



5º CONGRESO FORESTAL
ESPAÑOL

5º Congreso Forestal Español

Montes y sociedad: Saber qué hacer.

REF.: 5CFE01-031

Editores: S.E.C.F. - Junta de Castilla y León
Ávila, 21 a 25 de septiembre de 2009
ISBN: 978-84-936854-6-1
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Micrometeorología de localizaciones de ecotono pinar de silvestre-rebollar en los “Montes de Valsain” (Segovia).

GÓMEZ SANZ, V.¹ y RUBIO SÁNCHEZ, A.²

¹ Departamento de Silvopascicultura. E.U.I.T. Forestal. Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria s/n, 28040 – Madrid.

² Departamento de Silvopascicultura E.T.S. Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria s/n, 28040 – Madrid.

Resumen

El trabajo que se presenta aborda la descripción, a lo largo de un año hidrológico completo, del comportamiento micrometeorológico de variables de estado del sistema atmósfera-superficie terrestre en localizaciones forestales de ecotono entre masas de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) y rebollo (*Quercus pyrenaica* Willd.) en la Unidad de Gestión “Montes de Valsain (Segovia)”. Las localizaciones seleccionadas fueron cuatro, correspondiéndose con rodales puros de pino silvestre y de rebollo, rodal mixto con presencia equilibrada de ambas especies, y testigo con ausencia completa de vegetación de porte arbóreo. Los resultados obtenidos confirman el papel amortiguador de los doseles forestales arbóreos respecto a los valores extremos de variación de las variables de estado, especialmente los máximos, lo que deriva en un ambiente micrometeorológico más homogéneo y estable, aunque con un patente comportamiento estacional, en el que la mayor tasa de cambio se presenta al fin de la primavera-inicio del verano. Las cubiertas puras de pino silvestre o de rebollo son, en conjunto, más eficaces en la modificación micrometeorológica que las de ecotono. Bajo ellas, el comportamiento del estado energético e hídrico del sistema suelo contribuye a definir un ámbito ecológico especial que posibilita la convivencia, en competencia no excluyente, del pino y del rebollo. Valorada conjuntamente, la respuesta meteorológica observada a pequeña escala tiene trascendencia tanto en el comportamiento ecofisiológico de las distintas tipologías de cubierta forestal monitorizadas, como en las características edafológicas derivadas de la actividad microbiana.

Palabras clave: microclima forestal, *Pinus sylvestris*, *Quercus pyrenaica*, temperatura del suelo, humedad edáfica.

1. Introducción

A escalas temporales y espaciales reducidas, la presencia de una cubierta vegetal determina de forma trascendente, con su composición y organización en el espacio, el balance energético local en la interfase atmósfera-superficie terrestre. El resultado es, que tanto el suelo como el aire próximo a él, adquieren unas especiales condiciones de estado y comportamiento que se muestran claramente discordantes con aquéllas que se presentan en localizaciones carentes de cubierta vegetal efectiva. Este “ecoclima”, (GANDULLO 1994), viene caracterizado por las modificaciones que sufren las variables de estado del sistema aire-suelo (luz, temperatura del aire y del suelo, velocidad del viento, humedad atmosférica, humedad edáfica, etc.) respecto a las condiciones climáticas generales o a las observadas en otros sistemas vecinos.

El conocimiento detallado y preciso de estas modificaciones ha sido objetivo recurrente, dado el trascendente papel ecológico que juegan dentro de la estructura y función de los

sistemas forestales, resultando ineludibles para comprender y predecir procesos tales como la fotosíntesis, la regeneración, el crecimiento, el ciclo de nutrientes y la degradación de la materia orgánica (CHEN *et al.*, 1993; KIMMINS, 1997; BARNES *et al.*, 1998).

A nivel poblacional, la instalación y viabilidad ecológica de las especies vegetales en los límites ecológicos de su distribución natural está controlada principalmente por factores abióticos (SILVERTOWN & LOVETT-DOUST, 1993; BENNETT, 1995). Aunque los distintos mecanismos implicados en la regeneración natural son especialmente dispares y complejos, estando todavía escasamente comprendidos (GRAY & SPIES, 1996), sí se sabe que las tasas de regeneración están reguladas por múltiples factores, entre los que se hallan las condiciones micrometeorológicas que presenta la localización para la germinación de la semilla y para el desarrollo inicial de las plántulas (BAILEY & COVINGTON, 2002).

Los esfuerzos de caracterización de ambientes microclimáticos han sido muchos en las últimas décadas, adoleciendo frecuentemente de una falta de continuidad temporal en la captura de datos; aunque se han hecho buenas descripciones y adecuadas medidas del microclima forestal en su variación estacional, los estudios de más de un año de duración, que posibiliten el análisis de su variabilidad interanual, son particularmente escasos. Así mismo, se han centrado en la comparación de comportamientos micrometeorológicos bajo distintas formaciones vegetales (dominantemente puras en su composición, y de ámbito tropical y boreal), o en la evaluación de diferencias micrometeorológicas entre el interior de cubiertas forestales y el exterior de las mismas, siendo reseñables los trabajos de CARLSON & GROOT (1997), MORECROFT *et al.* (1998), TANIGUCHI *et al.* (1998) y GOMEZ (2002). En este contexto, resultan particularmente escasos los datos en el entorno mediterráneo y con formaciones mixtas de coníferas y frondosas (CONSTANTIN *et al.*, 1998). Estas últimas localizaciones son especialmente interesantes desde un punto de vista ecológico, dado que suponen habitualmente espacios transicionales que, debido al inherente efecto borde de su condición de ecotonía, albergan un extraordinario elenco de diversidad biológica.

