron las especies *B. catharticus*, *Festuca arundinacea*, *L. perenne*, *L. multiflorum*, *T. repens*, *T. pratense*, *Taraxacum officinale* y *Rumex crispus*.

En cada lote se marcó una grilla de una hectárea de superficie, con puntos

equidistantes 25 m. Para la caracterización de la comunidad de lombrices se tomaron muestras en 15 puntos de la grilla seleccionados al azar. La técnica de muestreo ya se describió en la sección 2.4. Se estimó biomasa, número, estructura de edades, se clasificaron los ejemplares por especie, y se agruparon en categorías ecológicas. Se calcularon índices de diversidad y se analizaron las curvas de abundancias relativas, evaluando el ajuste a los modelos de serie geométrica (SG) y bastón roto (BR).

Se seleccionaron cinco puntos al azar para tomar bloques de suelo sin disturbar [86]. Se determinó la densidad aparente por el método del cilindro en 8 muestras de suelo seleccionadas al azar también sobre la misma grilla. Las muestras de suelo tomadas para el análisis fractal fueron impregnadas con resina poliéster bajo vacío según la descripción realizada previamente (sección 2.3.1). Se realizó un corte de 10 mm de espesor: en todos los casos se tomaron cortes perpendiculares a la superficie del suelo, suponiendo una estructura isotrópica del mismo. Una vez finalizado el pulido de las muestras se obtuvieron las imágenes mediante fotografías tomadas con una cámara digital. Como única fuente de iluminación se utilizó una lámpara de luz ultravioleta que al producir fluorescencia en la matriz resinosa, permitió obtener un gran contraste. Se obtuvo una resolución del píxel de 70 μm . Se calcularon las dimensiones fractales de masa (D_m) y de superficie (D_s) por el método de *Box-counting* (ver 2.3.4)[4].

Los resultados fueron evaluados mediante el test de Kruskal-Wallis ($P < 0,05$). Se evaluaron las diferencias entre los sitios mediante el test de comparaciones múltiples no paramétrico de Nemenyi, con un nivel de significación de 0,05 [108] (la implementación de este análisis en R puede verse en A.5.1.

3.2 Resultados

3.2.1 Descripción de la comunidad de lombrices

En lo que hace a la estructura de la comunidad de lombrices, se exponen a continuación los resultados obtenidos sobre biomasa *in vivo*, número total de individuos, estructura de edades y abundancias relativas de las especies presentes en cada lote estudiado.

3.2.2 Biomasa

En el cuadro 3.2 y en la figura 3.1 se observan los resultados obtenidos respecto de la biomasa de lombrices. Esta varió entre 17,8 y 72,14 g/m², correspondiendo la mayor al lote P3, la pastura menos perturbada, y cuyos valores fueron significativamente diferentes de los obtenidos en P2 y P1. Le sigue el lote Nat con un valor de 51,10 g/m², que fue estadísticamente diferente sólo del sitio P1. Los menores valores de biomasa se encontraron en los lotes P2 y P1 con valores de 27,87 y 17,84 g/m² respectivamente.

3.2.3 Abundancia

El número de lombrices por m² varió entre 302,9 y 702,9 siendo el mayor el sitio P3 nuevamente y mostrando también la mayor variabilidad. Sus valores difieren estadísticamente de los valores del sitio P2. El lote Nat sigue en abundancia con un promedio de 536,53 ind/m². En orden decreciente de abundancia siguen los lotes P1 y P2 con 426,67 y 302,93 ind/m² respectivamente.

Muestra	Nat	P3	P2	P1
1	30,18	73,54	60,75	8,35
2	44,46	62,32	76,50	23,39
3	49,79	154,78	55,68	7,82
4	132,19	12,91	47,84	9,86
5	41,20	157,89	20,19	6,51
6	8,75	112,34	0,00	11,57
7	41,68	65,04	7,68	88,08
8	65,87	48,06	1,52	5,02
9	33,62	12,85	35,68	14,51
10	74,72	31,10	8,00	10,16
11	43,17	91,57	22,37	6,54
12	20,16	31,60	2,72	25,79
13	69,04	11,30	35,74	23,44
14	54,26	107,74	24,32	6,48
15	57,46	109,04	19,02	20,06
Promedio	51,10bc	72,14c	27,87ab	17,84a
Desvío estándar	28,68	48,98	23,64	20,66
Error estándar	7,40	12,64	6,10	5,33

Cuadro 3.2: Biomasa de lombrices en g/m².

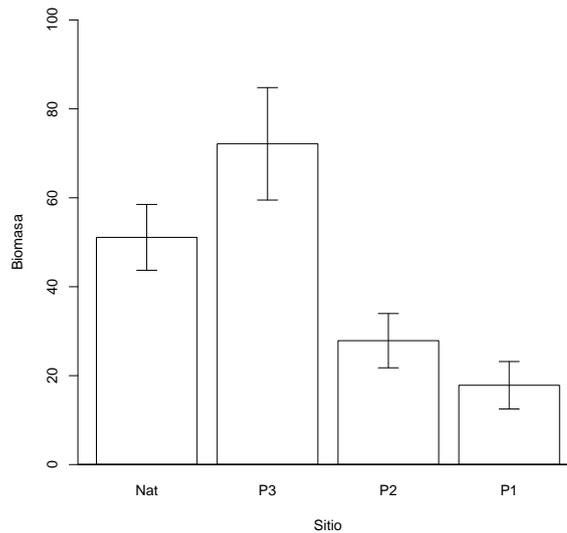


Figura 3.1: Biomasa de lombrices en g/m².

Muestra	Nat	P3	P2	P1
1	240	1472	640	352
2	224	512	384	1136
3	336	1104	176	384
4	896	192	576	560
5	352	960	400	240
6	144	672	0	208
7	832	896	288	736
8	704	1376	48	176
9	448	320	496	272
10	480	320	96	144
11	288	384	336	400
12	432	960	112	288
13	1072	208	256	560
14	640	912	400	336
15	960	256	336	608
Promedio	536,53ab	702,93b	302,93a	426,67ab
Desvío estándar	295,08	427,34	190,42	260,79
Error estándar	76,19	110,34	49,16	67,33

Cuadro 3.3: Abundancia de lombrices (ind/m²).

En el cuadro 3.3 y en el gráfico 3.2 se presentan los resultados obtenidos en cuanto a la abundancia de lombrices.

3.2.4 Estructura de edades

La cantidad de adultos, subadultos y juveniles que se encontraron en promedio en cada lote se muestra en el cuadro 3.4. La mayor relación de juveniles por adulto se encontró en el lote Nat, con un valor de 3,1 y la menor en el lote P3, con un valor de 0,4. Estos resultados indicarían una mayor tasa reproductiva promedio en el lote Nat.

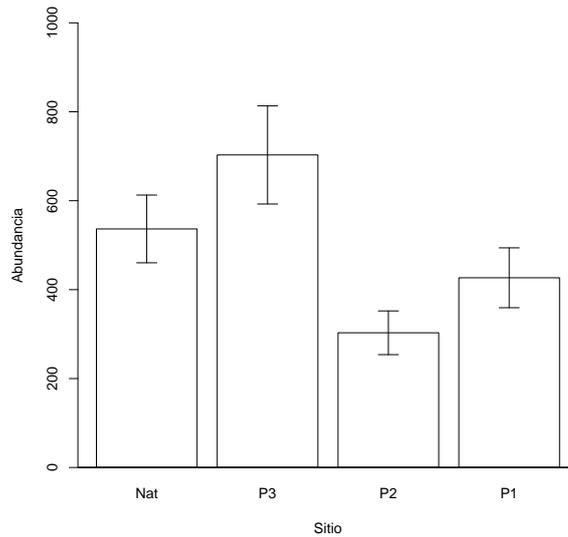


Figura 3.2: Abundancia de lombrices (ind/m²).

	P1	P2	P3	Nat
Adultos	4,27	5,73	15,53	5,93
Subadultos	8,33	2,13	1,53	1,33
Juveniles	8,67	7,80	6,73	18,27
Juveniles por Adulto	2,0	1,4	0,4	3,1

Cuadro 3.4: Número promedio de adultos, subadultos y juveniles encontrados en cada lote bajo estudio. Se presenta la proporción de juveniles por adulto.

3.2.5 Diversidad de especies

En el cuadro 3.5 se resumen los resultados referidos a las especies presentes de lombrices en cada sitio estudiado. Se encontraron 11 especies en todo el estudio.

Con respecto al origen y categoría ecológica de las especies encontradas, aquellas que pertenecen al género *Microscolex* son nativas y epígea-endógeas. El resto de las especies encontradas son provenientes de Europa o América del Norte y tienen hábitos endógeos. La especie nativa *Microscolex dubius* es dominante en los sitios P1 y P3, y codominante en P2 con *Microscolex phosphoreus*, también una especie nativa. La mayor riqueza (9 especies) se encontró en el sistema natural, en el que se mostró dominante *Aporrectodea caliginosa*. La menor riqueza se registró en el sistema pastoril con un año de implantación con 3 especies. Los sitios P2 y P3 presentaron una riqueza intermedia de 7 especies de lombrices. Para el sistema pastoril en su conjunto es dominante *Microscolex*.

El número de especies esperado por rarefacción ($E(S)$) fue estimado utilizando el número de individuos registrado en el sitio P1 y tuvo la misma tendencia que el índice de Shannon. Ambas medidas fueron menores en el sitio P1. Valores intermedios se encontraron en P2 y P3 y el mayor en Nat (Cuadro 3.6).

Se puede observar que las especies halladas en el lote P1 se presentaron también en todos los demás. La abundancia relativa de las especies de cada lote estudiado se observa en los gráficos 3.3 a 3.6. En el gráfico correspondiente al lote P1 (ver gráfico 3.6) se observa la clara dominancia de la especie

Capítulo 3. Comunidad de lombrices y estructura del suelo I

Especies	Familia	Nat	P3	P2	P1	Categoría ecológica
<i>Aporrectodea caliginosa</i>	<i>Lumbricidae</i>	X**	X	X	X	Endógea polihúmica
<i>Aporrectodea rosea</i>	<i>Lumbricidae</i>		X			Endógea polihúmica
<i>Aporrectodea trapezoides</i>	<i>Lumbricidae</i>	X	X	X		Endógea polihúmica
<i>Octolasion cyaneum</i>	<i>Lumbricidae</i>	X	X	X		Endógea mesohúmica
<i>Octolasion tyrtaeum</i>	<i>Lumbricidae</i>	X				Endógea mesohúmica
<i>Bimastos parvus</i>	<i>Lumbricidae</i>	X	X			Endógea meso oligohúmica
<i>Dendrodriilus rubidus</i>	<i>Lumbricidae</i>	X		X		Endógea polihúmica
<i>Microscolex dubius</i>	<i>Acanthodrilidae</i>	X	X**	X**	X**	Epígea endógea mesohúmica
<i>Microscolex phosphoreus</i>	<i>Acanthodrilidae</i>	X	X	X**	X	Epígea endógea mesohúmica
<i>Dichogaster sp.</i>	<i>Octochaetidae</i>	X				Endógea polihúmica
<i>Eukerria saltensis</i>	<i>Ocnerodrilidae</i>			X		Endógea oligohúmica

Cuadro 3.5: Especies presentes en cada lote. Se presenta la categoría ecológica de cada una, la familia y se marcan las especies dominantes.

M. phosphoreus, con un 85 % de individuos sobre el total. En el gráfico 3.5 se observa que en el sitio P2 la dominancia está compartida entre dos especies: *M. dubius* y *M. phosphoreus*, con un 50 y un 41 % del total de individuos respectivamente. Las 5 especies restantes se presentan con una abundancia relativa muy baja, entre el 1,5 y el 3 %. Es interesante observar la presencia de una especie higrófila, *Eukerria saltensis*, que podría estar asociada a la existencia de anegamiento temporario. En el caso del lote P3 (ver gráfico 3.4) se observa la dominancia de *M. phosphoreus* con una abundancia relativa del 65 %; a continuación se ubica *A. caliginosa* con una abundancia relativa del 20 %; el resto de las especies se ubican entre un 10 y un 0,4 %.

En el sistema natural se observa la dominancia de la especie *A. caliginosa*, con una abundancia relativa del 51 %; las restantes 8 especies presentan valores de abundancia relativa entre 1 y 11 % (ver gráfico 3.3).

Se analizó la diversidad de especies de lombrices de cada lote, calculando el índice de Shannon (ecuación 2.5), el índice de Simpson (ecuación 2.7) y el índice de Margalef (ecuación 2.8); los datos se muestran en la tabla 3.6. Estos resultados muestran que la mayor diversidad se encuentra en el lote

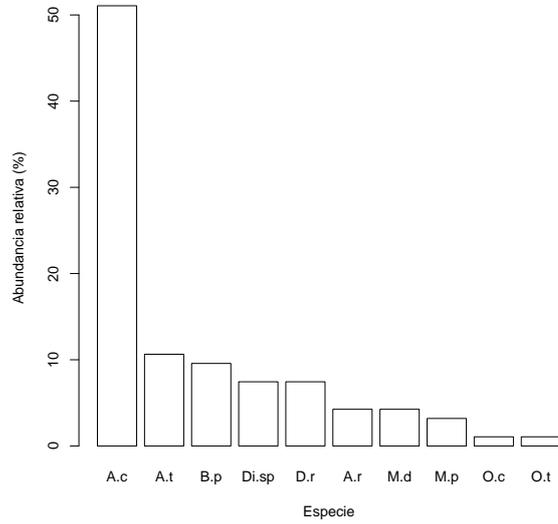


Figura 3.3: Abundancia relativa de las especies en el sitio Nat.

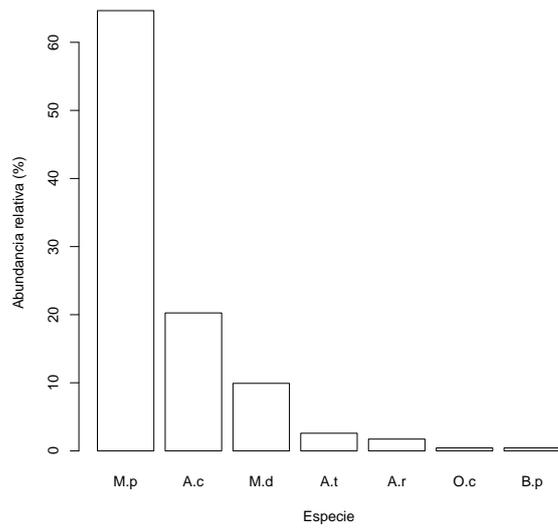


Figura 3.4: Abundancia relativa de las especies en el sitio P3.

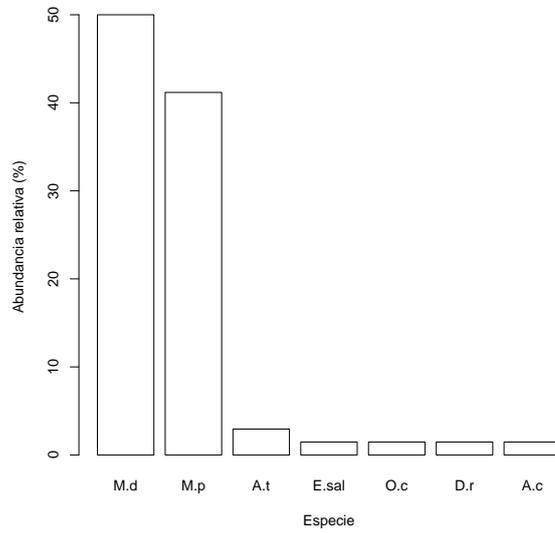


Figura 3.5: Abundancia relativa de las especies en el sitio P2.

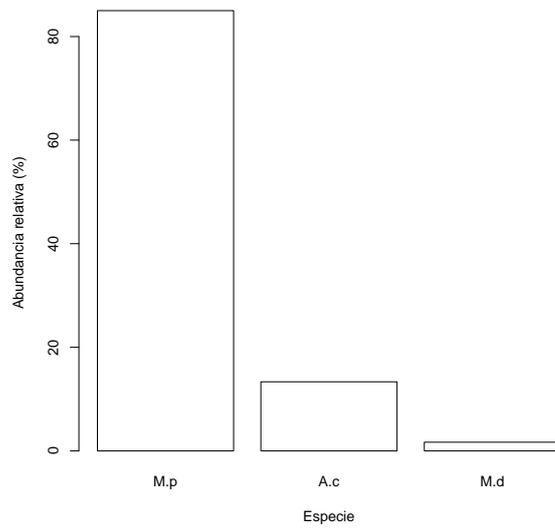


Figura 3.6: Abundancia relativa de las especies en el sitio P1.

Indice	P1	P2	P3	Nat
Riqueza observada	3	7	7	9
H' estimación jackknife	0,69 ± 0,25a	1,70 ± 0,34b	1,70 ± 0,23b	2,60 ± 0,37c
<i>Simpson</i>	1,35	2,37	2,13	3,10
Margalef (k)	0,49	1,42	1,10	1,78
$E(S)$ Rarefacción	3	6,52 ± 0,64	5,05 ± 0,85	8,29 ± 0,69
Equitatividad	0,43	0,55	0,54	0,71
Redundancia (R)	0,78	0,74	0,67	0,60

Cuadro 3.6: Diversidad de especies. Índices de Shannon (H'), Simpson y Margalef (k), riqueza observada, riqueza estimada mediante rarefacción ($E(S)$) y el estimador jackknife del índice de Shannon con intervalos de confianza. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

Nat ($H' = 2,60$; *Simpson* = 3,10 y $k = 1,78$) y la menor en el sitio P1 ($H' = 0,69$; *Simpson* = 1,35 y $k = 0,49$) y que los sitios agrícola-ganaderos P3 y P2 se mostraron intermedios.

3.2.6 Distribución de abundancias relativas en relación con el uso del suelo

El análisis de los modelos de abundancia de especies en función del rango mostró un mejor ajuste al modelo de serie geométrica en todos los sitios, resultado que se deduce del menor AIC obtenido (Cuadro 3.7). Sin embargo, se observan diferencias en el coeficiente k del modelo de serie geométrica (ecuación 2.9), que representa la proporción de recursos utilizados por cada especie, y puede interpretarse como indicador de dominancia. Las figuras 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, muestran la abundancia observada y el modelo SG ajustado a los datos.

Sitio	Serie geométrica		Bastón roto
	k	AIC	AIC
P1	0,849	13,75*	29,83
P2	0,570	38,90*	58,04
P3	0,650	29,79*	107,28
Nat	0,355	55.22*	56,29

Cuadro 3.7: Valores de AIC para la bondad de ajuste de los modelos de serie geométrica y bastón roto a las curvas de rango - abundancia en todos los sitios analizados. Para el modelo de SG se muestran los valores de k . Los menores valores del AIC (*) indican mejor ajuste al modelo.

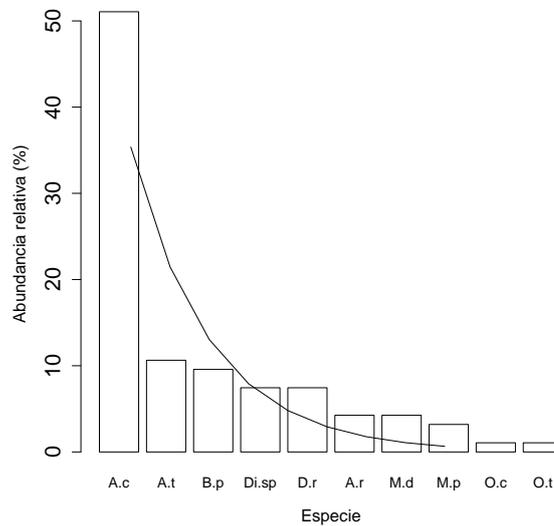


Figura 3.7: Abundancia relativa en el sitio Nat, y su ajuste al modelo de serie geométrica.

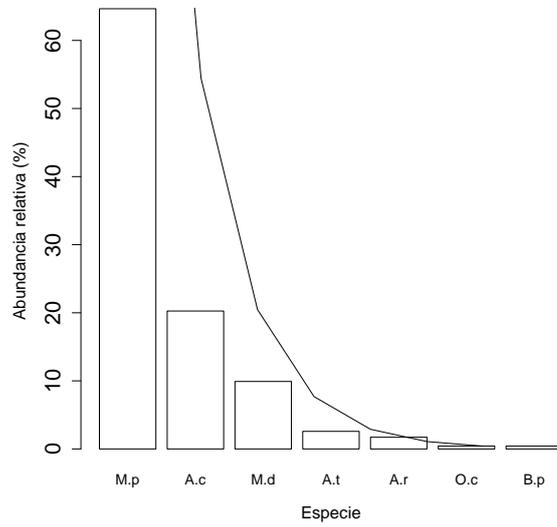


Figura 3.8: Abundancia relativa en el sitio P3, y su ajuste al modelo de serie geométrica.

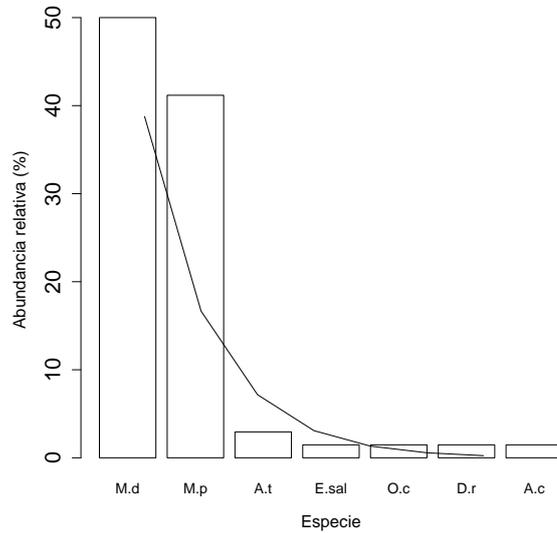


Figura 3.9: Abundancia relativa en el sitio P2, y su ajuste al modelo de serie geométrica.

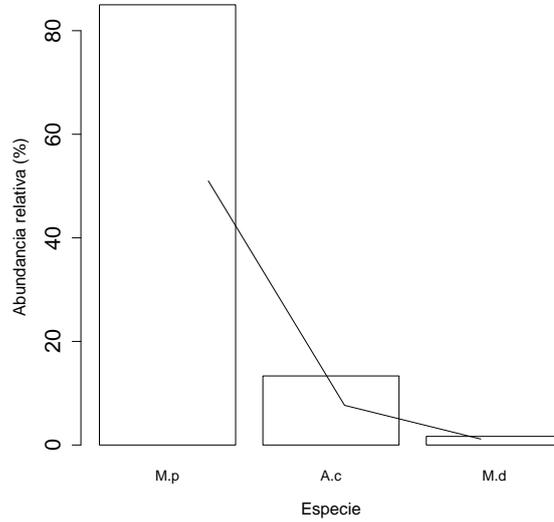


Figura 3.10: Abundancia relativa en el sitio P1, y su ajuste al modelo de serie geométrica.

3.2.7 Análisis fractal de la estructura del suelo

Tanto el espacio sólido como el de poros del suelo puede ser considerado fractal en todos los sitios analizados (3.8). El test de Kruskal-Wallis se mostró significativo en las dimensiones fractales analizadas (D_{ms} : $p < 0,03$; D_{mp} : $p < 0,03$; D_s : $p < 0,03$). La dimensión fractal de masa del espacio sólido fue mayor a 1,8 en todos los sitios (rango: 1,82-1,86). La dimensión fractal de masa del sistema de poros (D_{mp}) varió entre 1,32 y 1,70. Las dimensiones fractales de masa del suelo (D_{ms}) y del espacio poroso (D_{mp}) y la dimensión fractal de superficie (D_s) mostraron un mayor valor en el sitio natural de referencia (Cuadro 3.8). Esto guarda relación con una mayor irregularidad en las formas geométricas del suelo asociadas a la estructura [64]. En el suelo testigo habría una distribución más heterogénea de las formas o tamaños de los agregados o los poros en el suelo y una mayor tortuosidad de las líneas

	P1	P2	P3	Nat
D_{ms}	$1,85 \pm 0,01ab$	$1,83 \pm 0,01b$	$1,84 \pm 0,01ab$	$1,86 \pm 0,01a$
D_{mp}	$1,43 \pm 0,05b$	$1,54 \pm 0,01ab$	$1,62 \pm 0,02a$	$1,63 \pm 0,03a$
D_s	$1,42 \pm 0,05b$	$1,52 \pm 0,05ab$	$1,61 \pm 0,02a$	$1,61 \pm 0,03a$
δ_{ap}	$1,29 \text{ Mg/m}^3$	SD	$1,36 \text{ Mg/m}^3$	$1,11 \text{ Mg/m}^3$

Cuadro 3.8: Resultados obtenidos para D_{ms} , D_{mp} , D_s y δ_{ap} . Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$). Para cada medida se presentan valores medios seguidos de su respectivo error estándar.

de contacto poro - agregado.