Esta situación de rica ecotonía se presenta en ciertas cotas del Sistema Central, donde entran en contacto competitivo el pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) y el roble melojo o rebollo (*Quercus pyrenaica* Willd.), e incluso con la encina (*Q. ilex* L. subsp. *ballota* (Desf.) Samp.). Existe cierta controversia científica sobre si los espacios sub-basales de la cliserie altitudinal, actualmente ocupados por el pinar, son resultado de procesos naturales o se debe ésta a la acción transformadora humana, aduciendo una potencialidad natural del territorio más adecuada para las fagáceas. Sean cuales fueren las causas de la actual distribución espacial de ambas especies, estas áreas de contacto conífera-fagácea están mostrando un extraordinario interés por la riqueza en táxones botánicos ligados a la existencia de una estructura forestal (GAVILAN *et al.*, 2002) y porque, ante el cambio global, están siendo consideradas como regiones de depósito para la diversidad genética y de especial interés para su conservación (FISCHLIN *et al.*, 2007).

2. Objetivos

La evaluación e interpretación de las condiciones micrometeorológicas de una localización con cubierta forestal no resulta tarea especialmente sencilla. La ausencia de uniformidad, atributo inherente a los doseles vegetales, causa un elevado rango de distribución espacial de pequeñas áreas fuente y sumidero de energía, que combinadas con la turbulencia intermitente del aire, provocan una fuerte variabilidad espacial (BALDOCCHI *et al.*, 2000). Esta circunstancia hace que el transporte tridimensional de energía y materia bajo

cubierta, que está en la génesis de las modificaciones micrometeorológicas, sea principalmente un proceso estocástico y, consecuentemente, casi imposible de cuantificar con cierta precisión (ARYA, 2001), por lo que la aproximación empírica para evaluar y predecir patrones microclimáticos ha sido la mejor opción posible (CHEN & FRANKLIN, 1997), estando basada en mediciones simples de las condiciones locales del tiempo atmosférico.

Aceptando esta premisa básica, el estudio que aquí se muestra fundamenta sus objetivos en la siguiente hipótesis de partida: el microclima está recíprocamente relacionado con las características de la cubierta forestal, por lo que el comportamiento de éste puede ser caracterizado en base a las condiciones particulares de la localización. De esta forma, los objetivos a alcanzar han sido: a) la monitorización del comportamiento micrometeorológico de localizaciones forestales de ecotono entre masas de pino silvestre y rebollo a lo largo de un año completo; b) la identificación y caracterización de las diferencias en el ámbito micrometeorológico entre estas localizaciones de ecotono y otras, tanto con cubierta forestal pura, como con ausencia de la misma; c) valoración de la trascendencia ecológica de los resultados obtenidos en la dinámica competitiva de ambas formaciones vegetales.

3. Metodología

El ámbito territorial seleccionado para este trabajo ha sido la unidad de gestión forestal conocida como “Montes de Valsain”, ubicada en la vertiente septentrional del sector central de la Sierra de Guadarrama, en la provincia de Segovia (figura 1). Este territorio responde a una situación claramente transicional entre dos dominios climáticos netamente diferenciados: el centroeuropeo occidental, propio de la vertiente norte peninsular, o Iberia Verde, y que se corresponde con los macrotipos de Walter VIII –bosques aciculifolios boreales- y VI -bosques planucaducifolios nemorales-, y el dominio mediterráneo, característico del sur de la Península o Iberia Parda y del macrotipo IV -bosques esclerófilos y “estepas”- (ALLUÉ, 1990). Consecuentemente, los pisos bioclimáticos más representados se corresponden con los pisos oromediterráneo y supramediterráneo subhúmedos, ocupados por pinares de pino albar que se extienden por las laderas serranas, y con el piso supramediterráneo húmedo en el piedemonte inferior, donde las mejores condiciones hídricas del interior del valle del Eresma propician la presencia del bosque caducifolio dominado por rebollo.

Es precisamente en las zonas de contacto entre ambas formaciones vegetales donde se identifican claras situaciones de ecotonía, y en las que ha sido establecido el correspondiente diseño experimental, basado en la tipología de cubiertas vegetales presentes en el entorno. Las cuatro localizaciones de seguimiento elegidas responden a las características siguientes:

- 1) Ecotono. Rodal con cubierta mixta de pino silvestre y rebollo, en una proporción equilibrada. El pino silvestre está en estado de fustal viejo, con espesura semicompleta ($N = 100 - 150$ pies/ha), mientras que el rebollar es un monte bravo claro, que ocupa el piso intermedio de la cubierta. El suelo está cubierto por un tapiz discontinuo y relativamente denso de herbáceas anuales.
- 2) Pinar. Rodal puro de pino silvestre, natural, en estado de fustal viejo y con espesura completa ($N > 250$ pies/ha). El tapiz herbáceo es escaso, y domina sobre el suelo un manto bastante uniforme de materia orgánica fresca (acículas) en vías de descomposición.
- 3) Rebollar. Rodal puro de rebollo, en monte bajo, resalveado, en estado de latizal alto y espesura defectiva ($N > 500$ pies/ha). El suelo está prácticamente cubierto por un tapiz de herbáceas encespedantes.
- 4) Testigo. Localización con carencia total de vegetación arbórea y arbustiva. Los pies arbóreos más próximos se localizan a una distancia superior a 3 veces su altura media. El



suelo presenta una cubierta continua y muy densa de herbáceas anuales con un alto grado de encespedamiento.

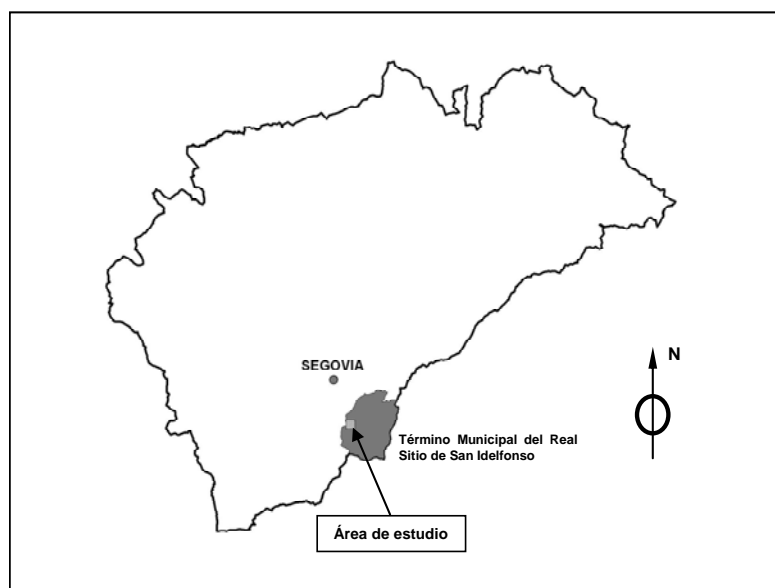


Figura 1. Localización general del área de estudio.

El contexto mesoclimático de todas las localizaciones es similar, con características de mediterraneidad (más de un mes de aridez, según el criterio de Gaussen), nemoralidad (precipitación media anual de unos 1000 mm) y continentalidad (marcada oscilación térmica media anual, superior a 25,0° C, y máximos de precipitación en otoño y primavera). El período frío está bien definido, con casi 6 meses de duración (de noviembre a abril), de los cuales cuatro son de helada segura (de diciembre a marzo) y el resto de helada probable. Todo ello conforma un ámbito fitoclimático Nemoromediterráneo Genuino -subtipo VI(IV)₂ – (ALLUE, 1990), muy próximo al Orobolealoide Subnemoral –subtipo VIII(VI).

En cada una de las localizaciones de seguimiento, se seleccionó un punto de características medias y en él se procedió a la instalación de los equipos meteorológicos. La unidad básica de registro (UBR) estaba integrada por los componentes siguientes: registrador HOBO® U12-006 de cuatro canales externos, barra Quantum-Fijo para luz PAR –Radiación Fotosintéticamente Activa- (400-700 nm y 3-5 sensores fijos), sensor de humedad de suelo ECHO (10 cm), dos sensores de Temperatura del suelo (-40° C a 100° C) y caja de intemperie de PVC con cuatro pasamuros. Para la instalación de cada UBR se procedió a la apertura de una pequeña calicata, de unos 20 cm profundidad. En una de las paredes de la misma se insertó el sensor de humedad en posición vertical, para no entorpecer el drenaje, en los 10 cm más superficiales del suelo, con la salida de cables por la parte más profunda. Los sensores de temperatura se ubicaron en superficie y a una profundidad de 10 cm, mientras que la barra con sensores de luz se dejó en superficie, nivelada y anclada con un par de piquetas. La caja de intemperie que acoge el registrador quedó enterrada próxima a la superficie y en posición vertical, para facilitar su apertura y la descarga periódica de los datos.

Las variables micrometeorológicas registradas fueron, consecuentemente, Temperatura del Suelo en superficie (T₀) y a 10 cm (T₁₀), Luminosidad (L) y Humedad Edáfica (HE). Las dos primeras se evaluaron en °C, mientras que las dos últimas fueron registradas en Voltios. Para convertirlas respectivamente en $\mu\text{moles}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ de PAR y m^3/m^3 , se siguieron las especificaciones de los fabricantes de los equipos.

El proceso de medición se desarrolló a lo largo de un año hidrológico completo, desde el 1/10 de 2006 al 30/09/07, con registro horario de observaciones. Los equipos fueron instalados un mes antes al inicio del período de observación para asegurar su perfecto funcionamiento. Los datos registrados en cada una de las UBR fueron descargados de forma periódica (4 veces en un año), comprobando su estado general de funcionamiento. Una vez depuradas aquellas observaciones derivadas de un mal funcionamiento de los equipos, se procedió a su manejo y tratamiento estadístico.

Genéricamente, el problema planteado se incluye dentro de los estudios de semejanza ecológica (LEGRENDE & LEGRENDE, 1998), donde la matriz de datos ecológicos que resulta de la recogida sistemática de observaciones cuantitativas (variables micrometeorológicas) ha sido analizada con el objeto de determinar semejanzas-diferencias entre los distintos objetos de estudio (localizaciones). A partir de los registros horarios de las distintas variables, se identificaron los valores máximos y mínimos diarios para las variables de Temperatura del Suelo, junto a su hora de aparición. Para la variable Luminosidad se seleccionó únicamente el valor más alto, también con su hora de aparición, mientras que para la Humedad Edáfica se extrajeron los valores diarios registrados en el momento en el que la Temperatura del Suelo en superficie era máxima. Toda esta información fue compilada en un archivo que incluía, para cada localización, como filas, los 365 días del período de observación, y como columnas, el conjunto de variables micrometeorológicas que aparecen descritas en la tabla nº 1.

Tabla nº 1. Variables micrometeorológicas de estudio (variables base).

Etiqueta	Unidades	Descripción de la variable
T0MAX	° C	Temperatura del suelo máxima diaria en superficie (0 cm).
T0MIN	° C	Temperatura del suelo mínima diaria en superficie (0 cm).
T10MAX	° C	Temperatura del suelo máxima diaria a 10 cm de profundidad.
T10MIN	° C	Temperatura del suelo mínima diaria a 10 cm de profundidad.
LMAX	$\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$	Luminosidad diaria máxima.
HE	m^3/m^3	Humedad Edáfica diaria para el momento de máxima temperatura en superficie.