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas para D_{ms} sólo entre los sitios Nat y P2 (Cuadro 3.8). Otros autores hallaron resultados diferentes para la D_{ms} , reportando una relación directa entre la D_{ms} y la compactación [77]. Nuestros resultados muestran un efecto distinto del uso del suelo sobre el sistema de poros y sobre la parte sólida del suelo. El valor de D_{ms} no podría ser utilizado para diferenciar suelos con distintos niveles de compactación dado que si bien se observó un claro aumento de la densidad aparente en los lotes agrícola - ganaderos, la D_{ms} no mostró el mismo comportamiento. Los resultados hallados para D_{mp} mostraron también un mayor valor para el sistema natural (Nat), diferenciándose significativamente del lote P1. La D_{mp} aumentó a medida que la densidad aparente del suelo fue menor, mostrando la clara relación de este parámetro con la compactación, y por lo tanto con la agresión física al suelo. Los valores promedio de densidad aparente (δ_{ap}) fueron más bajos en el lote Nat ($1,11 \text{ Mg/m}^3$) y altos en los lotes P3 y P1, $1,36 \text{ Mg/m}^3$ y $1,29 \text{ Mg/m}^3$ respectivamente.

La dimensión fractal es una medida del grado de ocupación que un objeto geométrico hace del espacio [40]. Para un objeto inserto en un plano, como las fotografías de secciones de suelo, la dimensión fractal varía entre 1 y 2,

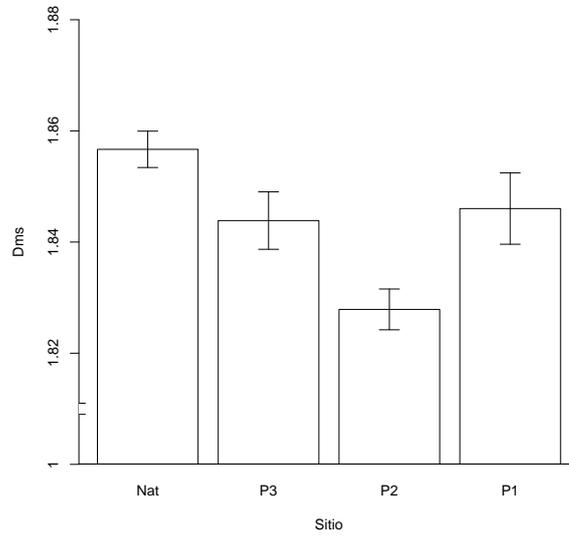


Figura 3.11: Dimensión fractal de masa del suelo D_{ms} en cada sitio estudiado.

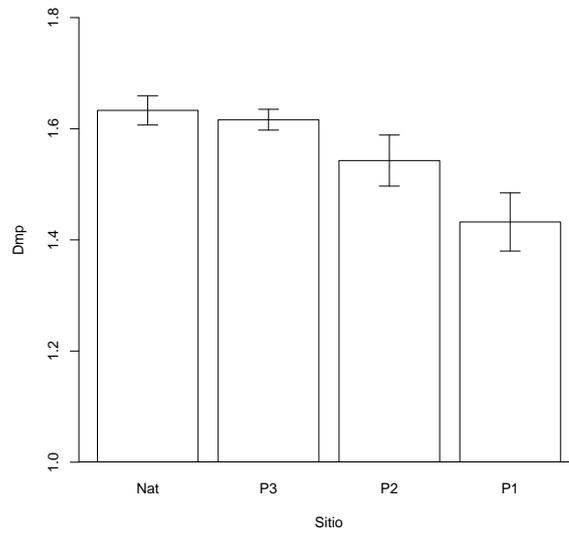


Figura 3.12: Dimensión fractal de masa del espacio de poros D_{mp} en cada sitio estudiado.

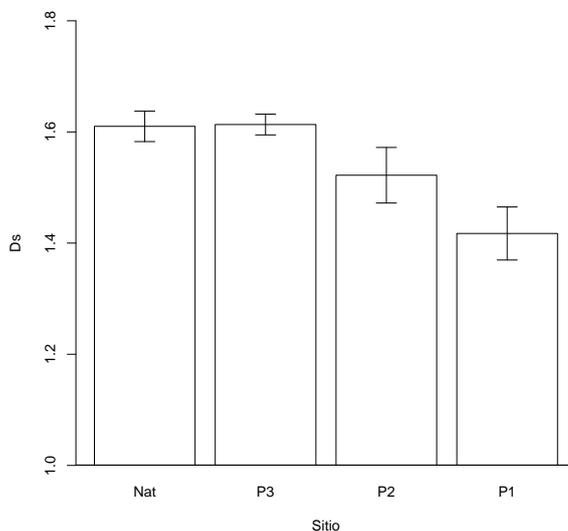


Figura 3.13: Dimensión fractal de superficie de los poros D_s en cada sitio estudiado.

la dimensión topológica de una línea y un plano respectivamente. Para los suelos Argiudoles típicos analizados en este estudio tanto el espacio sólido como el de poros mostraron una estructura fractal. Los resultados obtenidos para D_{ms} y D_{mp} se encuentran dentro del rango de valores encontrados por otros autores [4], incluso para suelos franco limosos como los del presente trabajo [45]. La D_{mp} muestra un rango más amplio que la D_{ms} , este hecho coincide con observaciones de Giménez y colab. [44]. Los dos parámetros fractales calculados describen propiedades geométricas complementarias del suelo teniendo diferentes respuestas al gradiente de perturbación. La dimensión fractal del espacio de poros es una medida de la heterogeneidad y complejidad del arreglo del espacio poroso, que es el hábitat de las lombrices de tierra [40].

Las prácticas agrícolas destruyen los macroporos y producen compacta-

ción, que incrementa el contacto entre los agregados y por lo tanto reduce la proporción de poros de aire en los suelos. La mayor homogeneidad de los tamaños de poros puede estar relacionada con la perturbación producida por el laboreo mecánico y por la reducción de la actividad biológica. Alternativamente, la mayor D_{mp} puede relacionarse con el agregado de estructuras biológicamente generadas durante varios años. En consecuencia, en suelos con pasturas, la estructura es recuperada por medio de la acción de raíces y macrofauna, los que produciendo galerías y canales interconectados incrementan la proporción de macroporos [25]. Se espera que suelos con estructuras formadas por poros grandes y continuos tendrían mayores valores de D_{mp} que suelos con poros pequeños y aislados [4, 43]

Estos resultados muestran el efecto de la degradación física en el sistema de poros del suelo, tanto en su volumen (δ_{ap}) como en su geometría (D_{mp} y D_s). Diferenciando estos parámetros una situación prístina de situaciones bajo uso agrícola y ganadero. Se observó un efecto significativo sobre el sistema de poros tanto cuando el uso consistió en un predominio de pasturas (P3) como en el lote con predominio de cultivos anuales (P1). Este efecto se produjo por la modificación de la distribución de tamaños y formas de los poros del suelo, evidenciado en una menor D_{mp} y el aumento significativo de la densidad aparente. Este resultado se relaciona con los de Oleschko [77] que encuentra una relación positiva entre la compactación y la D_{mp} . Este parámetro puede ser muy útil en la predicción de parámetros físicos relacionados con el movimiento de fluidos del suelo.

3.3 Discusión y conclusiones

En este capítulo hemos estudiado distintos aspectos de la comunidad de lombrices y hemos realizado un análisis de la dimensión fractal de los componentes sólidos y porosos del suelo en sitios con diferentes grados de perturbación con un mismo uso.

Hemos encontrado los mayores valores de D_{mp} en sitios con la mayor diversidad y riqueza de especies de lombrices, sugiriendo una correlación positiva entre la actividad biológica observada y las medidas fractales del hábitat.

Esto indica que podría existir una asociación entre el grado de perturbación del suelo y la actividad y complejidad del gremio de lombrices de tierra.

Existe una mutua influencia entre la complejidad del sistema de poros (que ofrece hábitats de diferentes estructuras) y la actividad de las lombrices que modifica el sistema poroso cambiando a su vez las condiciones para otros organismos. Los cambios en estas variables fueron observados tanto como variaciones la estructura fractal como en la composición, abundancia y funciones de distribución de abundancias relativas de las comunidades de lombrices.

Las dimensiones fractales del suelo pueden ser usadas como indicadores del grado de perturbación porque representan el resultado de los efectos de disrupción mecánica y la modificación biológica del sistema poroso.

Entre los diferentes organismos del suelo, las lombrices de tierra son reconocidas como uno de los principales factores en la generación de macropo-

rosidad, y son por ello consideradas como ingenieras del ecosistema. Debido a ello, puede considerarse que estos organismos serían un factor importante en el mejoramiento de la porosidad en los sitios analizados y podrían ser responsables por los altos valores de D_{mp} en los suelos menos perturbados.

En general, la biomasa y abundancia de lombrices es afectada negativamente por un incremento en la presión de la agricultura [33, 82]. En sitios con pasturas fertilizadas, las mayor calidad de las mismas como alimento y la mayor disponibilidad de materia orgánica podría llevar a una mayor biomasa y abundancia de lombrices [20]. En el capítulo 3 se encontró que todos los sitios relevados tienen altos valores de biomasa y abundancia (>17 g/m² y 300 ind/m²) (ver 3.2.3).

A pesar de la alta abundancia de lombrices en todos los sitios, la pastura establecida recientemente tuvo una baja riqueza de especies, mostrando además una significativa dominancia de una sola especie (*M. dubius*). La riqueza observada en P2 y P3 podría estar relacionada con una tendencia a incrementar su diversidad, aproximándose a comunidades sin actividades agrícolas como el sitio Nat (Cuadro 3.5).

Bajo las condiciones de este estudio, considerando un gradiente de perturbación asociado a un mismo tipo de uso, se observó que en 2 a 3 años a partir del establecimiento de una pastura, el número de especies de lombrices se recupera visiblemente. La misma tendencia se observa en el índice de Shannon, que exhibe su máximo valor en el sitio Nat. Encontramos un incremento tanto en la riqueza de especies como en la equitatividad (Cuadro 3.6). La presencia de una estructura fractal en el sistema poroso y sólido del suelo, puede correlacionarse con el incremento de la riqueza de especies de

lombrices como se observa hasta el momento en este trabajo, pero no está claro si esto se produce porque las lombrices pueden “ver” un mayor espacio de hábitat o porque este espacio es más complejo. Una relación más directa fue observada previamente entre la naturaleza fractal del hábitat en el suelo y el número de individuos de distinto tamaño [37, 56].

Se necesita una mayor investigación para dilucidar este tema, explorando la relación entre el tamaño corporal y el número de individuos de diferentes especies de lombrices.

El modelo de serie geométrica fue el que mejor ajustó a situaciones analizadas dentro de un gradiente de perturbación, sugiriendo que los recursos están distribuidos jerárquicamente dentro de la comunidad. El valor del coeficiente k en el modelo SG es una medida de dominancia y se comporta en forma similar a la equitatividad. Muestra una tendencia a incrementar en la misma manera que el nivel de perturbación. Estos resultados podrían indicar que una o unas pocas especies serían responsables del patrón fractal observado.

Encontramos que existiría una interacción entre la macrofauna del suelo y la estructura del mismo, en la que ambas se transforman mutuamente. Una vez que la perturbación cesa o su intensidad se reduce, tanto la comunidad de lombrices como la estructura del suelo incrementan su complejidad. Los datos sugieren un vínculo entre D_{mp} , como medida de la complejidad del sistema poroso del suelo, y la diversidad y riqueza de especies de lombrices, de manera que un ambiente edáfico más complejo podría favorecer una más diversa comunidad de lombrices. La presencia de poros más grandes y un sistema poroso más continuo puede ofrecer nichos para más especies de

lombrices. En efecto, hemos encontrado comunidades más equitativas y un cambio en el patrón de dominancia en el modelo SG, a lo largo del gradiente de perturbación que podría estar relacionado con el patrón fractal del espacio poroso.

En el caso de ingenieros del ecosistema como las lombrices, estimamos que comunidades con mayor riqueza de especies pueden ejercer una variedad de efectos en la complejidad del sistema poroso del suelo que configura las condiciones para mantener altos valores de las respectivas dimensiones fractales. La destrucción de la estructura del suelo producida por las prácticas agrícolas puede afectar las funciones del suelo condicionando el desarrollo de la fauna que en él habita.

Capítulo 4

Comunidad de lombrices y estructura del suelo II

En la actualidad el ecosistema pampeano, principal región agrícola de la Argentina, está sometido a un elevado impacto ambiental debido a la intensificación de la agricultura. En relación con este fenómeno, la degradación física del suelo es un problema creciente en la región. En este sentido, siendo el suelo el hábitat de una amplia comunidad de organismos, que producen galerías o que se alojan en el espacio de poros, el deterioro físico que provocan determinados usos del suelo afecta también a la fauna edáfica, modificando su diversidad, biomasa y abundancia. Entre los representantes de la fauna del suelo, las lombrices son uno de los componentes más importantes, debido a su mayor biomasa y al efecto que tienen en la estructura del suelo.

La dimensión fractal es una medida directa de la estructura del suelo, ya que evalúa el arreglo espacial de los poros, y por lo tanto permitiría estudiar los efectos de las lombrices y del uso del suelo en la estructura. En el capítulo

anterior se analizaron los cambios en la estructura del suelo y en las comunidades de lombrices en sitios de pastura que presentaban un gradiente de agresión física. En el presente apartado se pretende por un lado, estudiar los cambios que presentan estas variables en sitios con usos contrastantes como es el caso del uso agrícola, de pastura o forestal y por otro incorporar una variable temporal en el análisis de los cambios que se producen en el sistema bajo estudio.

El objetivo de este capítulo es analizar la dimensión fractal del espacio de poros del suelo así como la composición de la comunidad de lombrices, como reflejo de las perturbaciones ocasionadas por el uso a lo largo de dos años, de manera de profundizar el análisis de las interrelaciones entre el componente físico y biológico. La hipótesis de trabajo es que diferentes usos ofrecen un patrón diferente de recursos y de perturbaciones físicas al sistema edáfico por lo que se observarán respuestas asociadas al uso en la estructura del suelo y en las comunidades de lombrices. Asimismo, en un análisis temporal las variables estructurales (dimensión fractal) no presentarán cambios según sea la temporada de muestreo mientras que el componente biológico presentará una dinámica estacional.

4.1 Materiales y Métodos

El trabajo se realizó en el campo experimental de la Universidad Nacional de Luján, sitio descripto previamente en el capítulo 2. Para el presente trabajo se eligieron seis sitios. Estas situaciones contemplan diferencias en el tipo de uso y diferencias de suelo. El sitio elegido como referencia es una reserva (R),

Sitio	Complejo de suelo	N°
Reserva (R)	Complejo 3	1
Cultivos anuales: Lote 2 (A1)	Complejo 3	2
A2	Complejo 4	3
Pastura Plurianual: Lote 3 (P1)	Complejo 3	4
P2	Complejo 4	5
<i>Eucalyptus</i> (EC)	Complejo 3	6

Cuadro 4.1: Sitios de estudio.

en la que no se realizó intervención agrícola o ganadera en los últimos 20 años. El mismo se encuentra ubicado en el Complejo 3 según el mapa básico de suelos (ver 2.1). Los restantes sitios se eligieron por su diferente historia de uso, presentando uno un uso con cultivos anuales para silo o pastoreo directo (en adelante llamado A, corresponde al lote 2 en el plano del campo de la Universidad Nacional de Luján), el otro una pastura plurianual (P, lote 3) y por último se eligió un cuarto uso, representado por una parcela forestal plantada con la especie *Eucalyptus camaldulensis* (EC) (ver cuadro 2.2). La ubicación de estos sitios puede verse en la figura 2.3.

El sitio A presenta una secuencia de cultivos previa al muestreo de Avena (*Avena sativa*) como verdeo de invierno, con pastoreo directo, y Maíz (*Zea mays*) para silo. El sitio P fue sembrado en 2001 con una composición específica de Alfalfa (*M. sativa*), Trébol Rojo (*T. repens*), Trébol Blanco (*T. pratense*), Cebadilla (*B. catharticus*), Pasto ovillo (*D. glomerata*). El sitio EC fue plantado en 1996 con *E. camaldulensis*, con un marco de plantación de 3 x 3 m. En la reserva (R) no se realizó ninguna intervención agrícola desde el año 1980, entre las especies vegetales presentes en este sitio se encuentran: *Dipsacus fullonum*, *Sorghum halepense*, *Paspalum quadrifarium*, *Ligustrum sinense*, *Bacharis sp.*. Los sitios A2 y P2 presentan un diferente complejo de

suelo y se ubican en una posición diferente del paisaje, con respecto a A1 y P1. Con relación al paisaje, los sitios A1 y P1 se encuentran en posiciones intermedias, mientras que A2 y P2 se encuentran al pie de los anteriores rodeando líneas de vaguada.

Puede considerarse que los distintos usos analizados presentan hacia el ecosistema edáfico diferentes niveles de agresión física. De esta manera se puede definir también un gradiente de perturbación entre los distintos usos que será utilizado para el análisis de las características de las comunidades de lombrices encontradas en cada sitio. Este gradiente guarda relación con la intensidad en el uso de maquinarias de labranza para la preparación del suelo, el uso de agroquímicos, y la implantación de especies exóticas. Por ello, se propone el siguiente gradiente de mayor a menor disturbio: $A > P > EC > R$.

En el cuadro 4.2 se presentan para un análisis preliminar de las características de los suelos, los resultados de análisis químicos y composición textural realizados en muestras compuestas de cada sitio.

El método de muestreo consistió en la toma de 5 muestras sobre una transecta, con puntos equidistantes 25 m, comenzando a 25 m del alambrado. En el caso de la parcela forestal, se descartó la primera línea de árboles y se tomó una transecta de 5 puntos a 4 m cada uno. Se relevó la comunidad de lombrices en forma estacional desde el invierno de 2004 al otoño de 2006. Asimismo se tomaron muestras sin disturbar para la caracterización del sistema de poros en primavera 2004, verano 2005, invierno 2005, primavera 2005, verano 2006 y otoño 2006. En el caso de los sitios A1 y A2 se encontraban laboreados en la temporada de verano por lo que no se tomaron muestras

	P1	P2	A1	A2	R	EC
Arcilla <2 μm	24,8	22,9	23,4	22,7	17,7	21,7
Limo 2-20 μm	25,5	33,2	26,1	29	31,3	28,6
2-50 μm	59,7	65,7	57,5	62,6	65,4	62,8
Arena 50-74 μm	10,2	5,2	12,5	7,3	8	7,4
74-100 μm	3,1	3,9	3,6	4,8	3,7	4,3
100-250 μm	1,5	1,5	2,4	1,9	3,5	2,9
250-500 μm	0,4	0,4	0,3	0,5	1,2	0,6
0,5-1 mm	0,2	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2
1-2 mm	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1
MO %	3,37	3,29	3,48	3,32	3,27	3,63
CO %	1,96	1,91	2,02	1,93	1,9	2,11
P asim	9,7	3,6	11,3	13,7	2,3	4,1
K meq %	1,1	1,1	0,9	1	1,2	1,3
CIC	27,3	24,3	26	23,5	24,1	23,4
Nt %	0,13	0,17	0,15	0,17	0,14	0,14

Cuadro 4.2: Análisis químicos y composición textural en cada sitio de estudio.

estructurales en ese momento.

Con la metodología descrita en la sección 2.4 se determinó la biomasa y abundancia de lombrices. Los ejemplares de cada lote se clasificaron en adultos, subadultos y juveniles teniendo en cuenta la presencia de clitelo y el tamaño del ejemplar. Se realizó la clasificación taxonómica y se calcularon índices de diversidad específica de cada lote. Se realizó el test multivariado MRPP para analizar las diferencias entre lotes y entre temporadas de muestreo (metodología descrita en 2.5), y posteriormente se realizó un análisis de especies indicadoras, que permite discriminar la especie que mayor peso tuvo en la diferenciación de los sitios relevados.

Las muestras de suelo sin disturbar se tomaron en cajas de Kubiena, y se siguió la metodología para la preparación de bloques pulidos y digitalización de imágenes discutida en la sección 2.3.

En cada punto de la transecta y en cada temporada de muestreo se tomó una muestra de suelo para análisis químicos a partir del suelo desmenuzado

en la búsqueda de ejemplares de lombrices. Estas muestras se dejaron secar al aire, completando el proceso de secado en estufa a 30 °C. Se almacenaron en bolsas plásticas para su posterior procesamiento. En las mismas se estimó el contenido de materia orgánica y el pH (ver 2.2). Se tomaron en cada sitio muestras para estimar la densidad aparente.

4.2 Resultados

4.2.1 Análisis físico-químicos

Los datos relevados se agruparon por lote y se promediaron para todo el muestreo. El porcentaje de materia orgánica medido por el método de pérdida de peso por ignición dio como resultado para todo en muestreo valores entre 3,58 y 8,87%. El test de Shapiro mostró que no posee distribución normal ($p < 0,05$) por lo que se realizó el análisis de varianza por el test no-paramétrico de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$). En la figura 4.1 se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los sitios estudiados. El mismo análisis se realizó para el pH y la densidad aparente (Figuras 4.2 y 4.3). El contenido de materia orgánica de cada lote se analizó con el test de comparaciones múltiples no-paramétrico de Nemenyi, con el que se encontró que P1 y EC son mayores que A1. En el caso del pH, las diferencias (expresadas como letras diferentes luego del nombre del sitio) fueron: A1a A2a P1b P2b ECa Rc y en el caso de la δ_{ap} : A1a A2a P1b P2b ECc Ra.

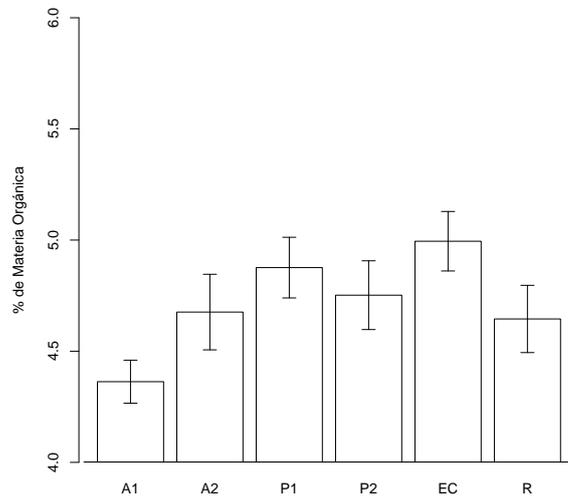


Figura 4.1: Contenido de materia orgánica en porcentaje.

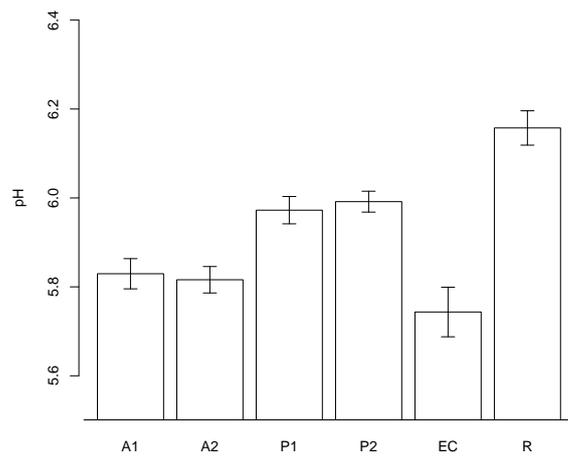


Figura 4.2: pH.