Toda esta información fue posteriormente integrada para conseguir llevar a cabo una caracterización mensual de las distintas variables meteorológicas en las localizaciones de seguimiento. Para ello, se construyó una nueva matriz de datos, que incluía para cada mes (filas), las siguientes variables (columnas): Temperatura Media mensual de las Máximas, en °C, en superficie (TMM0) y a 10 cm de profundidad (TMM10); Temperatura Media mensual de las mínimas, en °C, en superficie (TMm0) y a 10 cm de profundidad (TMm10); Luminosidad Media mensual de las Máximas, en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ (LMM); Humedad Edáfica Media mensual de las Máximas, m^3/m^3 (HEMM).

Finalmente, y con el objeto de identificar y cuantificar el efecto modificador de la presencia de los distintos tipos de dosel forestal, se procedió a construir nuevas variables, denominadas Modificación Absoluta (MA), por diferencia entre los valores temporalmente análogos de las variables observadas en el Ecotono y el resto de localizaciones monitorizadas –testigo, pinar y rebollar–.

4. Resultados

La información micrometeorológica inicialmente capturada se consideró suficiente y ajustada a los objetivos establecidos. La URB instalada en el Rebollar presentó problemas de

estanqueidad que afectaron a su normal funcionamiento, por lo que el número de observaciones para esta localización es inferior a las otras. Así mismo, la sonda de temperatura instalada a 10 cm de suelo en Pinar funcionó erróneamente durante unas semanas, por lo que sus datos han sido depurados. Las URB instaladas en el Testigo y en el Ecotono registraron datos sin incidencias a lo largo de todo el periodo de observación.

La tabla nº 2 recoge los estadísticos descriptivos de las variables base. La exploración univariable previa de éstas permitió asumir con ciertas garantías el requisito paramétrico de Normalidad en sus respectivas distribuciones.

Tabla nº 2. Estadísticos descriptivos de las variables base (valores diarios).

Variable	Localización	N	Máximo	Mínimo	Media	Desviación Típica	Sesgo	Curtosis
T0MAX (° C)	Testigo	365	44,97	0,08	19,34	11,048	0,270	-0,780
	Ecotono	365	38,09	0,63	17,20	9,941	0,169	-1,084
	Pinar	321	33,94	0,99	14,88	7,919	0,331	-0,689
	Rebollar	208	35,37	0,30	17,61	7,122	0,118	-0,426
T0MIN (° C)	Testigo	365	19,91	-0,82	7,62	5,263	0,081	-1,336
	Ecotono	365	18,27	-0,09	7,75	4,971	0,084	-1,336
	Pinar	321	19,34	0,50	8,29	4,604	0,068	-1,111
	Rebollar	208	19,58	-0,09	10,09	4,896	-0,502	-0,601
T10MAX (° C)	Testigo	365	28,82	0,99	14,13	7,432	0,053	-1,186
	Ecotono	363	22,13	1,83	11,71	5,617	-0,020	-1,280
	Pinar	139	18,87	9,66	14,90	2,190	-0,675	-0,189
	Rebollar	208	27,65	1,67	14,75	5,813	-0,326	-0,676
T10MIN (° C)	Testigo	365	21,77	0,93	10,05	5,720	0,030	-1,388
	Ecotono	364	19,20	1,67	9,57	4,939	0,005	-1,394
	Pinar	139	17,96	8,67	13,73	2,076	-0,670	-0,188
	Rebollar	208	20,67	0,99	11,30	4,793	-0,518	-0,567
LMAX ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$)	Testigo	357	2750	30	998,4	591,38	0,454	-0,658
	Ecotono	357	2075	10	584,0	493,59	0,875	-0,130
	Pinar	357	2510	10	699,0	730,86	1,274	-0,363
	Rebollar	207	800	10	167,9	146,20	1,633	2,755
HE (m^3/m^3)	Testigo	365	0,363	0,056	0,219	0,094	-0,459	-1,335
	Ecotono	365	0,211	0,036	0,110	0,040	-0,488	-0,723
	Pinar	365	0,142	0,019	0,060	0,030	0,432	-0,841
	Rebollar	208	0,346	0,068	0,260	0,087	-0,378	-1,431

Tomando como localización de comparación la Testigo (sin cubierta forestal arbórea), puede observarse que los valores extremos de temperatura, a las dos profundidades estudiadas, son notoriamente más reducidos en las localizaciones con cubierta arbórea. En superficie, el rango de variación en el Testigo es mayor de 45° C, con el valor absoluto máximo más alto y el valor absoluto mínimo más bajo e inferior a 0° C. Para el Ecotono, el rango de variación ya es sensiblemente inferior, en torno a 38° C, pero supera al observado bajo Rebollar (unos 35° C) y Pinar (ligeramente superior a 33° C). Similar patrón de comportamiento muestra la temperatura a 10 cm, pero con los valores claramente más amortiguados, aunque siguen siendo apreciables las diferencias entre localizaciones.

Para la variable Luminosidad, los valores máximos se corresponden con el Testigo, seguido bastante de cerca por el Pinar y el Ecotono. La diferencia con los valores del Rebollar es muy marcada (más de 1200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$), quizás debida a que no recoge por completo el periodo de observación. Los mayores rangos de variación aparecen para el Testigo y el Pinar, mientras que el Ecotono muestra también un importante rango, pero netamente inferior.

Las localizaciones más húmedas parecen corresponder con el Testigo y el Rebollar, en los que la tasa de humedad máxima está en torno al 35 %, mientras que la más seca es la de Pinar, que no supera una tasa del 15 %. En una situación claramente intermedia se ubica la localización de Ecotono, con valores ligeramente superiores al 20 %.