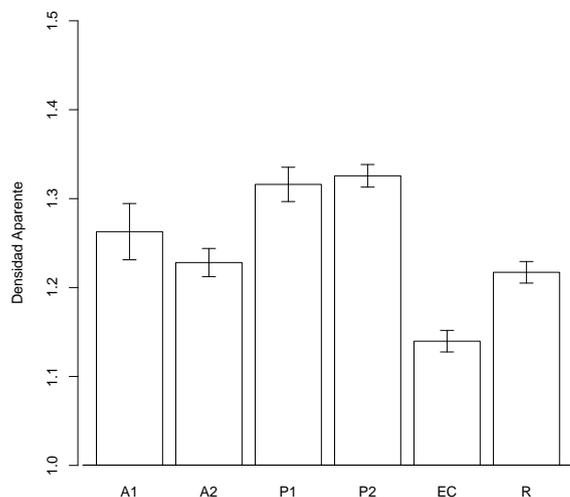


Figura 4.3: Densidad aparente (δ_{ap}) en Mg/m³.

4.2.2 Descripción de la comunidad de lombrices

En cuanto a la biomasa y abundancia se observa un aumento a medida que se reduce la intensidad de agresión física al suelo. La menor biomasa de la reserva se debe a la presencia de *Bimastos parvus*, una especie de bajo peso individual.

4.2.3 Biomasa

La biomasa de lombrices presentó valores, a lo largo de los dos años de muestreo, entre 0 y 59,91 g/m² considerando promedios por sitio y temporada. Se encontraron los menores valores en las temporadas de primavera y verano y los mayores en otoño e invierno. Sumando la biomasa registrada a lo largo de cada año de muestreo se observa que en todos los sitios salvo uno, la biomasa acumulada en otoño-invierno fue mayor al 53 % del total anual (ver figura

Capítulo 4. Comunidad de lombrices y estructura del suelo II

	A1	A2	P1	P2	EC	R
Inv 04	7,10 ± 0,11	6,82 ± 0,28	26,48 ± 0,72	35,97 ± 0,58	26,49 ± 0,30	17,34 ± 0,29
Pri 04	2,13 ± 0,07	9,48 ± 0,19	2,95 ± 0,10	2,81 ± 0,09	12,27 ± 0,27	4,84 ± 0,13
Ver 05	5,12 ± 0,14	4,13 ± 0,17	1,57 ± 0,08	23,77 ± 0,63	15,91 ± 0,38	14,07 ± 0,44
Oto 05	5,03 ± 0,19	4,00 ± 0,19	27,19 ± 0,24	36,57 ± 0,76	39,27 ± 0,76	29,14 ± 0,53
Inv 05	5,10 ± 0,10	4,95 ± 0,20	27,12 ± 0,48	59,91 ± 0,93	38,81 ± 0,60	31,55 ± 0,90
Pri 05	0,00 ± 0,00	0,50 ± 0,03	0,40 ± 0,02	2,30 ± 0,10	1,97 ± 0,07	4,98 ± 0,08
Ver 06	2,10 ± 0,09	0,87 ± 0,04	13,27 ± 0,24	18,31 ± 0,64	13,56 ± 0,31	9,62 ± 0,39
Oto 06	1,13 ± 0,04	0,04 ± 0,00	6,80 ± 0,13	6,91 ± 0,27	9,90 ± 0,08	15,64 ± 0,42
B	3,46a	3,85a	13,22b	23,32b	19,77b	15,90b

Cuadro 4.3: Biomasa de lombrices en $\text{g/m}^2 \pm$ error estándar para cada sitio y temporada evaluados. Letras distintas indican diferencias significativas por el test no paramétrico de Nemenyi.

4.4). Los promedios para los dos años de muestreo se pueden observar en la figura 4.5. Allí se observa que la mayor biomasa promedio para todo el muestreo se encontró en el lote P2, seguido de EC y R, con valores mayores a 15 g/m^2 . Mientras que los sitios con uso agrícola presentaron un promedio menor a 5 g/m^2 . Se encontraron diferencias significativas entre los sitios con uso agrícola (A1 y A2) y los sitios P1, P2, EC y R. La figura 4.4 muestra la evolución de la biomasa de lombrices a lo largo de todo el muestreo. Puede observarse en la misma que la biomasa tiene una marcada dinámica estacional en los sitios con uso de pasturas, forestal o reserva, mientras que los sitios A1 y A2 presentaron bajos niveles de biomasa a lo largo de todo el muestreo. Esta dinámica podría estar asociada por un lado a los ciclos de vida de las especies predominantes y a la disponibilidad de agua en el perfil del suelo. En efecto, la biomasa mostró una correlación negativa ($p < 0,05$) con la precipitación en los sitios EC y R, con la temperatura media en los sitios P1, EC y R y con la temperatura máxima en los sitios P1, P2, EC y R. En la figura 2.1 se muestran los datos meteorológicos para todo el estudio.

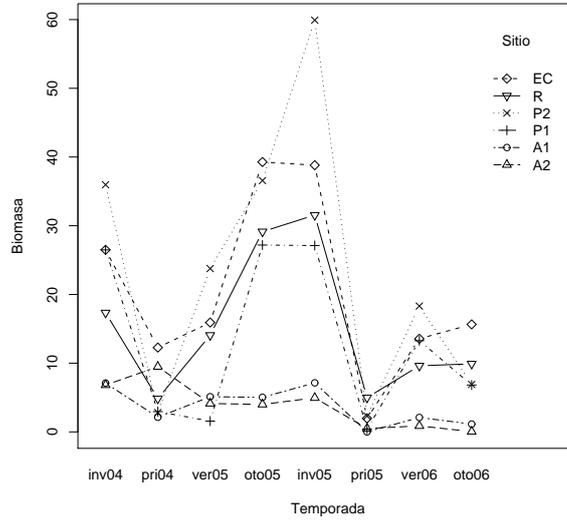


Figura 4.4: Biomasa de lombrices en cada temporada desde el comienzo del muestreo (g/m^2).

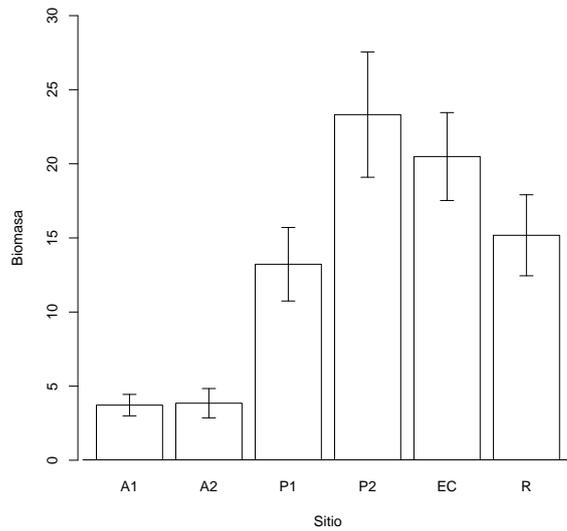


Figura 4.5: Biomasa de lombrices en g/m^2 .

4.2.4 Abundancia

La abundancia de lombrices presentó valores extremos que variaron entre 0 y 563,20 individuos/m² considerando promedios por temporada y por sitio, incrementándose en los sitios cuyo uso reporta una menor intensidad de perturbación. El sitio de la Reserva mostró el mayor valor, con la dominancia numérica de la especie *B. parvus*, caracterizada por un pequeño tamaño corporal. Sumando los ejemplares de lombrices registrados a lo largo de cada año de muestreo se observa que en todos los sitios salvo uno, el número recolectado en otoño-invierno fue mayor al 59 % del total anual (ver figura 4.6). En la figura 4.7 podemos observar los promedios para todo el relevamiento. Allí se observa que el número promedio de lombrices es mayor en el sitio R, con un valor de 240,8 individuos/m² seguido de los sitios P2, EC y P1. Los resultados se analizaron mediante el test de Kruskal Wallis. El test no paramétrico de Nemenyi (ver sección 2.6) se utilizó para las comparaciones múltiples y sus resultados muestran que existen diferencias significativas entre dos grupos, por un lado los sitios A1 y A2, y por otro los sitios P2, EC y R. En la figura 4.6 puede verse la evolución de la abundancia de lombrices a lo largo de todo el muestreo. En este gráfico se observa que así como sucede con la biomasa, la abundancia de lombrices sigue una dinámica estacional en los sitios P1, P2, EC y R mientras que los sitios A1 y A2, con una abundancia mucho menor, la comunidad de lombrices registra una dinámica mucho menos marcada, y no tan definida, lo que guardaría relación con la relativamente baja densidad de lombrices en estos sitios. Así como en el caso de la biomasa, la abundancia de lombrices mostró una correlación negativa ($p < 0,05$) con la precipitación,

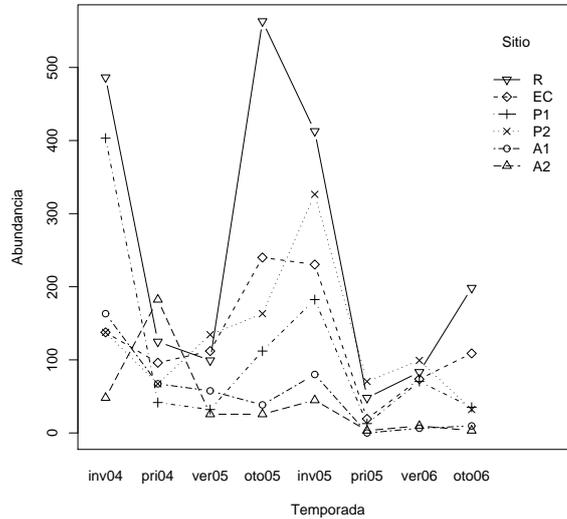


Figura 4.6: Abundancia de lombrices en cada temporada desde el comienzo del muestreo (individuos/m²).

la temperatura media y máxima en los sitios EC y R. En los demás sitios la correlación no fue significativa estadísticamente (ver figuras 4.6 y 2.1).

4.2.5 Diversidad de especies

Se encontraron 10 especies que pertenecen a tres familias: *Acanthodrilidae*, *Lumbricidae* y *Ocnerodrilidae*. Dos de las especies encontradas, *M. dubius* y *M. phosphoreus* (*Acanthodrilidae*) son especies nativas y estuvieron ausentes en el sitio con cultivo anual A1. Las otras son especies europeas introducidas, encontrándose en todos los sitios el género *Aporrectodea* mientras que el género *Bimastos* se encontró en los sitios P1, P2, EC y R. La especie *A. caliginosa* fue dominante en la pastura y en el sitio de cultivo anual; *Aporrectodea trapezoides* fue marcadamente dominante en la parcela de *Eucalyptus* y *B. parvus* en la Reserva, todas son especies de la familia *Lumbricidae* (Tabla

	AI	A2	P1	P2	EC	R
Inv 04	163,20 ± 2,92	48,00 ± 0,95	403,20 ± 4,58	137,60 ± 3,70	137,60 ± 2,18	486,40 ± 7,59
Pri 04	67,20 ± 1,46	182,40 ± 3,23	41,60 ± 1,33	67,20 ± 1,43	96,00 ± 1,34	124,80 ± 3,68
Ver 05	57,60 ± 1,17	25,60 ± 0,75	32,00 ± 0,84	134,40 ± 3,89	112,00 ± 2,88	99,20 ± 3,34
Oto 05	38,40 ± 0,81	25,60 ± 0,68	112,00 ± 1,30	163,20 ± 3,57	240,00 ± 2,41	563,20 ± 12,20
Inv 05	28,80 ± 0,66	44,80 ± 1,20	182,40 ± 1,86	326,40 ± 5,45	230,40 ± 2,56	412,80 ± 5,88
Pri 05	0,00 ± 0,00	3,20 ± 0,20	12,80 ± 0,37	70,40 ± 1,72	19,20 ± 0,37	48,00 ± 0,89
Ver 06	6,40 ± 0,24	9,60 ± 0,40	70,40 ± 1,21	99,20 ± 3,41	73,60 ± 1,94	83,20 ± 2,97
Oto 06	9,60 ± 0,40	3,20 ± 0,20	28,80 ± 0,58	32,00 ± 1,05	198,40 ± 6,05	108,80 ± 2,60
Nt	46,40ab	42,80a	110,40bc	128,80c	138,40c	240,80c

Cuadro 4.4: Abundancia promedio de lombrices ± error estándar para cada sitio y temporada evaluados. Letras distintas indican diferencias significativas por el test no paramétrico de Nemenyi.

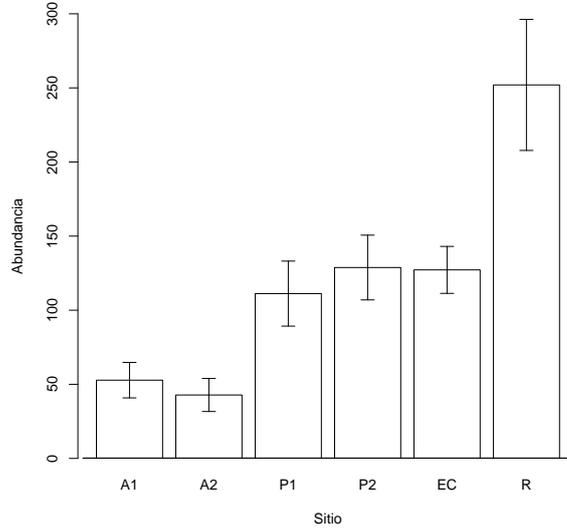


Figura 4.7: Abundancia de lombrices, individuos/m².

4.5).

Las figuras 4.8 a 4.13 presentan el comportamiento de las abundancias relativas respecto del rango para cada uno de los sitios analizados en este capítulo. Gráficamente observamos en ellos el número de especies encontrado, la especie dominante en cada uno y la equitatividad con que se distribuyen los ejemplares entre las especies.

Especie	Familia	A1	A2	P1	P2	EC	R	Categoría ecológica
<i>Aporrectodea rosea</i>	<i>Lumbricidae</i>	x	x	x	x	x	x	Endogea polihúmica
<i>Aporrectodea trapezoides</i>	<i>Lumbricidae</i>	x	x	x	x	x	x	Endogea polihúmica
<i>Aporrectodea caliginosa</i>	<i>Lumbricidae</i>	x	x	x	x	x	x	Endogea polihúmica
<i>Bimastos parvus</i>	<i>Lumbricidae</i>	x	0	x	x	x	x	Endogea meso oligohúmica
<i>Dendrodrilus rubidus</i>	<i>Lumbricidae</i>	0	0	x	0	0	x	Endogea polihúmica
<i>Eukerria sp.</i>	<i>Ocnerodrilidae</i>	0	0	x	0	0	x	Endogea oligohúmica
<i>Microscolex dubius</i>	<i>Acanthodrilidae</i>	0	x	x	x	x	x	Epigea endogea mesohúmica
<i>Microscolex phosphoreus</i>	<i>Acanthodrilidae</i>	0	0	x	0	x	x	Epigea endogea mesohúmica
<i>Octolasion cyaneum</i>	<i>Lumbricidae</i>	0	0	x	x	0	x	Endogea mesohúmica
<i>Octolasion tyrtaeum</i>	<i>Lumbricidae</i>	0	x	0	0	0	0	Endogea mesohúmica
Riqueza		4	5	9	6	6	9	

Cuadro 4.5: Especies presentes en los sitios estudiados.

	A1	A2	P1	P2	EC	R
<i>Aporrectodea rosea</i>	6	10	17	43	25	3
<i>Aporrectodea trapezoides</i>	8	12	29	99	165	35
<i>Aporrectodea caliginosa</i>	7	7	34	29	78	51
<i>Bimastos parvus</i>	1	0	12	2	2	90
<i>Dendrodrilus rubidus</i>	0	0	29	0	0	15
<i>Eukerria sp.</i>	0	0	4	0	0	8
<i>Microscolex dubius</i>	0	2	22	14	2	2
<i>Microscolex phosphoreus</i>	0	0	8	0	1	52
<i>Octolasion cyaneum</i>	0	0	1	10	0	11
<i>Octolasion tyrtaeum</i>	0	1	0	0	0	0
Nt	22	32	156	197	273	267
Riqueza	4	5	9	6	6	9

Cuadro 4.6: Especies presentes en los sitios estudiados (Número de individuos).

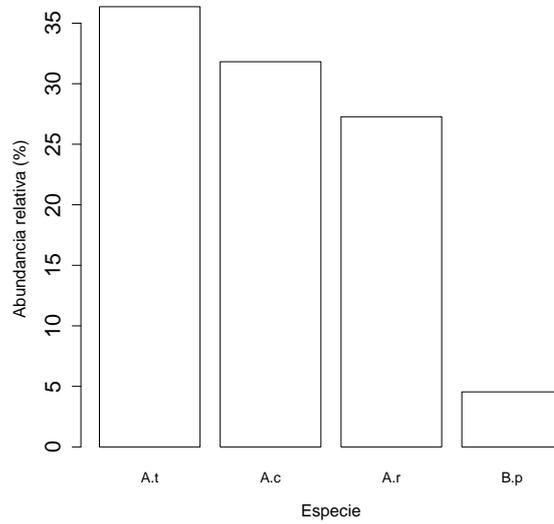


Figura 4.8: Abundancia relativa de las especies de lombrices en el sitio A1.

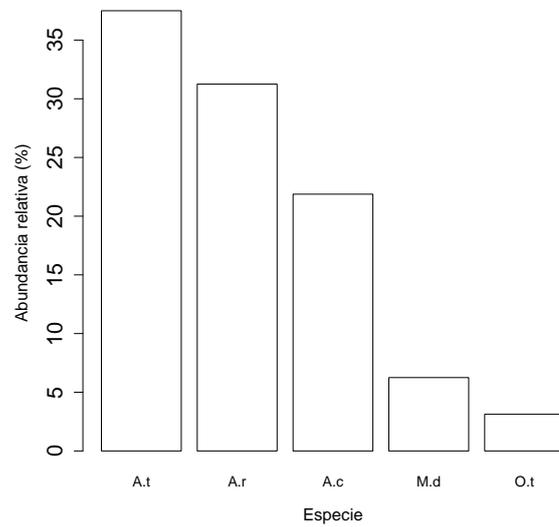


Figura 4.9: Abundancia relativa de las especies de lombrices en el sitio A2.

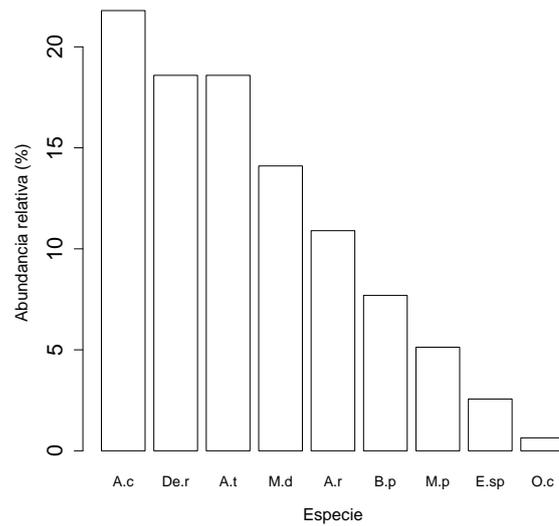


Figura 4.10: Abundancia relativa de las especies de lombrices en el sitio P1.

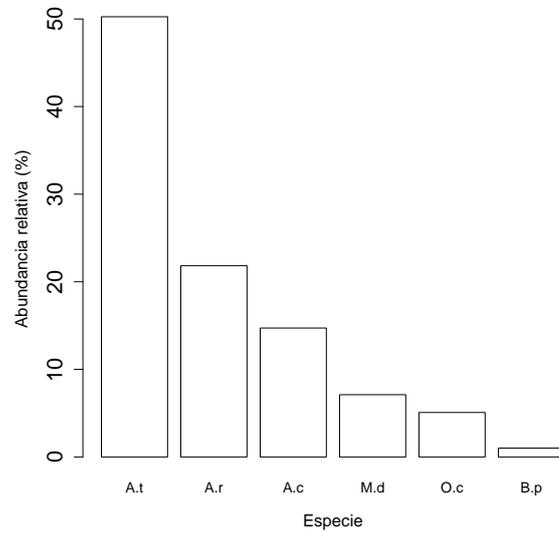


Figura 4.11: Abundancia relativa de las especies de lombrices en el sitio P2.

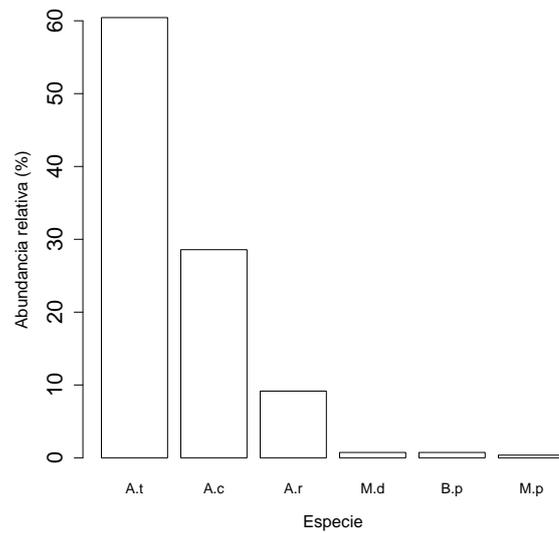


Figura 4.12: Abundancia relativa de las especies de lombrices en el sitio EC.

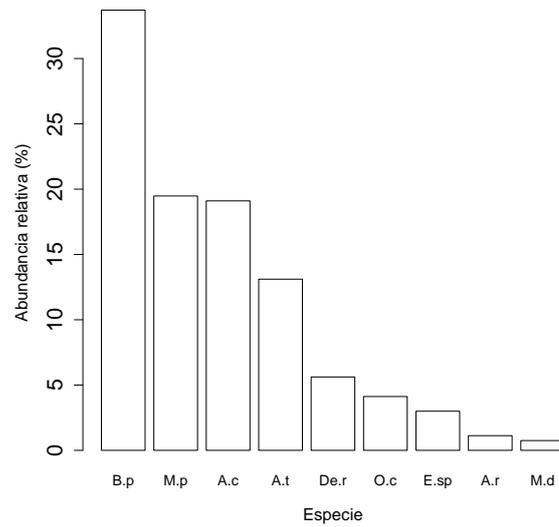


Figura 4.13: Abundancia relativa de las especies de lombrices en el sitio R.

Indice	A1	A2	P1	P2	EC	R
S	4	5	9	6	6	9
H'	1,23	1,34	1,95	1,34	0,97	1,75
H'^*	$2,14 \pm 0,07a$	$2,23 \pm 0,08a$	$3,31 \pm 0,08b$	$2,09 \pm 0,09a$	$1,47 \pm 0,06c$	$2,81 \pm 0,08d$
Simpson	3,23	3,44	6,34	3,03	2,19	4,73
Margalef	0,97	1,15	1,58	0,95	0,89	1,43
$E(S)$	4	$4,60 \pm 0,54$	$7,05 \pm 0,85$	$4,71 \pm 0,72$	$3,28 \pm 0,65$	$6,19 \pm 0,97$
Equitatividad	0,88	0,83	0,89	0,75	0,54	0,80
Redundancia	0,53	0,55	0,42	0,51	0,65	0,48

Cuadro 4.7: Indices de diversidad de especies. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$). S : Riqueza observada H' : Índice de Shannon, H'^* : Estimador jackknife de H' , $E(S)$: Riqueza estimada mediante rarefacción.

En el cuadro 4.7 se presentan los resultados para el análisis de la estructura de la comunidad de lombrices. Los índices de diversidad de Shannon, Simpson y Margalef nos mostraron la misma información en todos los sitios. En cuanto a la diversidad, los mayores valores se encontraron en los sitios P1 y R, tanto en los distintos índices de diversidad calculados como en la riqueza estimada por rarefacción. Si bien en el sitio EC encontramos una comunidad de lombrices muy abundante, con 138,40 ejemplares por m² (ver cuadro 4.4), mostró la menor diversidad debido a la dominancia de la especie *A. trapezoides*, con una abundancia relativa mayor al 60 % (ver figura 4.12) y la menor equitatividad. Los sitios A1 y A2 presentaron la menor riqueza observada con 4 y 5 especies cada una. Para H'^* el uso forestal tuvo la menor diversidad, le siguieron A1, A2 y P2, luego R y P1 tomó el mayor valor.