La figura nº 2 muestra el comportamiento anual de los valores mensuales de las variables base. En ella puede corroborarse el efecto reductor de los doseles forestales para el rango de variación de las variables de Temperatura del Suelo, a 0 cm y a 10 cm. Así mismo, puede observarse el efecto amortiguador del suelo con la profundidad respecto de los valores extremos, dando como resultado un comportamiento térmico de sensiblemente menor amplitud a 10 cm que en superficie. Se detecta también un claro comportamiento estacional, con los valores medios mensuales más bajos en Diciembre-Enero, mientras que los más altos aparecen en Julio-Agosto.

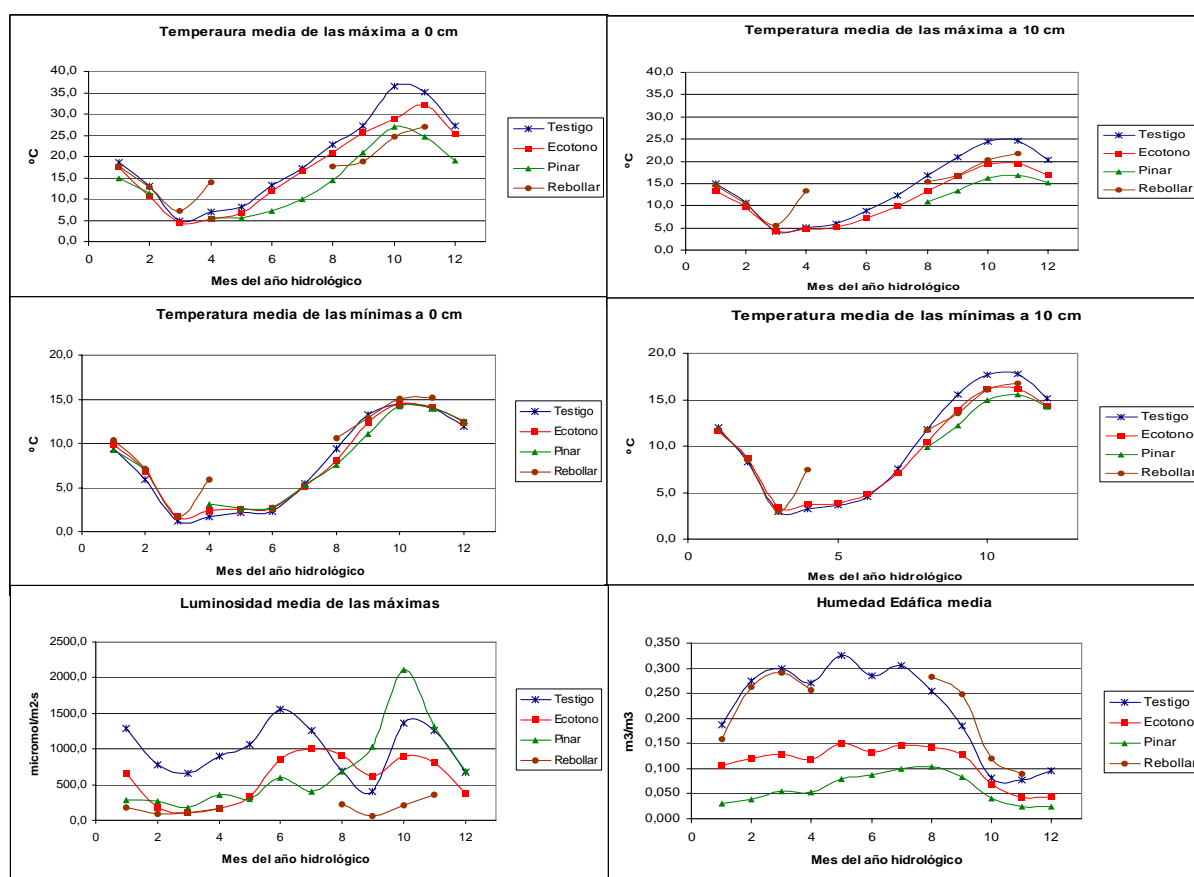


Figura nº 2. Evolución anual de los valores medios mensuales de las variables base.

Entre localizaciones, el comportamiento es bastante similar en los meses de otoño-invierno, siendo a partir de la primavera cuando las diferencias empiezan a ser mayores, permaneciendo así a lo largo del verano. La variable TMM0 se revela como la más discriminante entre localizaciones. El Testigo es el que muestra los valores más elevados, mientras que es el Pinar (junto al Rebollar cuando hay datos) el que aparece con los valores más bajos. El Ecotono sigue un comportamiento muy próximo al Testigo, pero con valores siempre ligeramente más reducidos.

Para la variable LMM, los valores más altos son siempre los registrados en el Testigo para el período Octubre-Abril. En este tramo del año, el resto de localizaciones muestran un ambiente lumínico medio más o menos similar, y es, a partir de la primavera, cuando el Ecotono se acerca bastante al comportamiento del Testigo. Llama la atención que en los meses de verano, los mayores valores de Luminosidad media se registran bajo Pinar.