4.2.6 Distribución de abundancias relativas en relación con el uso del suelo

El análisis de las funciones de distribución mostró un mejor ajuste al modelo de Bastón Roto en los sitios A1, A2 y P1, mientras que los demás ajustaron al modelo de Serie Geométrica. En el cuadro 4.8 se muestran los resultados en cuanto al coeficiente k y los respectivos AIC de cada sitio.

En estos sitios la primer especie dominante tuvo una abundancia relativa de A1: 36,4, A2: 37,5 y P1: 21,8 % respectivamente mostrando gráficamente distribuciones más equitativas (figuras 4.8, 4.9, 4.10). En los demás sitios puede observarse una clara dominancia de una sola especie, con valores de P2: 50,3, EC: 60,4 y R: 33,7 (figuras 4.11, 4.12, 4.13).

Sitio	Serie geométrica		Bastón roto
	k	AIC	AIC
A1	0,39	18,5	16,8*
A2	0,42	21,2	18,8*
P1	0,25	51,2	49,6*
P2	0,47	34,0*	38,6
EC	0,64	38,6*	130,5
R	0,34	52,3*	55,2

Cuadro 4.8: Valores de AIC para la bondad de ajuste de los modelos de serie geométrica y bastón roto a las curvas de rango - abundancia en todos los sitios analizados. Para el modelo de SG se muestran los valores de k . Los menores valores del AIC (*) indican mejor ajuste al modelo.

Los sitios agrícolas (A1 y A2) están asociados a un nivel de perturbación mayor que los demás sitios estudiados. En estos, la comunidad de lombrices es muy reducida, mostrando 4 y 5 especies con muy pocos individuos (Cuadro 4.6). Más del 90 % de los individuos encontrados pertenecen al género *Aporrectodea*, particularmente adaptado a elevados niveles de perturbación. En este caso, el nivel de daño que provocan las labranzas [19], junto con la escasa reposición de material alimenticio para las lombrices que caracteriza a los sistemas agrícolas estarían condicionando fuertemente el desarrollo de la comunidad de lombrices y permitiendo la existencia de unas pocas especies exóticas del género *Aporrectodea* adaptadas a una variedad de ambientes perturbados [71].

En los sitios P1 y P2 las especies dominantes fueron del género *Aporrectodea* (*Lumbricidae*) (Cuadro 4.6), representado las especies de este genero entre un 51 y un 86 % del total de lombrices. En el caso de P1, se observó el ajuste al modelo de BR, lo que indicaría una comunidad más estructurada, donde el hábitat es relativamente homogéneo y por ello, el nicho se divide en

forma más equitativa entre las especies. El sitio P2 ajustó al modelo de serie geométrica.

Los sitios EC y R ajustaron al modelo SG. En el caso del uso forestal, el mismo se caracteriza por la ausencia, a partir de la implantación, de perturbaciones originadas en las labranzas y las aplicaciones de agroquímicos. Bajo este tipo de uso, la comunidad de lombrices podría estar posibilitada de incrementar su número de individuos, y su riqueza de especies. Sin embargo se observa en este trabajo una comunidad que se ajusta a un modelo de distribución de serie geométrica, con el más bajo índice de Shannon, marcadamente dominada por una especie (*A. trapezoides*) con el 60 % del total de ejemplares encontrados, siendo más del 98 % lombrices del género *Aporrectodea*. En este caso observamos que la introducción de la especie forestal implica un cambio drástico en la comunidad, que puede estar asociado al tipo de recurso alimenticio que ofrece el árbol en calidad y cantidad [38]. A diferencia de la pastura, que presenta la misma composición específica, la comunidad del sitio R está dominada por la especie exótica *B. parvus* (*Lumbricidae*), con un 33,7% del total de individuos, mostrando un mejor ajuste al modelo de SG. En un sitio sin ningún tipo de manejo, sin intervención agrícola ni ganadera, se espera encontrar una comunidad con mayor riqueza, en la que el tiempo sucesional hubiera permitido el desarrollo de una variedad de nichos para las especies, y por ello permitiera una estructura más equitativa, que se ajustara a un modelo de distribución de abundancias relativas de BR.

4.2.7 Análisis multivariado de las diferencias entre sitios

Se realizó un análisis MRPP (Multi-response permutation procedure), que permite estudiar las diferencias entre grupos de unidades de muestreo, utilizando en este caso los datos de la composición de especies de lombrices. El análisis se realizó tomando como grupos los usos analizados y la temporada de muestreo, encontrando en los dos casos diferencias significativas entre los grupos. El análisis dio como resultado un valor del parámetro $A = 0,07$ con $p < 0,05$ cuando se analizaron diferencias entre usos del suelo, mientras que se halló $A = 0,11$ ($p < 0,05$) en el caso en que se agruparon las unidades de muestreo por temporada. Como se explicó previamente en 2.5, el análisis de especies indicadoras complementa el MRPP, permitiendo profundizar hacia la detección de las especies que originan las diferencias encontradas. De esta manera, se encontró que la especie *A. trapezoides* es la que presenta mayor valor indicador ($p < 0,01$), cuando se comparan los usos del suelo (figura 4.15) mientras que *A. caliginosa* presenta el mayor valor indicador cuando analizamos las temporadas de muestreo ($p < 0,01$), estos resultados pueden verse en la figura 4.14.

4.2.8 Espectro de tamaño de los animales encontrados

Para el muestreo correspondiente al otoño 2005 se midió el largo de los ejemplares encontrados. En la figura 4.16 se muestran los promedios del largo en mm de los mismos. El conjunto de datos se ajustó a una distribución normal, y el análisis de varianza dio significativo ($p < 0,01$). El test de Tukey per-

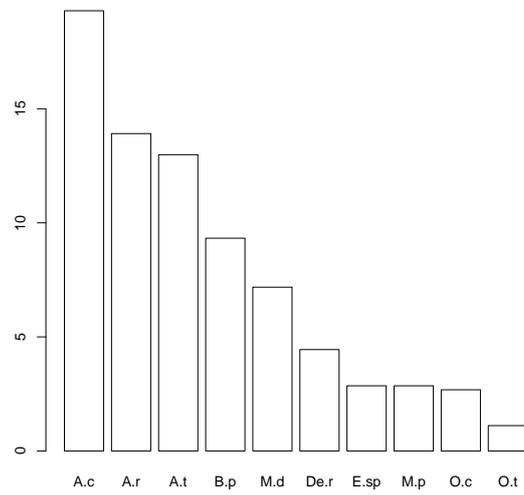


Figura 4.14: Especies indicadoras por temporada.

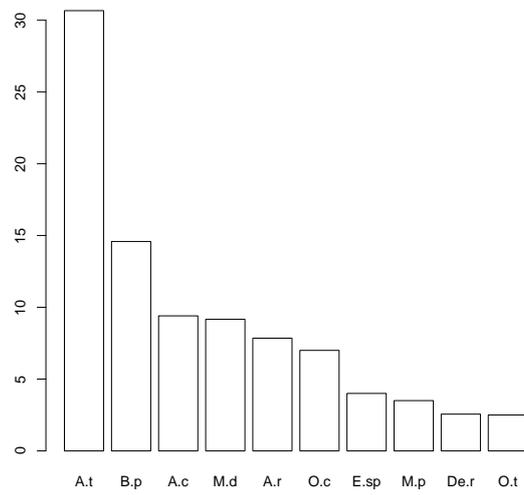


Figura 4.15: Especies indicadoras por lote.

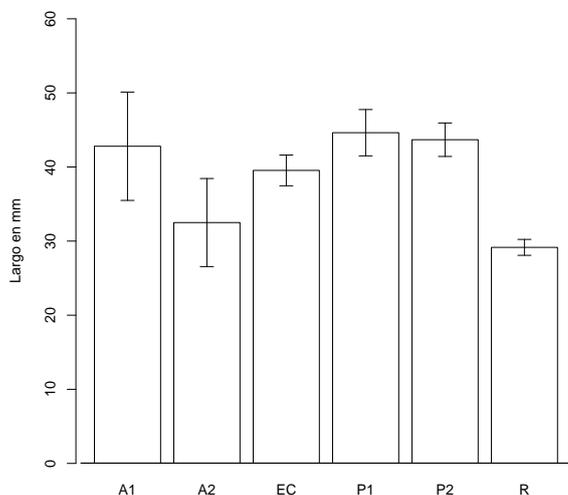


Figura 4.16: Largo promedio de lombrices encontradas en el Otoño de 2005.

mitió observar diferencias significativas: A1 ac, A2 ac, P1 a, P2 a, EC a, R bc (letras distintas expresan diferencias significativas con una probabilidad $p < 0,01$).

4.2.9 Análisis fractal de la estructura del suelo

En la figura 4.17 se observa una muestra de cada sitio relevado en el presente capítulo para el cálculo de las dimensiones fractales. La imagen presentada se obtuvo después de realizar el procesamiento a las imágenes tomadas con cámara digital (ver sección 2.3.3). En este caso se presentan imágenes utilizadas para el cálculo de D_{mp} . Los resultados encontrados muestran un mayor valor en los sitios cuyos usos no requieren la remoción del suelo, es decir en la reserva y en la parcela implantada con *Eucalyptus*. Estos últimos se dife-

rencian significativamente de los sitios agrícolas (A1 y A2) y de la pastura P1. Este resultado está expresando un mayor nivel de detalle y complejidad en los sistemas porosos sin remoción del suelo, lo que tendría relación con la mayor posibilidad de acción de las comunidades de organismos del suelo. Los menores valores en los sitios agrícola y pastoril se deben, por un lado, a la ruptura de macroporos que producen los implementos de labranza y por otro al pisoteo animal, que aumenta la compactación.

El cuadro 4.9 presenta los promedios por lote para todo el ensayo, en cuanto a las dimensiones fractales de las imágenes del suelo. En las figuras 4.21, 4.22 y 4.23 se muestran los valores de las dimensiones fractales para cada temporada mostrando la interacción entre este factor y el sitio de muestreo. Las diferencias observadas gráficamente entre temporadas no apoyarían la hipótesis de que las dimensiones fractales serían similares en distintas temporadas. Los factores que provocan estas diferencias en cuanto a la dimensión fractal entre temporadas podrían tener relación con aspectos climáticos, sin embargo no encontramos asociación entre los promedios de las distintas dimensiones fractales para cada sitio y las variables meteorológicas precipitación, temperatura media y máxima para el mes de muestreo (Prueba de asociación de Pearson, $p < 0,05$). Tampoco encontramos asociación con la biomasa o el número de lombrices encontrado en cada temporada por el mismo método. En las figuras 4.21 y 4.23 observamos que para D_{mp} y D_s la dinámica estacional de estos parámetros en los sitios EC y R es similar, lo que podría indicar la existencia de procesos comunes en el control de estas variables.

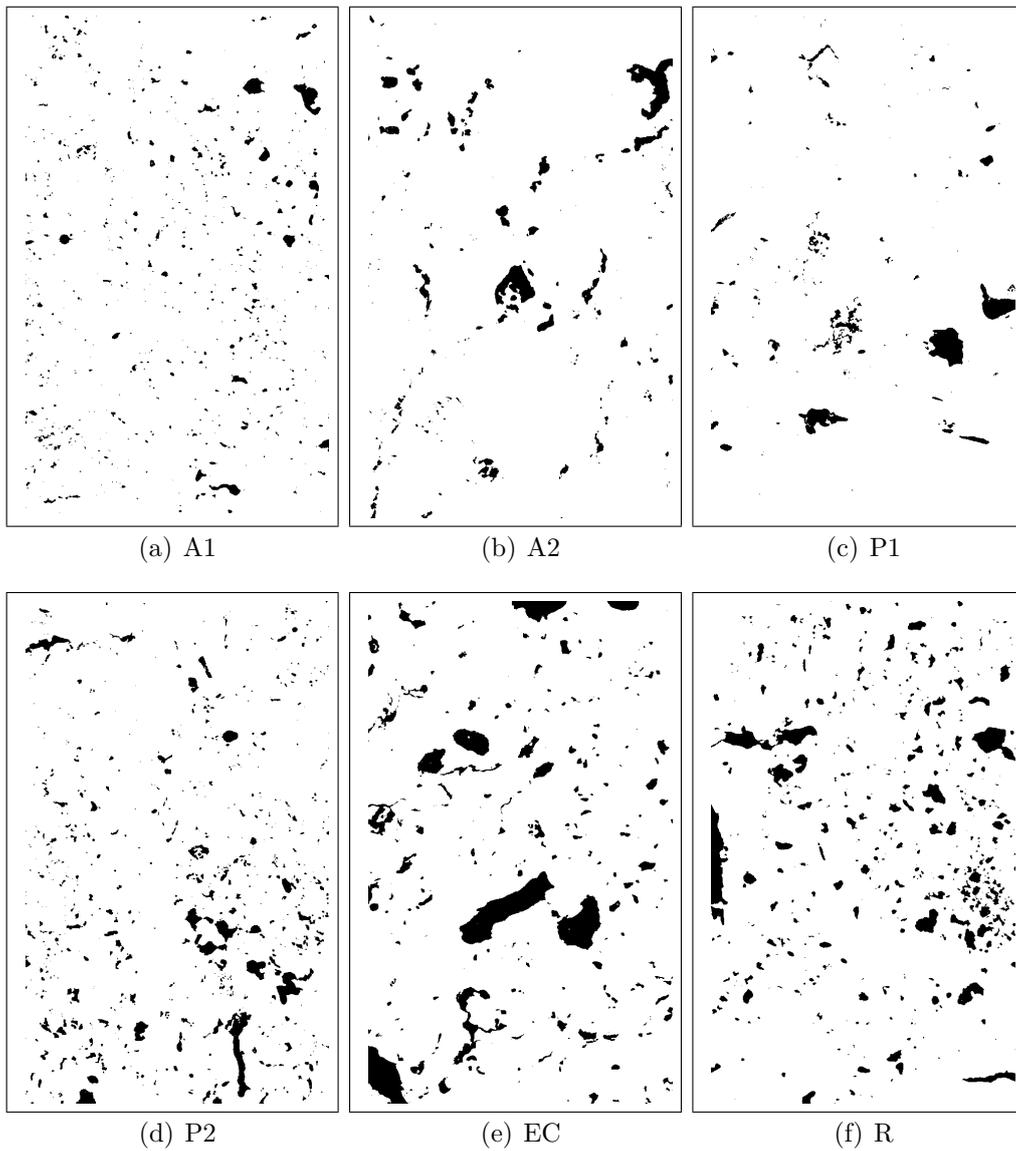


Figura 4.17: Imágenes registradas en los distintos sitios para el cálculo de la dimensión fractal de masa de los poros del suelo (D_{mp}).

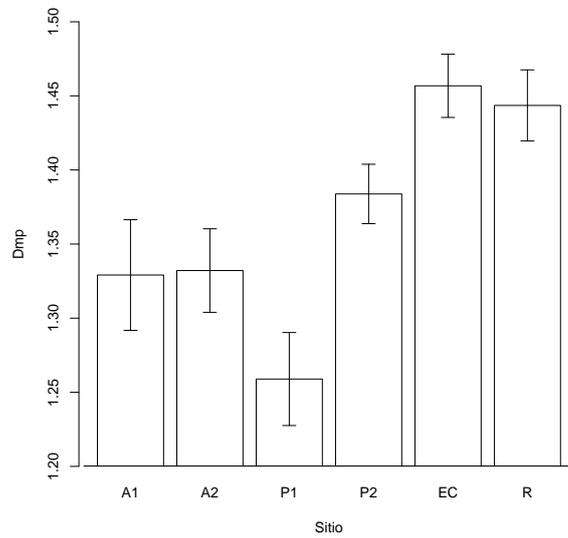


Figura 4.18: Dimensión fractal de masa del sistema poroso D_{mp} .

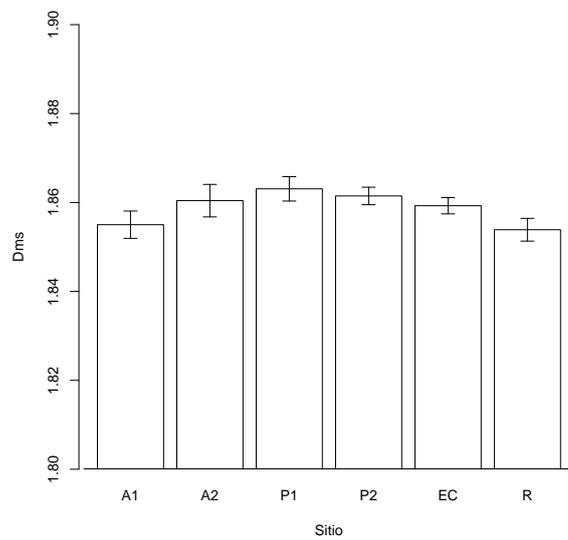


Figura 4.19: Dimensión fractal de masa de la parte sólida del suelo D_{ms} .

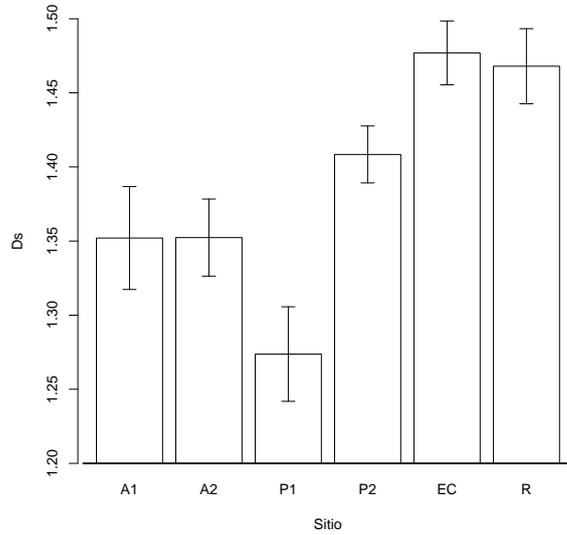


Figura 4.20: Dimensión fractal del contorno de los poros D_s .

	A1	A2	P1	P2	EC	R
D_{mp}	1,33 ± 0,04a	1,33 ± 0,03a	1,26 ± 0,03a	1,38 ± 0,02ac	1,46 ± 0,02bc	1,44 ± 0,02bc
D_{ms}	1,86 ± 0	1,86 ± 0	1,86 ± 0	1,86 ± 0	1,86 ± 0	1,85 ± 0
D_s	1,35 ± 0,03a	1,35 ± 0,03a	1,27 ± 0,03a	1,41 ± 0,02ac	1,48 ± 0,02bc	1,47 ± 0,03bc

Cuadro 4.9: Dimensiones fractales de masa de los poros (D_{mp}) y del suelo (D_{ms}) y dimensión fractal de superficie (D_s). Letras distintas indican diferencias significativas con una probabilidad $p < 0,05$ según los tests de Kruskal-Wallis y de Nemenyi.

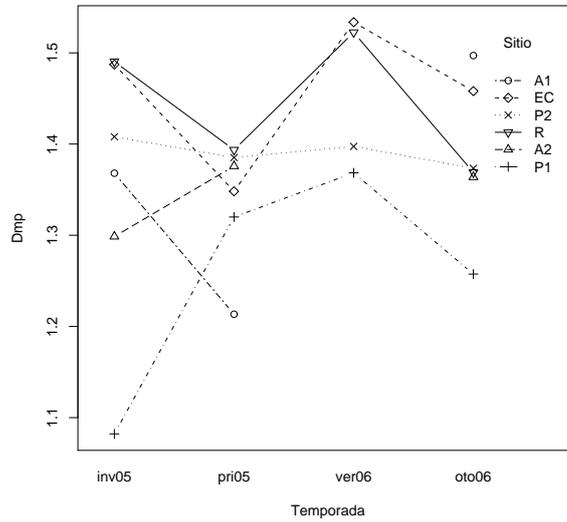


Figura 4.21: Dimensión fractal de masa del sistema poroso D_{mp} según sitio y temporada.

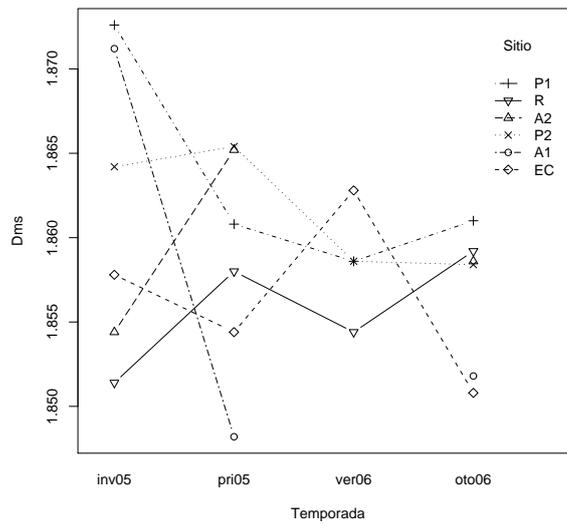


Figura 4.22: Dimensión fractal de masa del espacio sólido D_{ms} según sitio y temporada.

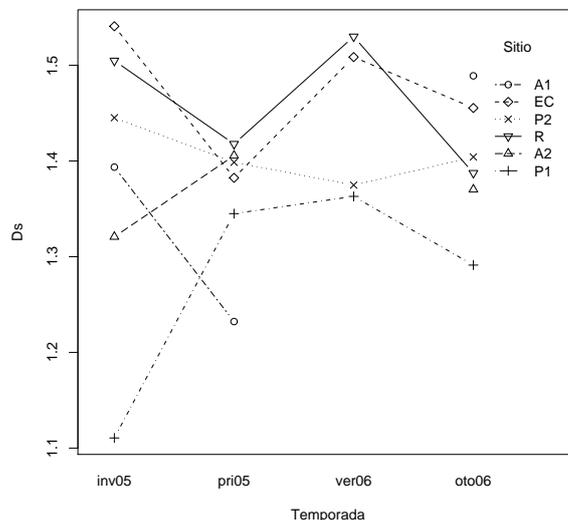


Figura 4.23: Dimensión fractal de superficie D_s según sitio y temporada.

4.3 Discusión y conclusiones

En este capítulo trabajamos la interrelación entre la comunidad de lombrices y la estructura fractal del suelo en sitios con distinto uso, registrando parámetros de la comunidad y del suelo durante un período de dos años. Se registraron algunos parámetros físico-químicos que presentaron diferencias entre usos. En el caso de la materia orgánica, este parámetro fue mayor en P1 y EC que en A1. El pH fue mayor en R a todos los demás sitios. Mientras que la δ_{ap} presentó el menor valor en el sitio EC y el más alto en las pasturas, haciendo ver la compactación asociada en este uso al pastoreo directo.

En general, la abundancia de lombrices y riqueza de especies está determinada por las características ambientales de los ecosistemas tales como disponibilidad de alimento, textura y porosidad de los suelos, interacciones con otros organismos y prácticas agrícolas [19, 82]. Todas estas característi-

cas son alteradas por el uso del suelo. Vemos en efecto, que la biomasa y el número de lombrices son muy bajos en los sitios A1 y A2 en promedio para todo el muestreo (ver figuras 4.5 y 4.7) diferenciándose estadísticamente de los demás sitios relevados en el caso de la biomasa, y de P2, EC y R en el caso del número. Asimismo observamos que esta baja abundancia guarda relación con su escasa posibilidad de recuperación en temporadas del año más favorables como se observa en los demás sitios, que muestran una marcada dinámica estacional (ver figuras 4.4 y 4.6). Los sitios A1 y A2 no mostraron asociación con ninguna de las variables meteorológicas analizadas. Observamos entonces que un uso del suelo que combina uso de agroquímicos, con remoción del suelo y escasa reposición de materia orgánica, y por lo tanto el de mayor nivel en el gradiente de perturbación propuesto, resulta en el más lesivo para la abundancia y biomasa de lombrices.

La estructura de su comunidad puede analizarse de diversas maneras, calculando índices de diversidad como los de Shannon o Simpson, estimadores de riqueza como los de Chao [63], o estudiando la distribución de abundancias relativas [101]. Esta distribución expresa la partición de los recursos existentes en un sitio entre las especies encontradas en el mismo. En el caso de comunidades integradas por pocas especies relacionadas taxonómicamente, estas pueden analizarse mediante sus funciones de distribución, asumiendo que, teniendo un nicho similar, este puede ser dividido en porciones representan la abundancia de cada especie [34, 69, 103].

El análisis de las especies presentes nos muestra que la mayor riqueza e índice de Shannon se encontraron en los sitios con un uso que conlleva menor remoción del suelo, tanto una pastura implantada, como un sitio de pastizal

sin uso. Por su parte, se observó la menor diversidad y la ausencia de especies nativas en el sitio A1, mientras que en A2 se encontraron 2 ejemplares de *M. phosphoreus* en todo el muestreo. Las especies del género *Aporrectodea*, caracterizadas por su adaptación a espacios perturbados estuvieron representadas en más de un 90 % en estos dos sitios. Las diferencias en la diversidad de lombrices se estudiaron mediante el estimador jackknife del índice de Shannon, H'^* . Con este indicador se observó que la diversidad de cada sitio fue, de menor a mayor, EC < A1, A2 y P2 < R < P1.

En el caso de los modelos de distribución de abundancias relativas encontramos un ajuste al modelo de Bastón roto en los sitios A1, A2, P1 mientras que el ajuste al modelo de Serie geométrica se encontró en los sitios restantes. En principio este resultado no coincide con lo esperado en cuanto a que sitios con menor intensidad de uso permitirían condiciones para el establecimiento de comunidades más equitativas, y por lo tanto, su distribución de abundancias debiera ajustar mejor a un modelo de Bastón roto.

El análisis multivariado mostró que existen diferencias entre los distintos usos analizados en cuanto a la composición de especies y en particular, que la especie *A. trapezoides* resultó indicadora de las diferencias entre usos. El test MRPP nos mostró que hubo diferencias en las comunidades de lombrices cuando se agruparon las unidades de muestreo por temporada, encontrando que la especie *A. caliginosa* fue más importante para diferenciar los grupos.

Cuando analizamos el tamaño de los ejemplares relevados encontramos que el sitio R presentó lombrices más pequeñas que los sitios P1, P2 y EC. Según observamos en la figura 4.13 la especie dominante en el sitio R es *B. parvus*, una especie exótica de tamaño corporal pequeño.

El análisis fractal de las imágenes del suelo mostró también diferencias entre usos del suelo. En los sitios con uso agrícola o de pastura hay factores asociados al sistema productivo como la labranza o el pisoteo animal que afectan la estructura del suelo, en cambio en los sitios EC y R, los cambios en la estructura del suelo estarían asociados principalmente a procesos biológicos originados tanto por las plantas como por los animales que habitan el suelo. En efecto, observamos en el relevamiento de sitios con distinto uso en un gradiente de perturbación diferencias en las dimensiones fractales del sistema de poros (D_{mp} y D_s) que separan dos grupos: A1, A2 y P1 por un lado y EC y R por otro. Si bien no se encontró asociación entre estos parámetros y las variables meteorológicas o los resultados de biomasa y abundancia de lombrices a lo largo del estudio, es de destacar que estos dos parámetros de la estructura del suelo (D_{mp} y D_s) tuvieron una dinámica estacional similar en los sitios EC y R.

Como se planteó en la hipótesis de este capítulo, se encontró que los diferentes usos del suelo analizados produjeron cambios tanto en la estructura de la comunidad de lombrices como en la estructura del suelo. Encontramos una asociación entre la comunidad de lombrices y la temporada de muestreo vinculando esto a ciertas variables meteorológicas seleccionadas mientras que no encontramos asociación entre el momento de muestreo y los parámetros relacionados con la estructura fractal.

Capítulo 5

Dominios Funcionales: Relación entre la Comunidad de Lombrices y el Suelo

Como hemos visto, las lombrices de tierra conforman uno de los grupos más importantes de la fauna del suelo y son uno de los componentes más relacionados con su estructura. Jones y colab. [54] caracterizan a las lombrices como ingenieros del ecosistema, debido a su capacidad de modular la disponibilidad de recursos para otros organismos, por medio de las modificaciones en el hábitat que realizan con sus movimientos y hábitos alimentarios. Estas modificaciones en el hábitat a que hacemos referencia se acumulan en el tiempo, pueden ser identificadas y separadas del volumen del suelo y presentan propiedades estructurales y de arquitectura específicas. Al conjunto de estas estructuras asociadas a la actividad de las lombrices Lavelle [61] lo denomina dominio funcional, y particularmente este dominio es llamado drilosfera. Este autor plantea además que la asociación de poros y agregados de diferente forma y tamaño caracteriza cada dominio funcional.

El objetivo de este capítulo es analizar los patrones, la distribución de tamaños y las formas de poros y estructuras generadas por lombrices de tierra en un suelo Argiudol típico, en la búsqueda de analizar las características específicas de la drilosfera en este tipo de suelos y evaluar su diferenciación respecto de otras estructuras presentes en el suelo. Para ello se clasifican por su forma y tamaño los poros de imágenes utilizadas en el capítulo anterior, luego se presentan los resultados de un ensayo de laboratorio en el que se comparan las drilosferas generadas por dos especies de lombrices y en un apartado posterior se utilizan las imágenes para evaluar la clasificación de poros por un método multivariado.

5.1 Distribución de tamaños y forma de poros

5.1.1 Materiales y métodos

El trabajo se realizó en el campo experimental de la Universidad Nacional de Luján. Se estudió la distribución de tamaño de poros en los sitios descritos en la sección 4.1. Se analizó la forma y distribución de tamaños de los poros del suelo en las imágenes utilizadas para el cálculo de la dimensión fractal.

Sobre las imágenes en blanco y negro se midieron y contaron la totalidad de los poros. Se midió en cada uno de los poros el área y el perímetro, y se calculó un factor de forma F (ver ecuación 2.3). Los poros se clasificaron de acuerdo al factor de forma en: Redondeados ($F > 0,5$) Irregulares ($0,5 > F > 0,2$) y Elongados ($F < 0,2$) [89]. Los datos se importaron en el programa

estadístico R para su análisis. Se tuvieron en cuenta los poros de un área mayor a $0,785 \text{ mm}^2$, que corresponden a un diámetro equivalente de 1 mm, considerando que son los que potencialmente resultan de la actividad de las lombrices de tierra [62, 104].

Se calculó el número de poros totales y por tipo de forma para cada muestra. Se realizó el test de Shapiro para analizar si los datos obtenidos se ajustaban a una distribución normal. Se realizó una prueba de Kruskal-Wallis para el número total de poros, y para el número de poros de cada categoría de forma, tomando como factor el lote. Este análisis se realizó para cada temporada de muestreo. En caso de resultar significativo el test de Kruskal-Wallis, los resultados se analizaron por medio del test de comparaciones múltiples no-paramétrico de Nemenyi.

Posteriormente, con el conjunto de poros de cada muestra se calculó el histograma de frecuencias de tamaños, con 17 clases de frecuencia entre $0,75$ y 5 mm^2 . Estos resultados se promediaron obteniendo un histograma para cada lote. Se realizaron los gráficos siguiendo el procedimiento citado para cada temporada de muestreo. Las diferencias entre las distribuciones promedio para cada lote se analizaron por medio del test de χ^2 detallado en la sección A.6.

5.1.2 Resultados

El análisis del número de poros totales y en las categorías de forma en cada muestra tomada nos mostró que existen diferencias entre sitios con distinto uso en algunas de las temporadas de muestreo analizadas. Se encontró que

solamente algunos sitios cumplieron con el requisito de normalidad (Ver el cuadro A.1) por lo que se realizó en todos los casos el test de Kruskal-Wallis. Para cada temporada, las categorías de forma de los poros que mostraron un valor de $p < 0,05$ para esta prueba (ver el cuadro A.2) se analizaron con el test de comparaciones múltiples de Nemenyi. El número de poros totales mostró diferencias en el muestreo correspondiente a la primavera de 2004; el número de poros redondeados en primavera de 2004, verano de 2005 e invierno de 2005; para el caso de los poros irregulares se encontraron diferencias en el verano de 2006 mientras que en el caso de los poros elongados, no se encontraron diferencias entre usos en todo el relevamiento. En los cuadros 5.1 a 5.3 se observa el número de poros de cada categoría. Se presentan las figuras y cuadros para las temporadas en que hubo diferencias significativas.

El factor de forma toma un valor máximo de 1, que corresponde a la figura de un círculo. Por ello, los poros con un factor de forma $F > 0,5$ son considerados redondeados. Las estructuras biogénicas asociadas a la construcción de galerías que realizan las lombrices tendrán principalmente esta forma, y por ello se encontrarán en mayor cantidad en sitios con mayor actividad biológica. Como se vio en los capítulos anteriores las comunidades de lombrices son más abundantes en sitios con menor intensidad de uso, o con usos asociados a una menor remoción del suelo, y por lo tanto es esperable un mayor número de poros con este tipo de forma. En este capítulo encontramos diferencias entre sitios por el test de Kruskal-Wallis para este tipo de forma en la primavera de 2004, verano de 2005 e invierno de 2005 (ver cuadro 5.2) y vemos que el número de poros es mayor en EC y R diferenciándose del sitio P1 que tomó los menores valores.

Capítulo 5. Dominios Funcionales: Relación entre la Comunidad de Lombrices y el Suelo

	A1	A2	P1	P2	EC	R
Primavera 2004	396,5 ± 95,6 ab	276,0 ± 109,6 a	248,0 ± 38,4 a	513,7 ± 68,0 ab	338,0 ± 33,1 ab	672,4 ± 89,6b

Cuadro 5.1: Número de poros totales por lote y temporada. Se muestran las temporadas para las que el test de Kruskal-Wallis dió significativo. Letras distintas implican diferencias significativas por el test de comparaciones múltiples de Nemenyi.

	A1	A2	P1	P2	EC	R
Primavera 2004	6,5 ± 0,5 ab	8,3 ± 2,6 abc	4,4 ± 1,0 a	9,7 ± 1,5 abc	20,4 ± 2,5 bc	23,8 ± 2,4 c
Verano 2005			5,2 ± 1,0 a	5,0 ± 1,5 a	12,8 ± 5,1 ab	19,0 ± 3,1 b
Invierno 2005	5,8 ± 2,0 ab	5,2 ± 2,1 ab	3,4 ± 0,5 a	6,0 ± 1,7 ab	16,0 ± 2,2 b	13,2 ± 3,3ab

Cuadro 5.2: Número de poros redondeados por lote y temporada. Se muestran las temporadas para las que el test de Kruskal-Wallis dió significativo. Letras distintas implican diferencias significativas por el test de comparaciones múltiples de Nemenyi.

	A1	A2	P1	P2	EC	R
Verano 2006			7,6 ± 2,7 ab	6,2 ± 2,2 a	16,2 ± 1,1 b	16,0 ± 2,2b

Cuadro 5.3: Número de poros irregulares por lote. Este tipo de poros mostró diferencias significativas solamente en el Verano de 2006. Letras distintas implican diferencias por el test de comparaciones múltiples de Nemenyi.

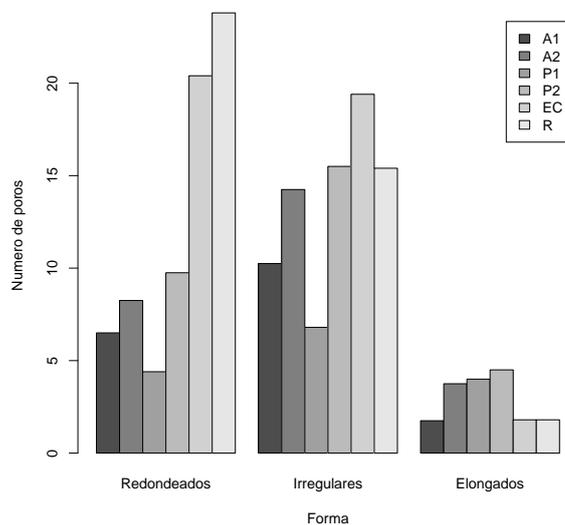


Figura 5.1: Número de poros por clase de forma y por sitio de muestreo. Temporada: Primavera 2004. Se encontraron diferencias significativas para los poros redondeados (ver cuadro 5.2).

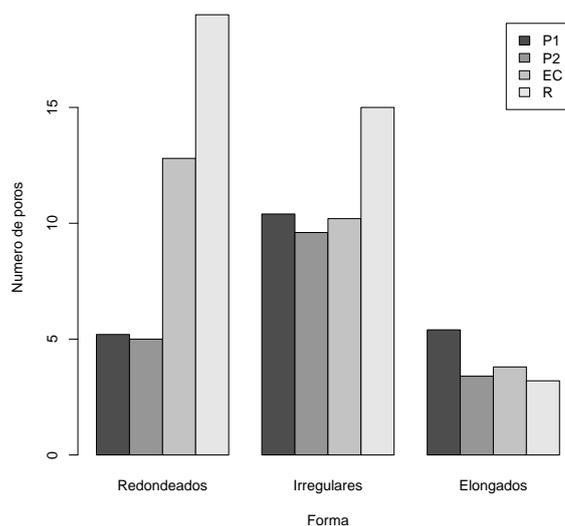


Figura 5.2: Número de poros por clase de forma y sitio de muestreo. Temporada: Verano 2005. Se encontraron diferencias significativas para los poros redondeados (ver cuadro 5.2).

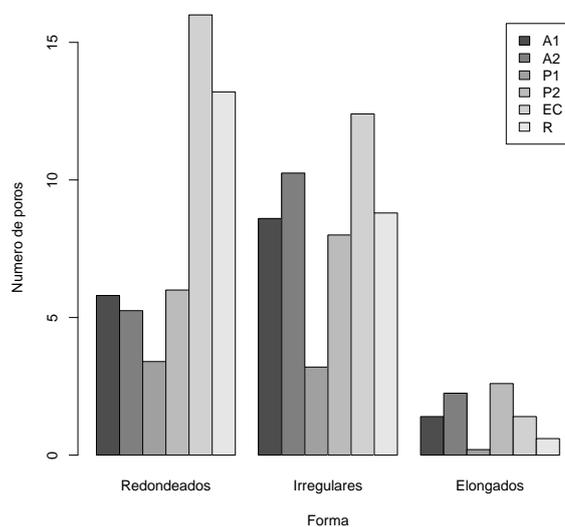


Figura 5.3: Número de poros por clase de forma y sitio de muestreo. Temporada: Invierno 2005. Se encontraron diferencias significativas para los poros redondeados (ver cuadro 5.2).

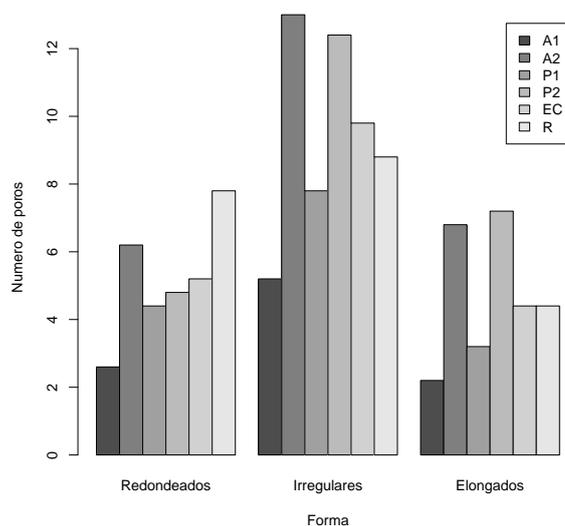


Figura 5.4: Número de poros por clase de forma y sitio de muestreo. Temporada: Primavera 2005. No se encontraron diferencias significativas para ninguna de las clases de forma (ver cuadro A.2).

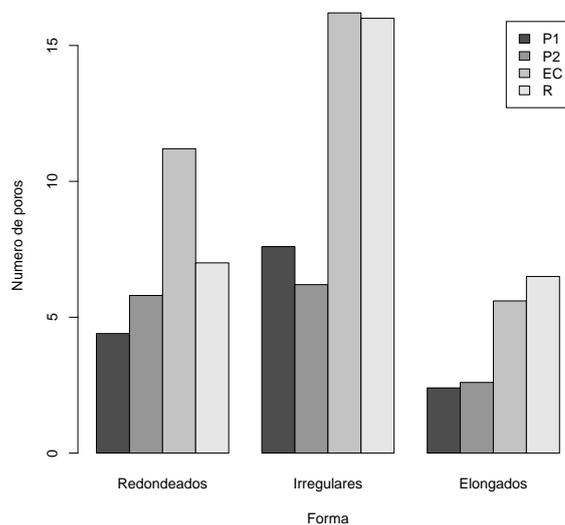


Figura 5.5: Número de poros por clase de forma y sitio de muestreo. Temporada: Verano 2006). Se encontraron diferencias significativas para los poros irregulares (ver cuadro 5.3).

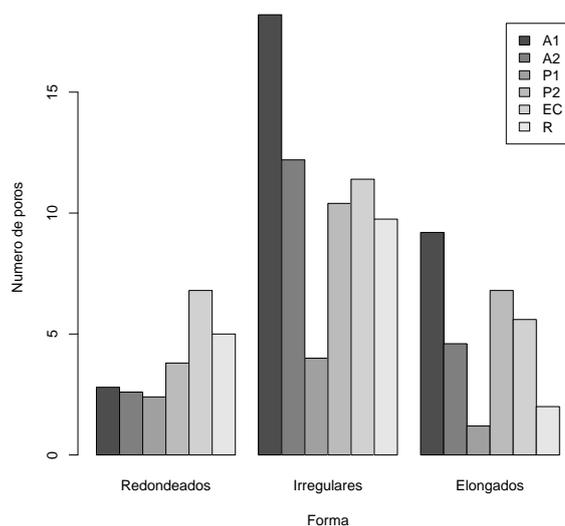


Figura 5.6: Número de poros por clase de forma y sitio de muestreo. Temporada: Otoño 2006. No se encontraron diferencias significativas para ninguna de las clases de forma (ver cuadro A.2).

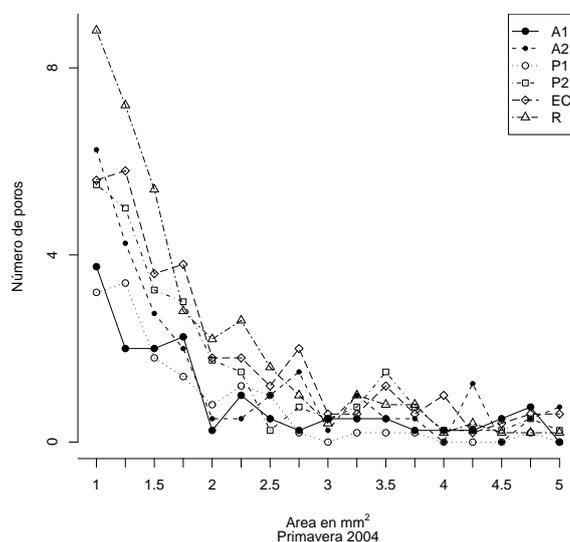


Figura 5.7: Histograma de frecuencias de tamaño de poros (Primavera 2004).

En las figuras 5.7 a 5.12 se presentan los histogramas de frecuencias de tamaño de poros para cada temporada de muestreo. En todas puede observarse gráficamente una distribución de tamaño de poros similar para todos los sitios. El test de χ^2 realizado sobre los datos confirma este resultado al mostrar la ausencia de diferencias estadísticamente significativas.

5.2 Patrones espaciales de cada especie

Ya se ha comentado en este trabajo el efecto que las lombrices de tierra tienen sobre la estructura del suelo. En la pradera pampeana de la Argentina se encuentran especies endógeas que realizan galerías subsuperficiales. Mediante este accionar modifican el patrón espacial del espacio poroso al interior del primer horizonte del suelo.

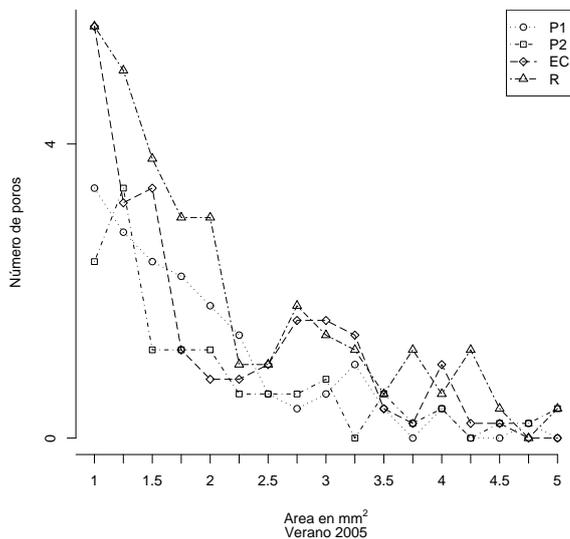


Figura 5.8: Histograma de frecuencias de tamaño de poros (Verano 2005).

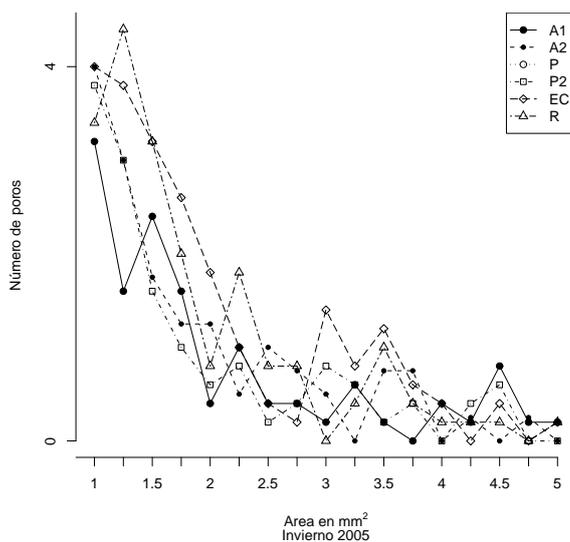


Figura 5.9: Histograma de frecuencias de tamaño de poros (Invierno 2005).

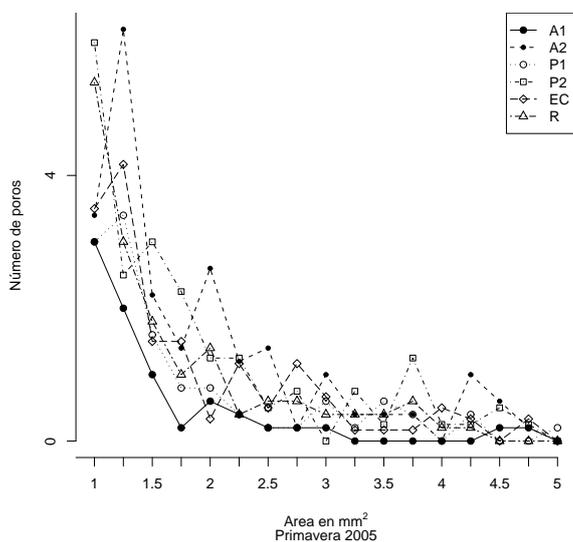


Figura 5.10: Histograma de frecuencias de tamaño de poros (Primavera 2005).

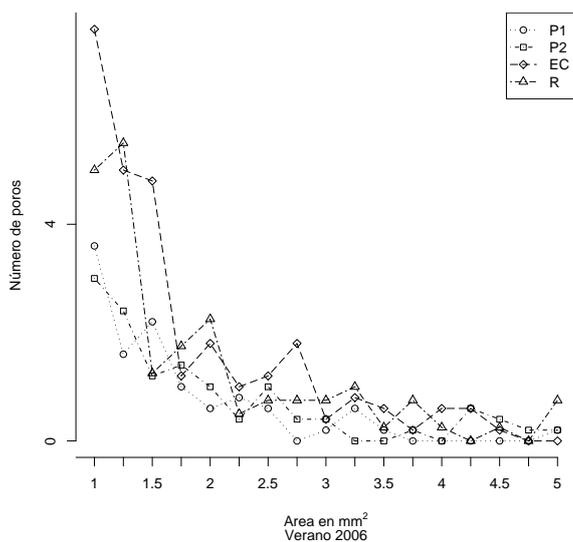


Figura 5.11: Histograma de frecuencias de tamaño de poros (Verano 2006).