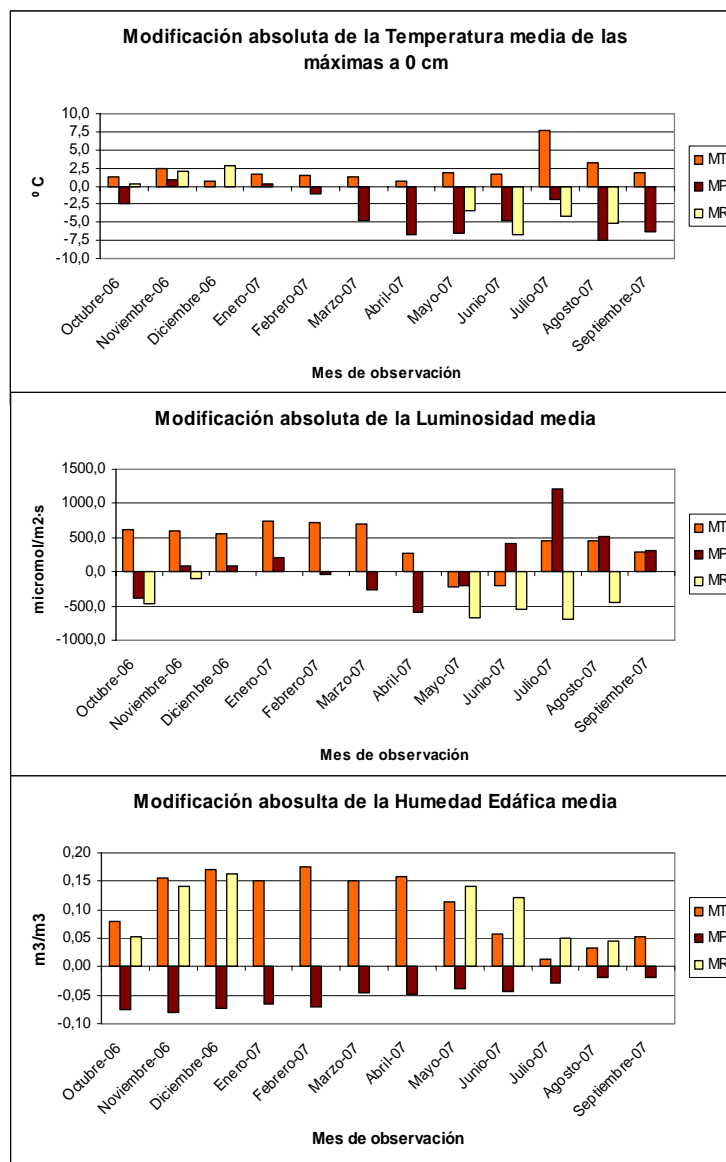


Figura nº 3. Evolución anual de los valores medios mensuales de la Modificación Absoluta de las variables base (MT: Modificación Absoluta Testigo-Ecotono; MP: Modificación Absoluta Pinar-Ecotono; MR: Modificación Absoluta Rebollar-Ecotono).

Respecto a la evolución anual de las tasas de humedad, éstas presentan un marcado comportamiento estacional. El período húmedo se manifiesta en su plenitud a partir del mes de noviembre y se prolonga hasta el mes de mayo, revelándose claras diferencias entre localizaciones. Las más húmedas son el Testigo y el Rebollar (cuando hay datos), mientras que en el otro extremo, aparece el Pinar, que difícilmente supera el valor medio mensual de un 10 % de tasa. El Ecotono muestra una posición intermedia, si bien claramente más próximo a la situación de Pinar que al Testigo. A partir del mes de Julio, se presenta un marcado período seco, en el que las diferencias entre localizaciones se hacen mínimas, dominadas por una escasez manifiesta de humedad edáfica (inferior a 10 %).

Calculadas las variables Modificación Absoluta, por diferencia con los valores en la localización Ecotono, la evolución anual de tales variables viene reflejada en la figura nº 3. La variable Modificación Absoluta de la Temperatura media de las máximas en superficie (MATMM0) refleja en su variación anual comportamientos dispares del Ecotono respecto del Testigo, por un lado, y del Pinar y Rebollar, por otro. El Testigo siempre, en cualquier mes del año, tiene una TMM0 más elevada, permaneciendo la diferencia (modificación absoluta) en valores bastante constantes, salvo en los meses de verano, cuando ésta se acentúa. En cambio, las diferencias con el Pinar y el Rebollar siguen un patrón claramente estacional; a finales del otoño-inicio del invierno, la diferencia es positiva, o lo que es lo mismo, el suelo en superficie alcanza valores más altos de temperatura máxima en el Pinar y el Rebollar, mientras que para el resto del año, la tendencia se invierte, y es el Ecotono el que en superficie registra los valores más altos de temperaturas máximas.

Algo parecido ocurre con la variable Humedad Edáfica, que es además la que parece mostrarse como más explicativa de las diferencias entre el Ecotono y el resto de localizaciones. Las diferencias son positivas para cualquier mes si comparamos el Testigo y el Rebollar con el Ecotono, lo que indica un continuo estado hídrico superior en las dos primeras localizaciones. La situación cambia completamente respecto del Pinar, que se muestra siempre más seco que el Ecotono, aunque con diferencias absolutas menores que las observadas en las otras dos localizaciones de seguimiento. En los meses de verano, la caída general de las tasas de humedad en todas las localizaciones hace que las diferencias se acorten y su estado hídrico sea más próximo.

5. Discusión

El conjunto de resultados obtenidos permite identificar diferencias micrometeorológicas y, por extensión, microclimáticas, entre localizaciones que pueden tener trascendencia ecológica y, por consiguiente, ayudar a comprender la respuesta vegetal.

De todas las variables base, las que se han mostrado más discriminantes son Temperaturas máximas en superficie y Humedad Edáfica en el momento de alcanzarse la primera. Las Temperaturas mínimas en superficie, si bien han reflejado el efecto amortiguador de la presencia de doseles arbóreos, no han marcado diferencias significativas entre localizaciones, por lo que no discriminan entre ellas. La explicación a este hecho puede estar en lo que apuntan RAYNOR (1971) y BARNES *et al.* (1998): en los períodos de déficit energético más intenso, el espacio bajo cubierta queda enfriado por subsidencia del aire desde el dosel, que junto a la mayor estabilidad del aire, hace que las condiciones frías puedan ser potenciadas frente a las localizaciones carentes de vegetación.