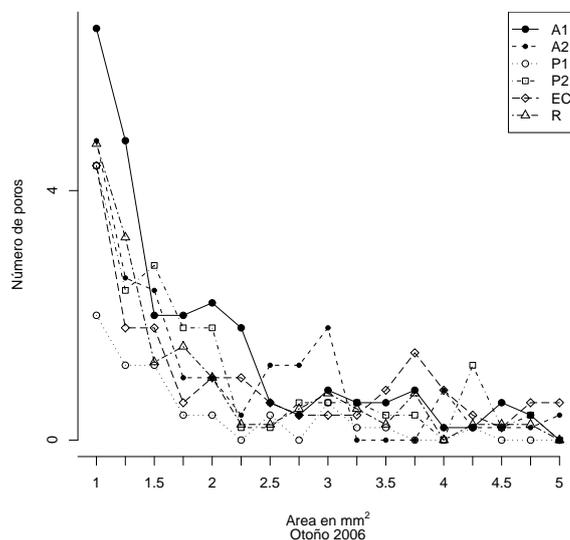


Figura 5.12: Histograma de frecuencias de tamaño de poros (Otoño 2006).

La matemática fractal se aplicó también aquí para estudiar el efecto de las lombrices en el patrón espacial del espacio poroso. Para analizar esos cambios se realizó un ensayo de laboratorio en el que se evaluó la modificación que realizan dos especies de lombrices en la estructura de un suelo de pradera.

5.2.1 Materiales y métodos

Se evaluaron dos especies de lombrices comúnmente encontradas en suelos agrícolas de la región: *Aporrectodea trapezoides* (A) y *Octolasion cyaneum* (O). Se recolectaron ejemplares adultos de sitios con pasturas, los que se colocaron en cajas de vidrio de 15 cm x 10 cm x 20 cm (figura 5.13) disponiendo 4 repeticiones por especie y para el testigo (T). El suelo utilizado provino de los mismos sitios donde se encontraron los ejemplares. Previamente a colocarlo en las cajas se secó al aire y se homogeneizó el tamaño de agregados



Figura 5.13: Caja de vidrio utilizada para cada unidad experimental.

pasándolo por un tamiz de 4 mm. Este procedimiento produjo la disgregación de los componentes estructurales del suelo en unidades menores al tamaño del tamiz. Luego se colocó en autoclave durante una hora a una atmósfera de presión. El suelo se fue agregando en 5 capas de aproximadamente 500 g cada una, compactando para alcanzar una δ_{ap} aproximada de 1 Mg/m^3 . Al comenzar el ensayo se colocaron en la superficie de cada caja 15 g de estiércol vacuno como fuente de materia orgánica. Se midió el contenido de humedad inicial y se agregó el agua necesaria para alcanzar un 30 % de humedad. Luego se dispusieron 3 ejemplares por caja, con una biomasa entre 1,0 y 1,7 g. A los 60 días de iniciado el ensayo se suspendió el riego y los dispositivos se dejaron secar al aire.

Tres unidades por tratamiento se secaron en estufa a $40 \text{ }^\circ\text{C}$ y se impregnaron con resina poliéster mezclada con un colorante fluorescente. Luego del fraguado se realizaron tres cortes en cada unidad, que se fotografiaron con cámara digital (ver sección 2.3). Se clasificaron los poros por su forma (ecuación 2.3) y tamaño, realizando histogramas de frecuencias de tamaño de poros.

La construcción de los histogramas y el análisis estadístico se explican en la sección anterior (5.1) y en Apéndices (A.6) respectivamente. Se realizó el cálculo de la dimensión fractal del sistema poroso de cada muestra. Como en todo el presente trabajo, los resultados se analizaron mediante test de Shapiro para evaluar la normalidad de los datos y en el caso de que las series de datos no tuvieran distribución normal, resultado obtenido en la mayoría de los casos, por el análisis de varianza no-paramétrico de Kruskal-Wallis tomando como factor el tratamiento (cada especie y el testigo). Luego se realizó en los casos en que el test diera significativo, el test de comparaciones múltiples de Nemenyi (ver sección 2.6).

5.2.2 Resultados

En la figura 5.14 se muestran los histogramas de frecuencias de tamaño de poros para cada tratamiento. No se encontraron diferencias significativas entre los histogramas por el método de χ^2 . El gráfico 5.15 muestra los resultados correspondientes al número de poros redondeados encontrados en cada tratamiento, mientras que en la figura 5.16(a) se observa el número de poros totales. En el primero se observa el mayor número de poros redondeados en el tratamiento con la especie *A. trapezoides* (diferencias significativas por el test de Nemenyi con $p < 0,05$). Este resultado está mostrando que los poros de este tipo son una de las principales estructuras biogénicas asociadas a la drilosfera. Por otra parte, se encontró que la actividad de ambas especies de lombrices produce una disminución del número de poros totales, de un promedio de más de 10000 en el testigo a menos de 6000 en el caso de la

	Tratamiento		
	A	O	T
Poros totales	3724,00 ± 1126,56a	5538,00 ± 1070,73a	10437,33 ± 1039,34b
Poros redondeados	5,66 ± 0,82a	2,11 ± 0,42b	1,33 ± 0,62b
D_{mp}	1,57 ± 0,05a	1,61 ± 0,04a	1,73 ± 0,01a
D_{ms}	1,86 ± 0,00a	1,86 ± 0,00a	1,86 ± 0,01a
D_s	1,51 ± 0,05a	1,58 ± 0,05a	1,72 ± 0,01b

Cuadro 5.4: Número de poros totales, redondeados y dimensiones fractales calculadas en cada tratamiento.

especie *O. cyaneum*, y menos de 4000 en el tratamiento con la especie *A. trapezoides* (ver cuadro 5.4 y figura 5.16(a)). En ningún caso se observó un cambio en la porosidad total entre tratamientos, por lo que las lombrices de tierra crean su dominio funcional mediante la redistribución de agregados en el volumen del suelo provocando el aglutinamiento de poros pequeños para la construcción de galerías.

Cuando analizamos la estructura fractal de las imágenes de cada tratamiento, vemos que no se encontraron diferencias significativas para las dimensiones fractales de masa, tanto del sistema poroso como de la parte sólida del suelo (D_{ms} y D_{mp}). La D_s sin embargo mostró diferencias significativas entre el testigo y los dos tratamientos con lombrices. El mayor valor de D_s en el testigo hace referencia a una mayor rugosidad de las líneas de contacto poro-agregado, y es coherente con la tendencia observada al aumento de los poros redondeados en los tratamientos que contaron con la presencia de lombrices. Los resultados se muestran en los gráficos 5.16 a 5.18.

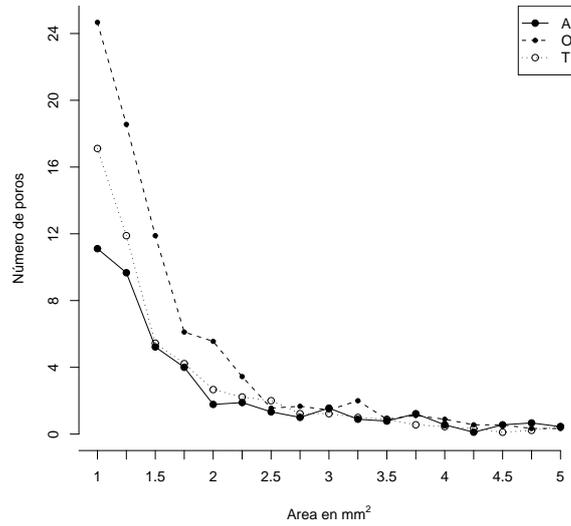


Figura 5.14: Histogramas de frecuencias de tamaño de poros.

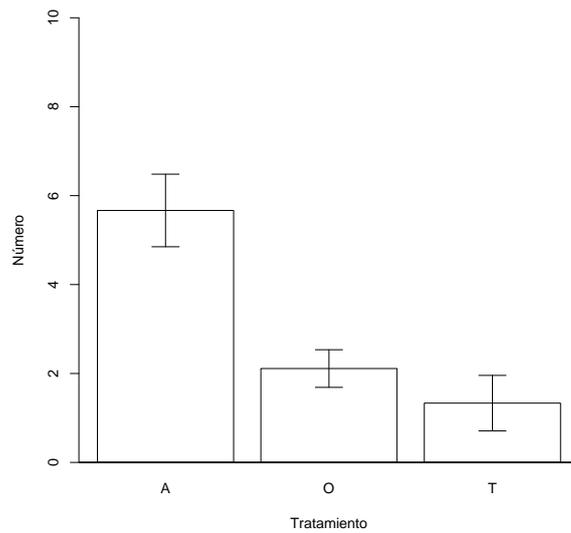
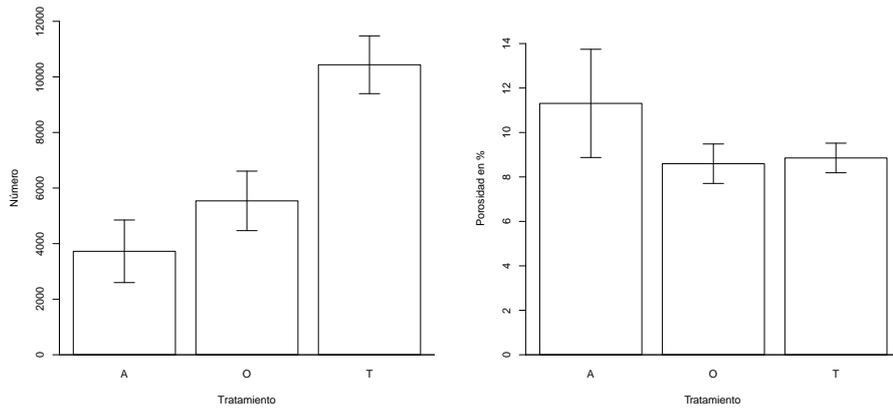


Figura 5.15: Poros redondeados por tratamiento.



(a) Poros totales por tratamiento

(b) Porosidad en %

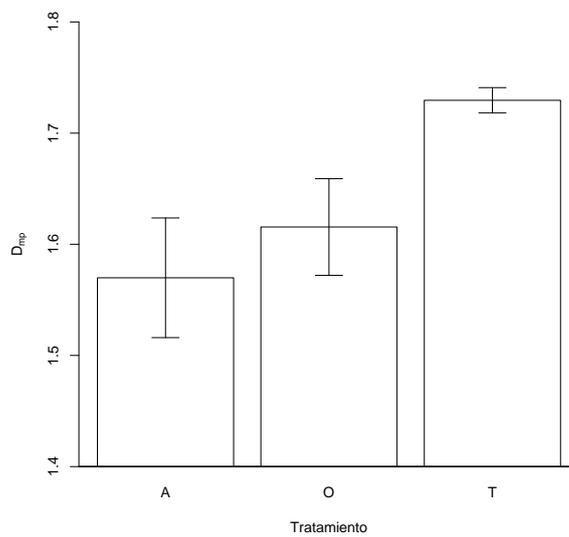


Figura 5.16: Dimensión fractal de masa del sistema de poros.

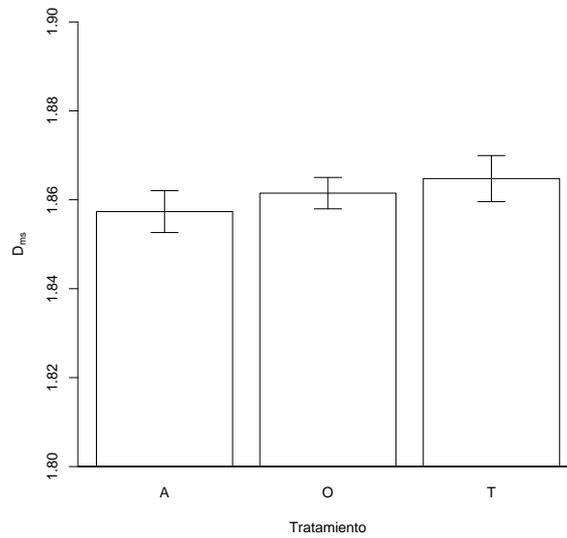


Figura 5.17: Dimensión fractal de masa del espacio sólido del suelo.

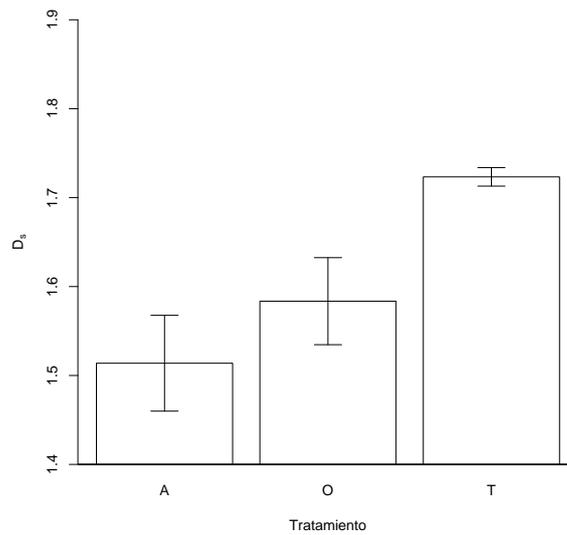


Figura 5.18: Dimensión fractal de superficie del sistema de poros.

5.3 Clasificación de poros producidos por lombrices por métodos de análisis multivariado

La acción de las lombrices produce cambios en la geometría de los poros del suelo; como vimos en el apartado anterior, la acción de las lombrices produce cambios en la rugosidad de las paredes de los poros y además se observó un aumento del número de poros de forma redondeada. Las características geométricas de estos poros podrían utilizarse por lo tanto, para reconocer algunas de estas estructuras biogénicas en muestras de campo. Con el objetivo de evaluar esta posibilidad se aplicó un método de análisis multivariado en las imágenes del ensayo presentado en la sección anterior (5.2) para observar si existen características geométricas de los poros del suelo que puedan utilizarse para diferenciar bioporos correspondientes al dominio funcional desarrollado por lombrices de tierra.

5.3.1 Materiales y Métodos

Se utilizó una técnica de análisis de discriminantes para realizar una clasificación de los poros por diferentes características geométricas de los mismos (fase exploratoria). Se elaboró un conjunto de poros de entrenamiento formado por dos subconjuntos: a) 35 bioporos provenientes de tres cortes realizados en una muestra perteneciente al tratamiento con la especie *A. trapezoides*; b) 35 poros seleccionados al azar entre tres cortes de una muestra del tratamiento testigo. En ambos casos se tomaron poros con un área mayor a

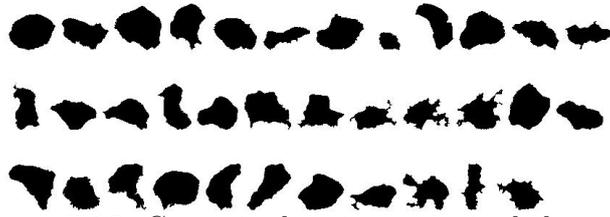


Figura 5.19: Conjunto de entrenamiento de bioporos.



Figura 5.20: Conjunto de entrenamiento de no-bioporos.

0,785 mm². En la imagen de cada poro se midieron las siguientes características geométricas: el área, el perímetro, el alto y ancho del menor rectángulo que delimita la imagen, los ejes mayor y menor de la elipse que mejor se ajusta al poro seleccionado, el factor de forma F (ecuación 2.3), el cociente entre el área del poro y la del polígono envolvente (C) y el diámetro Feret máximo y mínimo, que es la distancia entre los puntos más alejados o cercanos del contorno del poro. Se midieron también en cada poro la dimensión fractal de masa y de superficie. Estas características geométricas se midieron luego en cuatro imágenes distintas y se aplicó la clasificación automática de bioporos a partir de la función discriminante anterior (fase predictiva). El análisis se realizó con el programa estadístico R [90].

5.3.2 Resultados

Fase exploratoria

En el cuadro 5.5 se muestran los coeficientes de la función discriminante calculada para el conjunto de datos de entrenamiento. En ella se ve que el mayor aporte a la separación entre los grupos lo realizan las variables D_{mp} , factor de forma (F), la D_s , el cociente entre el área del poro y la del polígono envolvente (C) y el diámetro Feret. VandenBygaart y colab. [104] miden en su trabajo el área, el perímetro y como medida de irregularidad, el cociente entre el perímetro del polígono envolvente y el área del poro. Estos autores proponen que un refinamiento de las tecnologías de análisis de imágenes, especialmente en lo que hace a definir las características morfométricas de los poros podría conducir a una determinación automática de los atributos del suelo. En este sentido, nuestro trabajo provee una evaluación de la importancia de distintas medidas de la forma de los poros en la clasificación de los mismos, agregando nuevos parámetros de forma como es el caso de la dimensión fractal. Vemos por ejemplo que el área o el perímetro son medidas importantes en cuanto a la caracterización de cada poro no individualmente sino en la relación que presentan entre sí al definir el factor de forma F .

Fase predictiva

La función discriminante obtenida se utilizó para realizar una clasificación automática de los poros de cuatro imágenes tomadas también en el marco del ensayo descripto. En el cuadro 5.6 se presenta la matriz de clasificación obtenida, allí se observa que la función discriminante hallada permite identificar

VARIABLES MEDIDAS	COEFICIENTE
D_{mp}	-10,22
F	-5,92
D_s	3,88
C	-1,31
Feret	-1,11
Eje Menor	-0,94
Alto	0,90
Ancho	0,86
Feret mínimo	-0,76
Eje Mayor	-0,61
Area	0,244
Perimetro	-0,05

Cuadro 5.5: Coeficientes de la función discriminante ordenados de mayor a menor valor absoluto.

	MUESTRA	CORRECTO	INCORRECTO
Bioporos	1	71 %	29 %
No bioporos	1	100 %	0 %
Bioporos	2	70 %	30 %
No bioporos	2	100 %	0 %
Bioporos	3	100 %	0 %
No bioporos	3	62 %	38 %
Bioporos	4	75 %	25 %
No bioporos	4	74 %	26 %

Cuadro 5.6: Matriz de clasificación. Para cada categoría de poros se muestra el porcentaje de los mismos que fue clasificado correcta e incorrectamente.

correctamente más del 70 % de los bioporos presentes.

Estos resultados constituyen un avance en el conocimiento del sistema de poros del suelo para una mejor definición de los factores que lo afectan. Profundizar el conocimiento sobre los efectos de la fauna del suelo es crucial para desarrollar nuevas técnicas de manejo de este recurso vital.

5.4 Discusión y conclusiones

En los relevamientos realizados en este trabajo y en otros realizados en el país [21, 73, 75] las especies encontradas, tanto nativas como exóticas, pertenecen a la categoría ecológica de endógeas. Los animales de esta categoría habitan exclusivamente en el horizonte superficial del suelo, y construyen en él galerías no permanentes. Gracias a ello las lombrices tienen la categoría de ingenieras del ecosistema, desarrollando el dominio funcional por la acumulación de estructuras biogénicas [7, 26, 54, 61].

Los distintos tipos de estructuras que producen las lombrices pueden ser sus heces, que forman agregados órgano-minerales de distintas formas y tamaños y las galerías que generan con sus movimientos. Este trabajo se centró en la caracterización de estas últimas. Otros autores han utilizado para ello también técnicas de análisis de imágenes o de tomografía computada [6, 104].

El objetivo de este capítulo fue analizar los patrones, la distribución de tamaños y las formas de poros y estructuras generadas por lombrices de tierra en un suelo Argiudol típico, en la búsqueda de definir las características específicas de la drilosfera en este tipo de suelos y evaluar su diferenciación respecto de otras estructuras presentes en el suelo. Para ello se clasifican por su forma y tamaño los poros de imágenes utilizadas en el capítulo 4, luego se presentan los resultados de un ensayo de laboratorio en el que se comparan las drilosferas generadas por dos especies de lombrices y en un apartado posterior se utilizan las imágenes para evaluar la clasificación de poros por un método multivariado.

Para el análisis del sistema de poros de los seis usos descriptos en el

capítulo anterior, se clasificaron los poros encontrados mediante un factor de forma y se realizaron los histogramas de frecuencias de tamaño de poros. Observamos que el número de poros redondeados fue diferente entre sitios en tres temporadas de muestreo, presentando valores mayores en los sitios EC y R. Por su parte los histogramas de frecuencia de tamaño de poros no fueron distintos entre sitios en ninguna temporada, es decir, que el uso del suelo, y las comunidades de lombrices presentes que según vimos son diferentes en abundancia y diversidad, no producen modificaciones en la distribución de tamaño de poros, cuando analizamos poros que tienen un área entre 0,785 y 5 mm².

Observando los resultados del ensayo en el que evaluamos los efectos en la estructura del suelo de dos especies de lombrices (sección 5.2), vemos que las especies analizadas no modificaron la distribución de tamaño de poros de un área mayor a 0,785 mm², que son los que serían afectados por la creación de galerías por parte de las lombrices. Sin embargo encontramos que las dos especies de lombrices provocaron una disminución de más del 40% del número de poros totales, sin modificar la porosidad total. Esta reducción se produce por la redistribución de agregados producto del movimiento de las lombrices, a la vez que se forman macroporos de formas redondeadas y paredes suavizadas. En efecto, se observó un mayor número de poros redondeados en el tratamiento con la especie *A. trapezoides*, así como una menor dimensión fractal de superficie. VandenBygaart y colab. [104] interpretan en su estudio que la estructura observada en el tratamiento bajo siembra directa se desarrolló únicamente bajo la acción de lombrices de tierra por una serie de indicadores de la actividad de estos organismos, y definen los poros

atribuidos a las lombrices con parámetros relacionados con su forma. Aplicando una técnica de reconocimiento automático, encuentran además que el número de estructuras biogénicas creadas por las lombrices fue mayor en este tratamiento en comparación con la labranza convencional. En nuestro ensayo, a diferencia del trabajo citado, determinamos específicamente qué muestras fueron influenciadas por la actividad de las lombrices de tierra colocando ejemplares identificados de dos especies y encontramos también que es mayor el número de poros con formas redondeadas en los casos en que se manipuló la presencia de lombrices, encontrando además una respuesta diferencial entre las dos especies: la especie *A. trapezoides* se diferenció estadísticamente del testigo. Por otro lado, encontramos que la dimensión fractal puede constituir un parámetro adicional para la caracterización de las estructuras influenciadas por lombrices de tierra, dado que se encontró una disminución de este valor en los tratamientos con lombrices.

Por último se realizó la búsqueda de una función discriminante para la clasificación automática de poros originados por lombrices. Encontramos mediante el análisis exploratorio de esta función que hay cinco parámetros de forma que son más importantes para la caracterización de dos grupos de poros como son los bioporos originados por lombrices y los provenientes de un tratamiento testigo sin influencia de estos organismos. Estos parámetros son: la D_{mp} , el factor de forma (F), la D_s , el cociente entre el área del poro y la del polígono envolvente (C) y el diámetro Feret. Utilizando la función encontrada con un fin predictivo, encontramos que la función discriminante permite identificar más del 70% de los bioporos presentes en muestras independientes.

Capítulo 6

Síntesis y conclusiones

En esta tesis se analizaron las interrelaciones entre las comunidades de lombrices y la estructura del suelo. Para ello, hemos analizado paralelamente la estructura de la comunidad de lombrices y la estructura del suelo poniendo en evidencia las condiciones que actúan en el desarrollo de una y otra. El efecto de la intensidad de uso se analizó en el capítulo 3, mientras que la relación con el tipo de uso se analizó en el capítulo 4. Por último en el capítulo 5 exploramos distintas técnicas para cuantificar el dominio funcional regulado por las lombrices de tierra. Para sintetizar esta tesis exponemos las principales conclusiones que surgen del análisis de cada capítulo.

6.1 Gradiente de perturbación

En el capítulo 3 se estudió la relación entre la comunidad de lombrices y la dimensión fractal de los componentes sólidos y porosos del suelo en sitios con diferentes grados de perturbación con un mismo uso.

Se encontró que la dimensión fractal de masa del sistema de poros (D_{mp})

es mayor en sitios con mayor diversidad y riqueza de especies de lombrices. A su vez, esta medida de la complejidad estructural es afectada por el grado de perturbación que sufre el suelo; dicha perturbación afecta también la actividad y complejidad del gremio de lombrices de tierra.