Las Temperaturas máximas y mínimas a 10 cm de profundidad han mostrado un patrón de evolución similar a las registradas en superficie, pero con sus rangos de variación más reducidos, propiedad conocida de los sistemas edáficos, muy determinada por su conductividad térmica (MUSY & SOUTTER, 1991). Por último, la Luminosidad, que se esperaba pudiera marcar diferencias significativas, no ha cumplido tales expectativas, probablemente derivado del progresivo ensombreamiento que han recibido las sondas, en especial la del Testigo y el Ecotono, por el desarrollo de estructuras aéreas de las especies herbáceas más patentes a partir de la primavera.

La variable Temperatura Máxima del suelo en superficie sí que ha mostrado diferencias entre localizaciones en su patrón de comportamiento que pueden ser trascendentes desde un punto de vista ecológico. En sus valores absolutos a lo largo del año, la diferencia con el Testigo, que alcanzó prácticamente los 45° C de máxima, fue de casi 7° C con el Ecotono, 9,5° C con el Rebollar y 11° C con el Pinar. Si atendemos a los valores medios mensuales, este comportamiento entre localizaciones se mantiene, alcanzándose los valores absolutos de diferencia más altos en los meses de verano. Al actuar el suelo como la principal superficie absorbente de radiación en la interfase atmósfera-superficie terrestre, esta variable nos indica un estado energético más elevado en el Testigo, asociado a la ausencia de dosel arbóreo que limita la insolación directa del suelo. Las distintas condiciones de estructura y composición de la cubierta arbórea del resto de localizaciones, no sólo inciden sobre el grado del ensombreamiento del suelo, sino también en los flujos de radiación difusa y de onda larga que entre ellos se desarrollan, llevando a identificar distintos comportamientos. El Pinar, con una cubierta muy homogénea temporalmente, es el que comparativamente presenta un menor estado energético a lo largo del año -las masas de pino silvestre son más efectivas en la modificación de esta variable que las de rebollar, dado el carácter perenne de sus doseles, lo cual permite una mayor uniformidad temporal en las condiciones de cubierta (GOMEZ, 2002)-, mientras que el Ecotono parece gozar de una mayor disponibilidad energética en superficie, similar al Rebollar, aunque la falta de datos en todo el período de observación, que impide poder apreciar el efecto de la pérdida y salida de hojas en su cubierta, hace considerar sus resultados con precaución.

La otra variable que se ha mostrado discriminante entre localizaciones es la Humedad Edáfica en el momento de máxima temperatura en superficie. Si bien las tasas de humedad se reducen en todas las localizaciones en los meses de verano (consecuencia asociada a las condiciones de aridez características del ámbito mediterráneo), haciendo que las diferencias entre ellas sean poco netas, sí son observables el resto del año tres patrones de comportamiento diferenciados. El Pinar se caracteriza por unas bajas tasas de humedad a lo largo del año (raramente superiores al 10 %), respuesta que puede estar relacionada con el tipo textural del suelo y su contenido en materia orgánica, así como con su posición fisiográfica, ladera convexa con buen drenaje lateral. En el otro extremo está el Testigo y el Rebollar, que se configuran como las localizaciones más húmedas, derivado de una mayor presencia de elementos finos y materia orgánica. Entre ambas situaciones aparece el Ecotono, aunque algo más próximo al Pinar en cuanto al comportamiento de su estado hídrico.

Puede decirse, a tenor de los resultados obtenidos, que el Ecotono exhibe un neto carácter transicional, entre el Pinar, con menor disponibilidad energética en superficie y un peor estado hídrico, el Rebollar, más húmedo y con un comportamiento energético similar, y el Testigo, donde la principal característica es un estado energético más contrastado. El Ecotono responde, por tanto, a una situación micrometeorológica caracterizada por una suavización de los extremos en los estados energético e hídrico, lo cual facilita el desarrollo en competencia (espesura) de pies de pino silvestre y de rebollo. El cambio, por ejemplo por un mal uso o gestión, inclinará la balanza hacia un lado, declarando un vencedor que excluirá al vencido (una merma trascendente en el estado hídrico, expulsaría al rebollo, mientras que una mayor presencia de agua en el suelo, potenciaría su presencia y eliminaría al pino).

6. Conclusiones

Las áreas de ecotono entre masas forestales de pino silvestre y de rebollo, en el ámbito natural de los Montes de Valsáin, muestran un comportamiento micrometeorológico singular

que explica su carácter de transición entre localizaciones con presencia de masas puras de carácter natural de ambas especies. Esta afirmación general se sustenta sobre las siguientes conclusiones: (1) Estas áreas muestran un amortiguamiento de los valores extremos de estado energético, asociado al ensombreamiento provocado por el dosel arbóreo que sustentan, si bien este se revela como menos efectivo que el de las masas puras de pino silvestre o de rebollo; (2) El periodo de temporal de mayor cambio micrometeorológico es el tránsito primavera-verano, momento trascendente desde un punto de vista ecofisiológico porque la vegetación, que ha salido del letargo invernal, se encuentra en condiciones de actividad vegetativa plena; (3) Ha quedado patente que bajo rodales de ecotono, el estado hídrico también se sitúa a caballo entre los ámbitos más áridos (pinar) y los más húmedos (rebollar y testigo), lo que induce a pensar en unas condiciones de disponibilidad hídrica que evitan la competencia excluyente entre ambas especies forestales; (4) El patrón de distribución espacial de los rodales mixtos y puros de pino silvestre y de rebollo en los territorios de contacto parece estar determinado por la conjunción de disponibilidad energética (temperaturas máximas en superficie) y del estado hídrico (tasas de humedad edáfica); en el campo de variación definido por ambos factores, el ecotono ocuparía las posiciones intermedias, mientras que las masas puras y las localizaciones sin cubierta arbórea efectiva se ubicarían en los extremos.

El conocimiento obtenido se considera especialmente interesante para entender la respuesta espacial asociada a la presencia de las dos especies que entran en contacto y el comportamiento ecofisiológico de sus correspondientes tipologías de cubierta, información muy útil para adaptar las técnicas selvícolas más adecuadas al manejo de estas masas situadas en los márgenes ecotonaes.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la plena disposición y facilidades dadas por los responsables de la Unidad de Gestión “Montes de Valsaín” (Segovia), perteneciente al Organismo Autónomo Parques Nacionales, entidad pública dependiente del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Así mismo, se incluye dentro de los Proyecto de I + D del Programa Nacional AGL2004-04941 y AGL2007-64707/FOR

8. Bibliografía

- ALLUÉ, J.L.; 1990. Atlas fotoclimático de España. Taxonomías. Col. Monografías INIA, 69. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 223 pp. Madrid.
- ARYA, S.P.; 2001. Introduction to Micrometeorology. Second Edition. International Geophysics Series. Volume 79. Academic Press. 420 pp. London.
- BAILEY, J.D.; COVINGTON, W.W.; 2002. Evaluating ponderosa pine regeneration rates following ecological restoration treatments in northern Arizona, USA. *Forest Ecol. Manag.* 155: 271-278.
- BALDOCCHI, D.D.; LAW, B.E.; ANTHONI, P.M.; 2000. On measuring and modeling energy fluxes above the floor of a homogeneous and heterogeneous conifer forest. *Agric. For. Meteorol.* 102, 187-206.
- BARNES, B.V.; ZAK, D.R.; DENTON, S.R.; SPURR, S.H.; 1998. Forest Ecology (4th Edition). John Wiley & Sons, Inc. 397 pp. New York.

- BENNETT, K.D.; 1995. Post-glacial dynamics of pine (*Pinus sylvestris* L.) and pinewoods in Scotland. In: ALDHOUS, J. R. (ed.) *Our Pinewood Heritage*, pp. 23–39. Bell and Bain, Glasgow.
- CARLSON, D.W.; GROOT, A.; 1997. Microclimate of clear-cut, forest interior, and small openings in trembling aspen forest. *Agric. For. Meteorol.* 87, 313-329.
- CHEN, J.; FRANKLIN, J.F.; 1997. Growing-season microclimate variability within an old-growth Douglas-fir forest. *Clim. Res.* 8, 21-34.
- CHEN, J.; FRANKLIN, J.F.; SPIES, T.A.; 1993. Contrasting microclimates among clearcut, edge, and interior of old-growth Douglas-fir forest. *Agric. For. Meteorol.* 63, 219-237.
- CONSTANTIN, J.; INCLAN, M.G.; RASCHENFORD, M.; 1998. The energy budget of a spruce forest: field measurements and comparison with the forest-land-atmosphere model (FLAME). *J. Hydrol.* 212-213, 22-35.
- GANDULLO, J.M.; 1994. *Climatología y Ciencias del Suelo*. Fundación Conde del Valle de Salazar. E.T.S.I. Montes. 404 pp. Madrid.
- GAVILÁN, R.G.; SÁNCHEZ-MATA, D.; ESCUDERO, A.; RUBIO, A.; 2002. Spatial structure and interspecific interactions in Mediterranean high mountain vegetation (Sistema Central, Spain). *Israel J. Plant Sci.* 50.
- GÓMEZ, V.; 2002. *Micrometeorología de masas forestales de pino silvestre (Pinus sylvestris L.) y rebollo (Quercus pyrenaica Willd.) en la vertiente norte del Sistema Central (Montes de Valsaín – Segovia)*. Consecuencias Selvícolas. Tesis Doctoral. U.P.M, Madrid.
- GRAY, A.N.; SPIES, T.A.; 1996. Gap size, within-gap position and canopy structure effects on conifer seedling establishment. *J. Ecol.* 84: 635-645.
- FISCHLIN, A.; MIDGLEY, G.F.; PRICE, J.T.; LEEMANS, R.; GOPAL, B.; TURLEY, C.; ROUNSEVELL, M.D.A.; DUBE, O.P.; TARAZONA, J.; VELICHKO, A.A.; 2007. Ecosystems, their properties, goods, and services. En: PARRY, M.L.; CANZIANI, O.F.; PALUTIKOF, J.P.; VAN DER LINDEN, P.J.; HANSON, C.E. (Eds). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, 211-272.
- KIMMINS, J.P.; 1997. *Forest Ecology*. Prentice-Hall. 596 pp. New Jersey.
- LEGENDRE, P.; LEGENDRE, L.; 1998. *Numerical Ecology*. Second English edition. Elsevier science B.V. 853 pp. Amsterdam.
- MORECROFT, M.D.; TAYLOR, M.E.; OLIVER, H.R.; 1998. Air and soil microclimates of deciduous woodland compared to an open site. *Agric. For. Meteorol.* 90, 141-156.
- MUSY, A.; SOUTTER, M.; 1991. *Physique du sol*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. 335 pp. Lausanne.
- RAYNOR, G.S.; 1971. Wind and Temperature Structure in a Coniferous Forest and a Contiguous Field. *For. Sci.* 17 (3), 351-363.
- SILVERTOWN, J.W.; LOVETT-DOUST, J.; 1993. *Introduction to plant population biology*. Blackwell Science Ltd., Oxford.
- TANIGUCHI, M.; WILLIAMSON, D.R.; PECK, A.J.; 1998. Estimations of surface temperature and subsurface heat flux following forest removal in the south-west of Western Australia. *Hydrol. Process.* 12, 2205-2216.