En el capítulo 3 se encontró que todos los sitios relevados tienen altos valores de biomasa y abundancia, en relación con valores normales en pasturas fertilizadas hallados en la bibliografía [20].

Sin embargo, la pastura con la mayor intensidad de uso tuvo una baja riqueza de especies, mostrando una marcada dominancia de la especie *Microscolex dubius*. Proponemos que la riqueza observada en P2 y P3 está relacionada con una tendencia al incremento de la riqueza y diversidad de la comunidad a medida que se reduce la intensidad de uso.

Bajo las condiciones de este estudio, se observó que en 2 a 3 años a partir del establecimiento de una pastura, el número de especies de lombrices se recupera visiblemente. Se observó la misma tendencia en las medidas de diversidad de especies (cuadro 3.6).

La distribución de abundancias relativas de las especies se ajustó bien en todos los casos a series geométricas. Esto indica que, dentro del rango de perturbación estudiado, los recursos están distribuidos jerárquicamente dentro de la comunidad de lombrices. El valor del coeficiente k del modelo SG es una medida de dominancia, como tal incrementó su valor en el sentido del nivel de perturbación. Con relación al aspecto estructural del suelo, este resultado indica que una o unas pocas especies son responsables del patrón fractal observado y del desarrollo del dominio funcional.

De acuerdo a nuestros resultados, existe una interacción entre la lombri-

fauna del suelo y la estructura del mismo, en la que ambas se transforman mutuamente. Una vez que la perturbación cesa o su intensidad se reduce, tanto la comunidad de lombrices como la estructura del suelo incrementan su complejidad.

Hemos demostrado que existe un vínculo entre D_{mp} , como medida de la complejidad del sistema poroso del suelo, y la diversidad y riqueza de especies de lombrices, de manera que un ambiente edáfico más complejo a la vez favorece y es favorecido por una comunidad de lombrices más diversa. La presencia de poros más grandes y un sistema poroso más continuo puede ofrecer nichos para más especies de lombrices. En efecto, hemos encontrado comunidades más equitativas y un cambio en el patrón de dominancia en el modelo SG, a lo largo del gradiente de perturbación que podría estar relacionado con el patrón fractal del espacio poroso. Del mismo modo, en el caso de organismos que realizan galerías como las lombrices, estimamos que las comunidades con mayor riqueza de especies pueden ejercer una variedad de efectos en la complejidad del sistema poroso del suelo que configura las condiciones para mantener altos valores de la dimensión fractal de masa del espacio de poros.

Mediante el control de la intensidad con que se aplican las prácticas agrícolas, el hombre manipula el grado en el que afecta la estructura del suelo, afectando las funciones del suelo y por lo tanto condicionando el desarrollo de la fauna que en él habita.

Las dimensiones fractales del suelo representan el resultado de los efectos de disrupción mecánica de origen antrópico y la modificación biológica del sistema poroso, por lo que pueden ser usadas como indicadores del estado de

la estructura del suelo y del grado de perturbación.

6.2 Cambios asociados al uso del suelo

En el capítulo 4 trabajamos la interrelación entre la comunidad de lombrices y la estructura del suelo en sitios con distinto uso, registrando parámetros de la comunidad y del suelo durante un período de dos años. El tenor de materia orgánica fue mayor en P1 y EC que en A1. El pH fue mayor en R a todos los demás sitios. Mientras que la δ_{ap} presentó el menor valor en el sitio EC y el más alto en las pasturas, lo cual está asociado al pastoreo directo.

Se encontró un valor muy bajo de biomasa y número de individuos en los sitios A1 y A2. Observamos que esta baja abundancia guarda relación con su escasa posibilidad de recuperación en temporadas del año más favorables como se observó en los demás sitios, que muestran una marcada dinámica estacional. Los sitios A1 y A2 no mostraron asociación con ninguna de las variables meteorológicas analizadas. Observamos entonces que un uso del suelo que combina uso de agroquímicos, con remoción del suelo y escasa reposición de materia orgánica, y por lo tanto el de mayor nivel en el gradiente de perturbación propuesto, resulta en el más lesivo para la abundancia y biomasa de lombrices.

La mayor riqueza y diversidad se encontró en los sitios con un uso definido como de menor intensidad: tanto una pastura implantada, como un sitio de pastizal sin uso. Por su parte, se observó la menor diversidad y la ausencia de especies nativas en el sitio A1. Las especies del género *Aporrectodea*, caracterizadas por su adaptación a espacios perturbados fueron las más abundantes

en el uso agrícola.

En el caso de los modelos de distribución de abundancias relativas encontramos un ajuste al modelo de Bastón roto en los sitios A1, A2, P1 mientras que el ajuste al modelo de Serie geométrica se encontró en los sitios restantes. En principio este resultado no coincide con lo esperado en cuanto a que sitios con menor intensidad de uso permitirían condiciones para el establecimiento de comunidades más equitativas, y por lo tanto, su distribución de abundancias debiera ajustar mejor a un modelo de Bastón roto.

Los suelos con distinto uso se diferencian en la composición específica de su comunidad de lombrices, lo que se pudo observar mediante análisis multivariado. Se encontró que la especie *Aporrectodea trapezoides* resultó indicadora de las diferencias entre usos. También se encontró que las comunidades están representadas por distintas especies entre temporadas del año, siendo la especie indicadora de estas diferencias *Aporrectodea caliginosa*.

Cuando analizamos el tamaño de los ejemplares relevados encontramos que el sitio R presentó lombrices más pequeñas que los sitios P1, P2 y EC.

Enfocando en la estructura del suelo, el análisis fractal mostró también diferencias entre usos del suelo. Si bien las dimensiones fractales son diferentes entre temporadas, las diferencias no se deben a factores meteorológicos. Nuevamente las dimensiones fractales asociadas al sistema de poros (D_{mp} y D_s) resultaron diferentes entre sitios mientras que D_{ms} no permitió diferenciar usos del suelo. La dimensión de masa y la de superficie de los poros fueron mayores tanto en EC como en R. Junto a lo observado cuando se estudió un gradiente de perturbación en el capítulo 3, las dimensiones fractales mostraron ser útiles como indicadores del estado de la estructura del suelo.

Desde el punto de vista de abordar la comprensión del sistema edáfico como un sistema complejo, este tipo de medidas que son el resultado de la integración de procesos, permitirán cada vez más profundizar el conocimiento del recurso.

Se encontró que los diferentes usos del suelo analizados afectan las relaciones que existen entre la estructura de la comunidad de lombrices y la estructura del suelo.

6.3 Caracterización del dominio funcional

En el capítulo 5 se buscó analizar los patrones de porosidad, la distribución de tamaños y formas de poros y estructuras generadas por lombrices de tierra en un suelo Argiudol típico, en la búsqueda de analizar las características específicas de la drilosfera y evaluar su diferenciación respecto de otras estructuras presentes en el suelo.

El análisis del sistema de poros mostró que en los diferentes usos del suelo encontramos una similar distribución de tamaño de poros. Se observó este resultado cuando se compararon dos especies distintas de lombrices por lo que no serían estos organismos responsables de la modificación de este patrón de la porosidad. Se observó que el número de poros redondeados fue mayor en los sitios EC y R, lo cual está directamente relacionado a la mayor actividad biológica de estos usos.

Se encontró que el número de poros totales fue reducido tanto por *Aporrectodea trapezoides* como por *Octolasion cyaneum* en más de un 40%. Habiéndose mantenido la porosidad total, este cambio se da por la reorgani-

zación de agregados y poros en el espacio que realizan las lombrices con su movimiento. Esto muestra la capacidad de modificación del hábitat atribuida a estos organismos. Clasificando los poros por su forma encontramos que la especie *A. trapezoides* incrementó mediante su acción el número de poros redondeados mayores a $0,785 \text{ mm}^2$, que son los posiblemente producidos por las lombrices. Se observó que la acción de las lombrices en el suelo produce un suavizado de las superficies de contacto poro-agregado, denotado por la reducción de la dimensión fractal de superficie (D_s). Como se vio previamente, las dimensiones fractales asociadas al sistema de poros (D_{mp} y D_s) fueron diferentes en suelos con distinto grado de perturbación dentro de un mismo uso, lo fueron en usos distintos también en un gradiente de intensidad de uso, y muestran que son afectadas por la actividad de lombrices de tierra en un ensayo de laboratorio. Este resultado permite concluir que la dimensión fractal constituye un parámetro adicional de relevancia para la caracterización de las estructuras influenciadas por lombrices de tierra.

La búsqueda de una función discriminante para la clasificación automática de poros originados por lombrices mostró que hay cinco parámetros de forma que tienen más peso en la clasificación de poros en dos grupos: bioporos originados por lombrices y un conjunto tomado al azar de un tratamiento sin influencia de estos organismos. Estos parámetros son: la D_{mp} , el factor de forma (F), la D_s , el cociente entre el área del poro y la del polígono envolvente (C) y el diámetro Feret. La función encontrada se utilizó con un fin predictivo, permitiendo identificar más del 70 % de los bioporos presentes en muestras independientes.

En la introducción a este trabajo nos planteamos como interrogante (pág. 9) si la influencia de las lombrices en la estructura del suelo puede hacer que sean consideradas ingenieras del ecosistema, en las condiciones de uso predominantes en la región estudiada. A lo largo de todo el trabajo vemos cómo un sistema poroso complejo junto a la presencia de estructuras biogénicas está asociado a la mayor abundancia y diversidad de la comunidad de lombrices. Dicho de otro modo, encontramos que donde la comunidad de lombrices es incipiente y, por el grado de intensidad de uso, no encontramos el correlato estructural en el suelo, entonces la drilosfera asociada es también incipiente. En este sentido, el dominio funcional, tal como fue definido por Lavelle [61], es resultado de la interacción analizada entre la comunidad de lombrices y la estructura del suelo, teniendo en un agroecosistema al uso y manejo como los principales factores que condicionan uno y otro componente.

Apéndice **A**

Material adicional

A.1 Gráficos y Tablas

En esta sección se presentan tablas, gráficos y otros resultados obtenidos en el marco del presente trabajo.

Temporada	Totales	Redondeados	Irregulares	Elongados
Primavera 2004	0,16	0,052	0,06	0,00
Verano 2005	0,45	0,01	0,001	0,12
Invierno 2005	0,16	0,02	0,20	0,00
Primavera 2005	0,41	0,02	0,25	0,00
Verano 2006	0,61	0,42	0,22	0,07
Otoño 2006	0,93	0,05	0,41	0,00

Cuadro A.1: Valor p del test de normalidad de Shapiro para los valores de forma de los poros en cada temporada. Valores mayores a 0,05 indican que los datos se ajustan a una distribución normal.

Temporada	Totales	Redondeados	Irregulares	Elongados
Primavera 2004	0,014	0,001	0,074	0,346
Verano 2005	0,272	0,03	0,728	0,78
Invierno 2005	0,126	0,023	0,161	0,41
Primavera 2005	0,072	0,479	0,402	0,242
Verano 2006	0,136	0,216	0,01	0,233
Otoño 2006	0,158	0,109	0,073	0,088

Cuadro A.2: Valor p para el test de Kruskal-Wallis realizado con los resultados de forma de los poros en cada temporada. Valores menores a 0,05 (en negritas) indican un resultado significativo.

A.2 Fotos

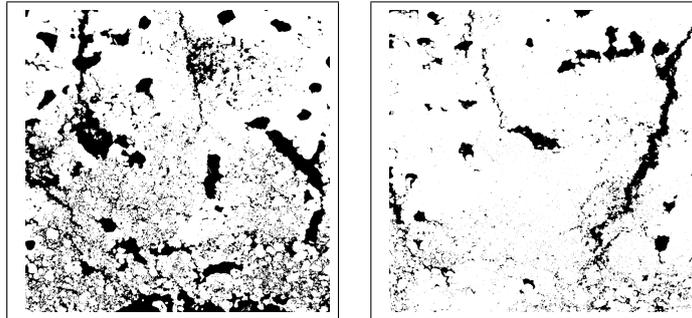
A continuación, las figuras A.1(a) a A.1(c) muestran una imagen seleccionada de cada tratamiento correspondiente al ensayo descrito en la sección 5.2.

A.3 Métodos para discriminar la estructura generada por las lombrices de tierra de la estructura edáfica: Uso de ImageJ

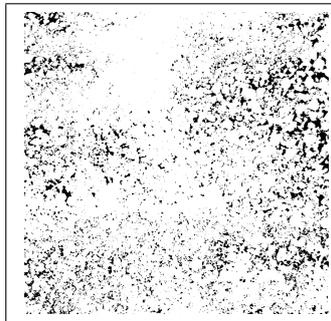
A continuación presentamos un conjunto de programas utilizados para automatizar el trabajo del programa ImageJ [91] utilizado en el procesamiento de imágenes.

El siguiente se utilizó para definir la escala en mm de un conjunto de imágenes en una carpeta. Previamente se calcula el tamaño del píxel con una medida conocida en una imagen, este valor se asigna a la opción `known` de la función `run("Set Scale...")`.

```
macro "Definir escala [s]"
```



(a) Imagen del tratamiento A. (b) Imagen del tratamiento O.



(c) Imagen del tratamiento testigo (T).

Figura A.1: Imágenes registradas en el ensayo del efecto de dos especies de lombrices.

```
{  
requires("1.33n");  
dir = getDirectory("Elegir una carpeta ");  
list = getFileList(dir);  
setBatchMode(true);  
  
for (i=0; i<list.length; i++) {  
    path = dir+list[i];  
    showProgress(i, list.length);  
    open(path);  
}
```

```
setThreshold(0, 128);
run("Threshold", "thresholded remaining black");
title = getTitle();
run("Set Scale...", "distance=1 known=0.029 pixel=1 unit=mm");
saveAs("tiff",getTitle());
close();
}
}
```

La función siguiente es llamada con distintas opciones para realizar las mediciones de los poros individuales de cada imagen. Se utilizó para obtener los datos que se utilizaron en el capítulo 5.

```
function AnalizPoros(dir,list,roi){
    setBatchMode(true);
    for (i=0; i<list.length; i++){
        path = dir+list[i];
        showProgress(i, list.length);
        if(endsWith(path, ".tif")){
            open(path);
            title =getTitle();
            setThreshold(0, 128);
            run("Threshold", "thresholded remaining black");
            run("Make Binary");
            run("Set Measurements...", "area perimeter bounding fit shape_
                feret's redirect=None decimal=3");
        }
    }
}
```

```
if (roi==1){
run("Analyze Particles...", "size=0.78-Infinity_
circularity=0.00-1.00 show=Nothing display exclude clear record add");
roiManager("Save",path+"RoiSet.zip");
}

if (roi ==0){
run("Analyze Particles...", "size=0.78-Infinity_
circularity=0-1.00 show=Nothing display exclude record");
saveAs("Measurements", dir + "Results " + title + ".txt");
}

run("Select None");
close();
}
}
}
```

Con las macros siguientes se llama a la función definida más arriba. Con la primera se almacenan los resultados de medir cada imagen en un archivo de texto. Mientras que con la segunda se guarda en un archivo por imagen la información de la selección (ROI: Region Of Interest) de cada poro. Esta información será utilizada posteriormente por el programa Fraclac para calcular la dimensión fractal de cada poro.

```

1. macro "Analizar poros [a]"{
    requires("1.29n");
    dir = getDirectory("Elige una carpeta");
    list = getFileList(dir);
    roi=0;
    AnalizPoros(dir,list,roi);
}

2. macro "Analizar guardando en ROI Manager [m]"{
    dir = getDirectory("Elige una carpeta");
    list = getFileList(dir);
    roi=1;
    AnalizPoros(dir,list,roi);
}

```

A.4 Cálculo de la dimensión fractal. Uso de ImageJ con el complemento Fraclac.

En la figura A.2 se puede observar una imagen del programa ImageJ junto al complemento Fraclac utilizado para el cálculo de la dimensión fractal. Brevemente explicamos con esta imagen que el cálculo de la dimensión fractal para una imagen como la de la figura (que dará D_{mp} en este caso) se realiza presionando el botón *Scan Image or ROI*. Para aplicar el cálculo a un conjunto de imágenes de una carpeta, se selecciona *Select Files* mientras que para calcular la dimensión fractal a un conjunto de poros de una imagen

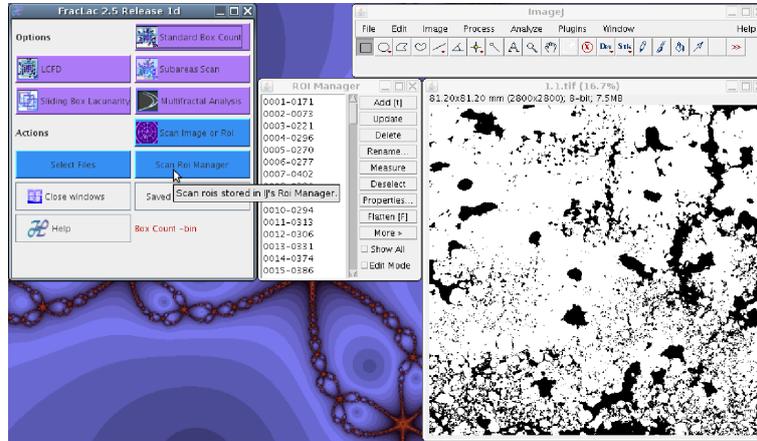


Figura A.2: Captura de pantalla mostrando el programa ImageJ junto al complemento Fractalac para el cálculo de la dimensión fractal.

separado a partir del ROI Manager, hay que presionar el botón *Scan ROI Manager*.

A.5 Programas en R para el análisis estadístico

A continuación se presenta el código fuente de algunos de los tests estadísticos realizados en el presente trabajo.

A.5.1 Test de Nemenyi

El siguiente es el código utilizado en R para realizar el test de Nemenyi de comparaciones múltiples no-paramétrico. Para cada análisis realizado se cambian los nombres de la variable respuesta (*respuesta*), el factor (*factor*) y el nombre de la tabla que contiene los datos (*datos*) por los valores correspondientes. La siguiente implementación se tomó de la documentación del paquete *coin* en R [50].

```

if (require("multcomp") & require("coin")){
  NDWD <- oneway_test(respuesta ~ factor, data=datos, _
  ytrafo = function(data) trafo(data, numeric_trafo = rank), _
  xtrafo = function(data) trafo(data, factor_trafo = function(x) _
  model.matrix(~x - 1) %*% t(contrMat(table(x), "Tukey"))), _
  teststat = "max", distribution = approximate(B = 90000))
### valor de p global
  print(pvalue(NDWD))
### valor de p para cada par de comparaciones
  print(pvalue(NDWD, method = "single-step")) }

```

A.5.2 Índices de diversidad

A continuación se presenta el código fuente en R utilizado para los cálculos de diversidad.

Función para calcular el índice de diversidad de Margalef

```

margalef <- function(especies){
  require(vegan)
  (specnumber(especies)-1)/log(apply(especies,1,sum))
}

```

Función para calcular el índice de Simpson

```

diversity(AbundCIC,index="inv")

```

Función para calcular el número de especies por rarefacción. La función `rarefy` estima el número de especies para cada sitio suponiendo que todos tuvieran la misma abundancia, por lo que en este caso se toma como argumento el menor número de individuos registrado (`nmin`).

```
rarefy(AbundCIC,nmin,se=T)
```

Función para calcular la redundancia según Hurlbert [51] y Margalef [67]

```
redund <- function(esp,tipo="margalef"){
  require(vegan)
  TIPOS <- c("margalef","hurlbert")
  tipo <- match.arg(tipo,TIPOS)
  n.esp <- length(esp)

  #Una comunidad de H Mínimo es aquella donde hay una especie que
  #tiene Nt - S + 1 individuos y las demás un sólo individuo cada una:

  sp1 <- rowSums(esp) - specnumber(esp) + 1
  comHmin <- NULL
  for(i in 1:nrow(esp)){
    comHmin <- rbind(comHmin, c(sp1[i],rep.int(1,
      specnumber(esp[i,])-1), rep.int(0,n.esp-specnumber(esp[i,]))))
  }

  comHmin <- data.frame(comHmin,row.names=names(sp1))
  names(comHmin) <- 1:n.esp

  if (tipo=="hurlbert")
    #Siendo V = H-Hmin/Hmax-Hmin; R = 1-V
    R = 1- ((diversity(esp)-diversity(comHmin))/_
      (log2(specnumber(esp))-diversity(comHmin)))
}
```

```

else if (tipo=="margalef")
  #R = Hmax-H/Hmax-Hmin
  R = (log2(specnumber(esp))-diversity(esp))/_
      (log2(specnumber(esp))-diversity(comHmin))

return(R)
}

```

Función para calcular la equitatividad

```

equitatividad <- function(esp){
  diversity(esp,base=2)/log2(specnumber(esp))
}

```

A.5.3 Especies indicadoras

En este apartado se describe la implementación del análisis de especies indicadoras según McCune y Grace [70]. Se crea la función `espindic` que calcula el valor indicador de cada especie. Luego, la función `espindicmc` calcula la significación estadística de este valor indicador calculado por un método de Monte Carlo. Los datos deben organizarse en una tabla de abundancias absolutas con las unidades de muestreo en las filas y las especies en las columnas, y un factor que indica la asignación de las unidades de muestreo a cada grupo. En la figura A.3 puede verse parte de la tabla cargada para los análisis de diversidad de especies de lombrices realizados en este trabajo.

```

espindic <- function(datos,factor){
require(vegan)

```

```

andres@rodia: ~/Investigacion/tesis/Resultados
> especies.lst$especies
  A. r A. t A. c B. p De. r E. sp M. d M. p 0. c 0. t
a841  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
a842  0  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0
a843  0  0  1  0  0  0  0  0  0  0  0
a844  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
a845  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
aa841 0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
aa842 0  4  0  0  0  0  0  1  0  0  0
aa843 1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
aa844 0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
aa845 0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
p841  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
p842  0  0  0  0  29  0  1  2  0  0  0
  
```

Figura A.3: Tabla ingresada en R para el análisis de datos de especies.

```

if (!is.data.frame(datos)){
stop("el argumento debe ser tipo data.frame")
}
nmuestras <- nrow(datos)
nespecies <- length(datos)
niveles <- levels(factor)
nniveles <- length(niveles)
#calcula la abundancia media de cada especie en cada nivel del factor
a <- 1:nespecies
for (i in 1:nniveles)
{
a <- rbind(a, apply(subset(datos,factor==niveles[i]),2,mean))
}
abundmedia <- a[-1,]
#Luego calcula la abundancia relativa de cada especie en cada nivel del factor
a <- 1:nespecies
for (i in 1:nniveles){
a <- rbind(a,abundmedia[i,]/apply(abundmedia,2,sum))
}
  
```

```
abundrel <- a[-1,]
#Transforma la matriz de datos original en una de presencia-ausencia
y luego calcula la frecuencia relativa
a <- 1:nespecies
for (i in 1:nniveles){
a <- rbind(a, apply(subset(decostand(datos,"pa"),factor==niveles[i]),2,mean))
}
frecrel <- a[-1,]
#El valor indicativo de cada especie se calcula como el producto
de la abund relativa por la frecuencia relativa, y se expresa en porcentaje.
espindic <- abundrel*frecrel*100
espindic <- sort(apply(abundrel*frecrel*100,2,max),decreasing=T)
espindic
}
```

Función en R para aplicar un método de Monte Carlo para evaluar el grado de significación estadística del análisis de especies indicadoras.

```
espindicmc <- function(datos, factor, veces=1000){
#Calcula el valor indicador actual de cada especie
espindic_actual <- espindic(datos,factor)
espindic_num<-0
#Calcula el valor indicador reasignando al azar las unidades de muestreo
# al factor considerado
#Cada vez suma 1 al acumulador "espindic_num" en el caso de que
# el resultado al azar sea mayor que el valor indicador calculado.
for (i in 1:veces){
  espindic_alazar <- espindic(datos,sample(factor))
```

```

    espindic_num <- espindic_num + as.integer( _
      (espindic_alazar - espindic_actual)>=0)
  }
#Calcula la proporción de veces que el valor indicador para el conjunto
# de datos al azar fue mayor o igual que el calculado
# para el conjunto original.
espindic_prob <- espindic_num/veces
names(espindic_prob) <- names(espindic_actual)
espindic_prob
}

```

A.6 Test de χ^2 para evaluar las diferencias estadísticas entre histogramas de frecuencias

Las diferencias estadísticas entre histogramas de frecuencias se analizaron en el presente trabajo mediante un test de χ^2 . Se calculó un histograma de frecuencias esperado para cada tratamiento comparado (en este caso A_i y B_i), mediante las ecuaciones A.1 y A.2. El valor del estadístico se calculó con la ecuación A.3.

$$E_{A_i} = \frac{(A_i + B_i) \cdot \sum_{i=1}^n A_i}{\sum_{i=1}^n A_i + \sum_{i=1}^n B_i} \quad (\text{A.1})$$

$$E_{B_i} = \frac{(A_i + B_i) \cdot \sum_{i=1}^n B_i}{\sum_{i=1}^n A_i + \sum_{i=1}^n B_i} \quad (\text{A.2})$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(A_i - E_{Ai})^2}{E_{Ai}} + \sum_{i=1}^n \frac{(B_i - E_{Bi})^2}{E_{Bi}} \quad (\text{A.3})$$

El valor de probabilidad correspondiente al valor de χ^2 se calculó en R mediante `p <- 1-pchisq(X2,gdl)` donde `gdl` es el número de grados de libertad, calculado como el número de clases menos uno. Si el valor de $p < 0,05$ la diferencia entre dos histogramas de frecuencias fue considerada estadísticamente significativa.

Bibliografía

- [1] M. A. Altieri. *Agroecología: Bases científicas para una agricultura sustentable*. Editorial Nordan-Comunidad, 1999.
- [2] M. A. Altieri y C. I. Nicholls. *Agroecology and the Search for a Truly Sustainable Agriculture*. Number 9 in Basic Textbooks for Environmental Training. University of California, Berkeley, 1 edition, 2005.
- [3] A. Anderson, A. Mc Bratney, y E. Fitzpatrick. Soil mass, surface, and spectral fractal dimensions estimated from thin sections photographs. *Soil Science Society of America Journal*, 60:962–969, 1996.
- [4] A. Anderson, A. Mc Bratney, y J. Crawford. Application of fractals to soil studies. *Advances in Agronomy*, 63, 1998.
- [5] F. Bartoli, R. Philippy, M. Doirisse, S. Niquet, y M. Dubuit. Structure and self-similarity in silty and sandy soils: the fractal approach. *Journal of Soil Science*, 42:167–185, 1991.
- [6] F. Bastardie, Y. Capowiez, y D. Cluzeau. 3d characterisation of earthworm burrow systems in natural soil cores collected from a 12-year-old pasture. *Applied Soil Ecology*, 30:34–46, 2005.

-
- [7] Tunira Bhadauria y Krishan Gopal Saxena. Role of earthworms in soil fertility maintenance through the production of biogenic structures. *Applied and Environmental Soil Science*, 2010. doi: 10.1155/2010/816073.
- [8] N. R. A. Bird y M. A. Perrier. The pore–solid fractal model of soil density scaling. *European Journal of Soil Science*, 54:467–476, 2003.
- [9] R. Bisang. Estructura económica, innovación y estructura productiva: la aplicación de la biotecnología en la producción agrícola en la región pampeana argentina. *Desarrollo Económico*, 43:413–440., 2003.
- [10] J. M. Blair, P.J. Bohlen, y D. W. Freckman. Soil invertebrates as indicators of soil quality. En J. W. Doran y J. Jones, editors, *Methods for Assessing Soil Quality*, volume Special Publication 49, pages 273–291. Soil Science Society of America., Madison, Wisconsin, USA, 1996.
- [11] E. Blanchart, A. Albrecht, J. Alegre, A. Duboisset, C. Gilot, B. Pashanasi, P. Lavelle, y Brussaard L. Effects of earthworms on soil structure and physical properties. En Brussaard L. y Hendrix P. Lavelle P., editor, *Earthworm Management in Tropical Agroecosystems*. CAB International, 1999.
- [12] M. B. Bouché. Lumbriciens de France. Écologie et systématique. *INRA Publications*, 72 (2):1–671, 1972.
- [13] G. Brown, I. Barois, y P. Lavelle. Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic functional domains. *European Journal of Soil Biology*, 36(3): 177–198, 2000.
- [14] S. Buol, F. Hole, y R. Mc Cracken. *Génesis y clasificación de suelos*. Editorial Trillas, México., 2da edición, 1991.

- [15] A. Cabrera y A. Willink. *Biogeografía de América Latina*. Serie de Biología. Monografía No. 13. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico. Departamento de Asuntos Científicos. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos, Washington, 1973.
- [16] G. Cabrera y G. Crespo. Influence of the edaphic biota on soil fertility in grassland ecosystems. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 35(1):3–8, 2001.
- [17] M. A. Callahan y J. M. Blair. Influence of differing land management on the invasion of north american tallgrass prairie soils by european earthworms. *Pedobiologia*, 43:507–512, 1999.
- [18] R. R. Casas. Efectos de la intensificación agrícola sobre los suelos. *Ciencia Hoy*, 15(87):44–45, 2005.
- [19] K. Y. Chan. An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity – implications for functioning in soils. *Soil & Tillage Research*, 57(4):179–191, Jan 2001.
- [20] N. Clemente, A. López, A. Vincini, H. Castillo, D. Carmona, P. Manetti, y S. San Martino. Abundancia de megadrilos (*Annelida: Oligochaeta*) en diferentes sistemas de producción. *Ciencia del Suelo*, 21(2):35–43, 2003.
- [21] E. Craig. Trabajo final de aplicación. Technical report, Universidad Nacional de Luján, 1992.
- [22] J. W. Crawford y B. D. Sleeman. From particles to architecture: Fractals, aggregation and scaling in soil science. En P. M. Huang, Senesi N., y Buffle J., editors, *Structure and surface reactions of soil particles*. John Wiley & sons., 1998.

- [23] J.W Crawford, N. Matsui, y I. M. Young. The relation between the moisture-release curve and the structure of soil. *European Journal of Soil Science*, 46 (3):369–375, 1995.
- [24] T. Decaëns y J.J. Jiménez. Earthworm communities under an agricultural intensification gradient in colombia. *Plant and Soil*, 240:133–143, 2002.
- [25] T. Decaëns, N. Asakawa, J.H. Galvis, R.J. Thomas, y E. Amézquita. Surface activity or soil ecosystem engineers and soil structure in contrasted land use systems of colombia. *European Journal of Soil Biology*, 38:267–271, 2002.
- [26] T. Decaëns, J. H. Galvis, y E. Amézquita. Propiedades de las estructuras construidas por los ingenieros del ecosistema en la superficie del suelo de una sabana colombiana. En *El arado natural*, cap. 11, pages 171–197. CIAT, 2003.
- [27] A. R. Dexter. Advances in characterization of soil structure. *Soil & Tillage Research*, 11:199–238, 1988.
- [28] T. C. Dlamini y R. J. Haynes. Influence of agricultural land use on the size and composition of earthworm communities in northern KwaZulu-Natal, South Africa. *Applied Soil Ecology*, 27(1):77–88, 2004.
- [29] A. Duhour. Análisis de la estructura fractal del suelo por medio de imágenes en distintos sistemas de manejo. comparación con parámetros físicos y biológicos. Trabajo Final de Aplicación, Carrera de Ingeniería Agronómica. Universidad Nacional de Luján, 2001.
- [30] A. Duhour, M. C. Costa, F. Momo, y L. Falco. Estructura fractal del suelo bajo distintos sistemas de manejo. *Ciencia del Suelo*, 22:36–39, 2004.

- [31] A. Duhour, L. Falco, L. Sabatté, F. Momo, y L. Malacalza. Comunidad de lombrices y estructura fractal en relación con el uso del suelo. En *Conferencia Internacional Ecological Society of America*, Mérida, México, 2006.
- [32] A. Duhour, C. Costa, F. Momo, L. Falco, y L. Malacalza. Response of earthworm communities to soil disturbance: Fractal dimension of soil and species' rank-abundance curves. *Applied Soil Ecology*, 43:83–88, 2009.
- [33] C.A. Edwards y P. J. Bohlen. *Biology and Ecology of Earthworms*. Chapman and Hall, London, Third edition, 1996.
- [34] S. Fattorini. A simple method to fit geometric series and broken stick models in community ecology and island biogeography. *Acta Oecologica*, 28:199–205, 2005.
- [35] R. R. Filgueira, Y. A. Pachepsky, L. L. Fournier, G. O. Sarli, y A. Aragón. Comparison of fractal dimensions estimated from aggregate mass-size distribution and water retention scaling. *Soil Science*, 164:217–223, 1999.
- [36] R.R. Filgueira, L.L. Fournier, G.O. Sarli, A. Aragón, y W.J. Rawls. Sensitivity of fractal parameters of soil aggregates to different management practices in a phaeozem in central argentina. *Soil & Tillage Research*, 52:217–222, 1999.
- [37] Bland J. Finlay y Tom Fenchel. Protozoan community structure in a fractal soil environment. *Protist*, 152(3):203–218, Sep 2001.
- [38] R.G. Florence. *Ecology and Silviculture of Eucalypt Forest*. CSIRO, Australia, 1996.

- [39] G. S. Francis y P. M. Fraser. The effects of three earthworm species on soil macroporosity and hydraulic conductivity. *Applied Soil Ecology*, 10:11–19, 1998.
- [40] S. Frontier. Applications of fractal theory to ecology. En P. Legendre y L. Legendre, editors, *Developments in Numerical Ecology*, volume G14 of *ASI Series*, page 585. NATO, 1987.
- [41] N. Giarraca y M. Teubal, editors. *El campo argentino en la encrucijada: estrategias y resistencias sociales, ecos en la ciudad*. Alianza, Buenos Aires, 1 edition, 2005.
- [42] K.E. Giller, M.H. Beare, Lavelle P., A.-M.N. Izac, y M.J. Swift. Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function. *Applied Soil Ecology*, 6:3–16, 1997.
- [43] D. Giménez, R. R. Allmaras, E. A. Nater, y D. R. Huggins. Fractal dimensions for volume and surface of interaggregate pores - scale effects. *Geoderma*, 77:19–38, 1997.
- [44] D. Giménez, E. Perfect, W.J. Rawls, y Y. Pachepsky. Fractal models for predicting soil hydraulic properties: a review. *Engineering Geology*, 48(3): 161–183, 1997.
- [45] D. Giménez, R. R. Allmaras, D. R. Huggins, y E. A. Nater. Mass, surface, and fragmentation fractal dimensions of soil fragments produced by tillage. *Geoderma*, 86(3-4):261–278, Nov 1998.
- [46] S. C. Gupta, P. P. Sharma, y S. A. Defranchi. Compaction effects on soil structure. *Advances in Agronomy*, 42:311–338, 1989.

-
- [47] A. Hamblin. Sustainable agricultural systems: What are the appropriate measures for soil structure? *Australian Journal of Soil Research*, 29:709–715, 1991.
- [48] D. Harte. *Multifractals. Theory and applications*. Chapman & Hall/ CRC, Boca Raton, 2001.
- [49] S. Henin, R. Grass, y G. Monnier. *El perfil cultural*. Mundi-Prensa, Madrid, 1972.
- [50] Torsten Hothorn, Kurt Hornik, Mark A. van de Wiel, y Achim Zeileis. Implementing a class of permutation tests: The coin package. *Journal of Statistical Software*, 28(8):1–23, 2008. URL <http://www.jstatsoft.org/v28/i08/>.
- [51] S. H. Hurlbert. The nonconcept of species diversity: A critique and alternative parameters. *Ecology*, 52(4):577–586, 1971.
- [52] J. J. Ibáñez Martí, S. de Alba, y A. García Alvarez. Una disciplina en crisis: bases para un cambio de paradigma en edafología (el suelo, su clasificación e inventario). En *XVII Congreso Argentino de la Ciencia de Suelo. Mar del Plata*, 2000.
- [53] Danielle Jegou, Stefan Schrader, Heiko Diestel, y Daniel Cluzeau. Morphological, physical and biochemical characteristics of burrow walls formed by earthworms. *Applied Soil Ecology*, 17(2):165–174, Jun 2001.
- [54] C. G. Jones, J. H. Lawton, y M. Shachak. Organisms as ecosystem engineers. *Oikos*, 69:373–386, 1994.
- [55] D. Jégou, J. Brunotte, H. Rogasik, Y. Capowiez, H. Diestel, S. Schrader, y D. Cluzeau. Impact of soil compaction on earthworm burrow systems using

- x-ray computed tomography: preliminary study. *European Journal of Soil Biology*, 38(3-4):329–336., 2002.
- [56] Christian Kampichler. Fractal concepts in studies of soil fauna. En Y. Pachepsky, J. W. Crawford, y W. J. Rawls, editors, *Fractals in Soil Science*, volume 88, pages 283–300. Geoderma, Mar 1999.
- [57] A. Karperien. *FracLac Advanced User's Manual*. Charles Sturt University, Australia, 2005.
- [58] M. E. Konen, P. M. Jacobs, C. L. Burras, B. J. Talaga, y J. A. Mason. Equations for predicting soil organic carbon using loss-on-ignition for north central u.s. soils. *Soil Science Society of America Journal*, 66(6):1878–1881, 2002.
- [59] Rattan Lal. Soil structure and sustainability. *Journal of Sustainable Agriculture*, 1(4):67–92, 1991. URL http://www.informaworld.com/10.1300/J064v01n04_06.
- [60] M. Langmaak, S. Scharader, U. Rapp-Bernhardt, y K. Kotzke. Quantitative analysis of earthworm burrow systems with respect to biological soil-structure regeneration after soil compaction. *Biology & Fertility of Soils*, 28: 219–229, 1999.
- [61] P. Lavelle. Functional domains in soils. *Ecological Research*, 17:441–450, 2002.
- [62] K. E. Lee. *Earthworms. Their ecology and relationships with soil and land use*. Academic Press, 1985.

-
- [63] A. Magurran. *Diversidad ecológica y su medición*. Ediciones Vedrà, Barcelona, 1989.
- [64] B. B. Mandelbrot. *La geometría fractal de la naturaleza*. Tusquets Editores., Barcelona, 1era edición española de *The fractal geometry of nature*. 1982. W. H. Freeman. New York edition, 1997.
- [65] D. Manuel-Navarrete, G. Gallopín, M. Blanco, M. Díaz-Zorita, D. Ferraro, H. Herzer, P. Laterra, J. Morello, M. R. Murmis, W. Pengue, M. Piñeiro, G. Podestá, E. H. Satorre, M. Torrent, F. Torres, E. Viglizzo, M. G. Caputo, y A. Celis. *Análisis sistémico de la agriculturización en la pampa húmeda argentina y sus consecuencias en regiones extra-pampeanas: sostenibilidad, brechas de conocimiento e integración de políticas*. Number 118 in Serie Medio Ambiente y Desarrollo. CEPAL - Naciones Unidas, 2005.
- [66] D. Manuel-Navarrete, G. Gallopín, M. Blanco, M. Díaz-Zorita, D. Ferraro, H. Herzer, P. Laterra, M. Murmis, G. Podestá, J. Rabinovich, E. Satorre, F. Torres, y E. Viglizzo. Multi-causal and integrated assessment of sustainability: the case of agriculturization in the argentine pampas. *Environment, Development and Sustainability*, 11(3):621–638, June 2009.
- [67] R. Margalef. *Teoría de los sistemas ecológicos*. Universidad de Barcelona, Barcelona, 1991.
- [68] T. J. Marshall y J. W. Holmes. *Soil physics*. Cambridge University Press, 2da edition, 1988.
- [69] R. M. May. Patterns of species abundance and diversity. En M.L. Diamond y Cody J.M., editors, *Ecology and evolution of communities*, pages 81–120. Harvard University Press, Cambridge, MA, 1975.

-
- [70] Bruce McCune y James Grace. *Analysis of Ecological Communities*. MjM Software Design, 2002.
- [71] P.M. Mele y M. R. Carter. Impact of crop management factors in conservation tillage farming on earthworm density, age structure and species abundance in south-eastern Australia. *Soil & Tillage Research*, 50:1–10, 1999.
- [72] R. O. Michelena, C.B. Irurtia, A. Pittaluga, F. Vavruska, y M.E.B. Sardi. Degradación de los suelos en el sector norte de la pampa ondulada. *Ciencia del Suelo*, 6:60–66, 1988.
- [73] Catalina C. Mischis y Julio A. D. Herrera. Review of the distribution of exotic earthworms (annelida, oligochaeta) in argentina and confirmed examples of their introduction. *Caribbean Journal of Science*, 42(3):285–293, 2006.
- [74] F. Momo y L. Falco, editors. *Biología y ecología de la fauna del suelo*. Imago Mundi. UNGS, 2010.
- [75] F. Momo, C. M. Giovanetti, y L. Malacalza. Relación entre la abundancia de distintas especies de lombrices de tierra (annelida, oligochaeta) y algunos parámetros físico-químicos en un suelo típico de la estepa pampeana. *Ecología Austral*, 3:7–14, 1993.
- [76] J. Oksanen, R. Kindt, P. Legendre, B. O' Hara, G.L. Simpson, y M.H.H. Stevens. *vegan: Community Ecology Package. R package version 1.11-4*, 2008. URL <http://cran.r-project.org/>, <http://vegan.r-forge.r-project.org/>.
- [77] K. Oleschko. Delesse principle and statistical fractal sets: 2. unified fractal model for soil porosity. *Soil & Tillage Research*, 52:247–257, 1999.

- [78] K. Oleschko, C. Fuentes, F. Brambila, y R. Alvarez. Linear fractal analysis of three mexican soils in different management systems. *Soil Technology*, 10: 207–223, 1997.
- [79] J. A. Orellana y M. A. Pilatti. La estabilidad de agregados como indicador edáfico de sostenibilidad. *Ciencia del Suelo*, 12:75–80, 1994.
- [80] Y. Pachepsky, J. W. Crawford, y W. J. Rawls, editors. *Fractals in Soil Science*, volume 88. Geoderma, 1999.
- [81] C. E. Pankhurst, B. M. Doube, y V. V. S. R. Gupta, editors. *Biological Indicators of Soil Health*. CAB International, 1997.
- [82] Maurizio G. Paoletti. The role of earthworms for assessment of sustainability and as bioindicators. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 74(1-3):137–155, Jun 1999.
- [83] H. Peitgen, H. Jurgens, y D. Saupe. *Fractal for the classroom. Part I*. Springer-Verlag, 1992.
- [84] E. Perfect. Fractal models for the fragmentation of rocks and soils: a review. *Engineering Geology*, 48:185–198, 1997.
- [85] E. Perfect y R. L. Blevins. Fractal characterization of soil aggregation and fragmentation as influenced by tillage treatment. *Soil Science Society of America Journal*, 61(3):896–900, 1997.
- [86] M. A. Pilatti y J.A. Orellana. Instrucciones para tomar muestras de suelos. *Comunicaciones FAVE*, 2:10 pp, 1987.
- [87] M. A. Pilatti, J. A. Orellana, L. J. Priano, O. M. Felli, y D. A. Grenon. Incidencia de manejos tradicionales y conservacionistas sobre propiedades

- físicas, químicas y biológicas de un argiudol en el sur de santa fe. *Ciencia del Suelo*, 6:19–29, 1988.
- [88] J. Porta Casanellas, M. López-Acevedo Reguerín, y C. Roquero De Laburu. *Edafología: Para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi-Prensa, Madrid, 2 edition, 1999.
- [89] A. Posadas, D. Gimenez, R. Quiroz, y R. Protz. Multifractal characterization of soil pore systems. *Soil Science Society of America Journal*, 67:1361–1369, 2003.
- [90] R Development Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2008. URL <http://www.r-project.org>. ISBN 3-900051-07-0.
- [91] W.S. Rasband. ImageJ. U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, 1997-2008. URL <http://rsb.info.nih.gov/ij/>.
- [92] J. W. Reynolds. Earthworms of the world. *Global Biodiversity*, 4(1):11–16, 1995.
- [93] G Righi. Introducción al estudio de las lombrices del suelo (oligoquetos megadrilos) de la provincia de santa fe (argentina). *Colección Climax. Revista de la Asociación de Ciencias Naturales del Litoral*, 10:89–155, 1979.
- [94] S. S. Romañach y S. C. Le Comber. Measure of pocket gopher (*Thomomys bottae*) burrow geometry: correlates of fractal dimension. *Journal of the Zoological Society of London*, 262:399–403, 2004.
- [95] J. Römbke, S. Jänsch, y W. Didden. The use of earthworms in ecological

- soil classification and assessment concepts. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 62(2):249–265, 2005.
- [96] M. A. Sagardoy y M. E. Mandolesi. *Biología del suelo. Guía de estudio*. Editorial de la Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina, 2004.
- [97] F. K. Salako. Fractal scaling of soil particles in agricultural landscapes of nigerian savannas. *International Agrophysic*, 20:337–344, 2006.
- [98] J. E. Satchell. I. studies on methodical and taxonomical questions. *Pedobiologia*, 9:20–25, 1969.
- [99] C.O. Scoppa y J.R. Vargas Gil. Delimitación de subzonas geomorfológicas en un sector de la región pampeana y sus relaciones edafogenéticas. En *Actas de la V Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo*,, pages 424–435, 1969.
- [100] R. Sfeir y C. Costa. Mapa Básico de Suelos del Campo Experimental de la Universidad Nacional de Luján, 1989.
- [101] T. R. E. Southwood y P. A. Henderson. *Ecological methods*. Blackwell Science, Oxford, 2000.
- [102] M. Teubal. Soja transgénica y modelo agroalimentario argentino. *Realidad Económica*, 196:52–74, 2003.
- [103] M. Tokeshi. Niche apportionment or random assortment: Species abundance patterns revisited. *The Journal of Animal Ecology*, 59:1129–1146, 1990.
- [104] A.J. VandenBygaart, C.A. Fox, D.J. Fallow, y R. Protz. Estimating earthworm-influenced soil structure by morphometric image analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 64:982–988, 2000.

- [105] M. S. Vilche, C. Alzugaray, y S. Montico. Efecto de la labranza y duración de las praderas sobre la condición física de un suelo argiudol vértico de argentina. *Ciencia e Investigación Agrícola*, 29(3):159–169, 2002.
- [106] C. W. Watts, A. R. Dexter, E. Dumitru, y A. Canarache. Structural stability of two romanian soils as influenced for management practices. *Land Degradation and Development*, 7:217–238, 1996.
- [107] Wendorff y Brzezinska. Numbers, biomass and vertical distribution of earthworms of the pastures in regions of kraków and jaworki. *Acta Agraria et Silvestria*, XIX:209–216, 1980.
- [108] J.H. Zar. *Biostatistical Analysis*. Prentice Hall, New Jersey, 3rd edition, 1996.
- [109] A. Zicsi. Determination of number and size of sampling unit for estimating lumbricid populations of arable soils. En P. W. Murphy, editor, *Progress in Soil Zoology*, pages 68–71. Butterworths, London, 1958.

Índice alfabético

- Aporrectodea*, 68, 76
 caliginosa, 41, 42
 trapezoides, 77, 101, 103, 108, 120,
 121
- Bimastos*, 68
 parvus, 64, 77
- Microscolex*
 dubius, 41, 68
 phosphoreus, 41, 68
- Octolasion*
 cyaneum, 101, 120
- agriculturización, 1
- autosemejanza, 5
- degradación física, 1, 52, 57
- dimensión fractal, 23
 de masa, 22, 115
 de superficie, 22
- ecuación, 23
- método de *Box-counting*, 22
- estructura del suelo, 2, 33, 55, 57, 89, 98,
 113
- factor de forma de los poros, 24, 93, 113
- fractales
 definición, 5
- funciones de distribución
 abundancia relativa, 28
 bastón roto, 29
 serie geométrica, 29
- ImageJ, 21, 124
- impregnación
 técnica de, 20
- índices de diversidad
 equitatividad y redundancia, 27, 131
 Margalef, 28, 130
 rarefacción, 26, 130
 Shannon, 27
 Simpson, 28, 130
- ingenieros del ecosistema, 8, 54, 56, 90,

112

lombrices, 8

muestreo, 25

siembra directa, 1, 113

sustentabilidad, 3

FIN