

PATRONES INDUSTRIALES DE DIFUSIÓN Y ESTANDARIZACIÓN TECNOLÓGICA

JAVIER CARRILLO-HERMOSILLA

Instituto de Empresa.

La difusión tecnológica es el proceso mediante el cual las innovaciones, ya sean nuevos productos, nuevos procesos o nuevos métodos de gestión, se propagan dentro y a través de las economías (Stoneman, 1986). Aunque la evidencia acerca de la difusión tecnológica es inconclusa, existe un amplio consenso acerca de dos aspectos de este proceso: la

intensidad con la que el uso o la propiedad de una tecnología se propaga en una economía cambia con el tiempo (Mansfield, 1961 y 1968); la difusión de nuevas tecnologías sigue un patrón temporal predecible, cuya representación gráfica es una curva con forma de «S» (Griliches, 1957; Mansfield, 1961; Davies, 1979; Gort y Keppler, 1982).

Estos hechos probados han llevado a los investigadores de la difusión tecnológica a enfocar principalmente dos cuestiones, mutuamente relacionadas: en primer lugar, ¿por qué determinadas innovaciones se difunden más rápidamente que otras?; y en segundo lugar, ¿por qué determinadas empresas adoptan una determinada innovación más rápidamente que otras?. El foco se ha puesto por tanto en intentar explicar la tasa de adopción de las innovaciones y el orden en que dichas innovaciones son adoptadas.

Sin embargo, la literatura sobre la difusión tecnológica ha dedicado escasa atención a otra cuestión

igualmente interesante: ¿por qué, en particulares momentos, determinadas innovaciones se difunden totalmente y se convierten en estándares *de facto* o «diseños dominantes», mientras que otras innovaciones se difunden tan sólo parcialmente, o no se difunden en absoluto? (Abrahamson y Rosenkopf, 1997).

Por otro lado, como consecuencia de aquellas dos anteriores preguntas, la mayor parte de la investigación sobre los factores que influyen en el proceso de difusión tecnológica se ha concentrado en las características de las tecnologías (modelos epidémicos: Mansfield, 1961) como el riesgo, rentabilidad, complejidad, propiedad intelectual; y en las características de las empresas adoptantes (modelos *probit*: David, 1969), como su tamaño, antigüedad de su capital, expectativas sobre la rentabilidad de la tecnología, productividad de sus factores, costes de búsqueda, precios de sus *inputs*. Los escasos estudios de carácter sectorial, en su mayor parte empíricos, ante las dificultades para disponer de datos sectoriales utilizan habitualmente los promedios de

las características de las empresas pertenecientes al sector, de modo que finalmente se convierten de nuevo en un examen de cómo las características de las empresas afectan a la difusión (Blackman, 1999). Presentan además resultados poco concluyentes e incluso contradictorios.

Este trabajo pretende hacer una triple aportación teórica al estudio de la difusión tecnológica. En primer lugar, intenta realizar una aproximación novedosa al estudio de su dinámica, no desde la perspectiva tradicional de la tasa de difusión a la que una nueva tecnología es plenamente adoptada, sino desde la perspectiva de la *extensión* de la difusión de múltiples tecnologías, y del fenómeno relacionado de la estandarización. En segundo lugar, pretende mostrar una visión ampliada y evolutiva (1) del proceso de estandarización tecnológica, eludiendo el determinismo habitual de los modelos convencionales de difusión y bloqueo tecnológico. Por último, intenta identificar y valorar las relaciones existentes entre las principales características de las industrias y los atributos de los procesos de estandarización tecnológica en tales industrias (2).

Para alcanzar estos objetivos, se propone en este artículo un Modelo Basado en Agentes (*Agent Based Modeling*, ABM) (3), una de las disciplinas asociadas a la Inteligencia Artificial Distribuida (*Distributed Artificial Intelligence*, DAI), dentro de la metodología general de la Simulación Social.

El resto del artículo se estructura como sigue. En el segundo y tercer apartados se introducen los principales conceptos y trabajos sobre el proceso de difusión tecnológica bajo rendimientos crecientes de la adopción. En el cuarto apartado se presenta un modelo basado en agentes y se discute su calibración, verificación y validación. En el quinto se utiliza el modelo para caracterizar el proceso de difusión y estandarización tecnológica en función de los atributos de la industria en el que se produce. El artículo se cierra con un apartado dedicado a las conclusiones de la investigación.

DIFUSIÓN TECNOLÓGICA Y RENDIMIENTOS CRECIENTES DE LA ADOPCIÓN ↓

Para construir nuestra aproximación, ampliaremos el alcance de los llamados «modelos de cascadas de información» (Bannerjee, 1992; De Vany y Walls, 1996; Bikhchandani et al., 1992 y 1998). Hemos de observar que las nuevas tecnologías aparecen en el mercado en una determinada variedad de formas, que en el caso de ser vendidas directamente a las empresas son interpretables como innovaciones de proceso. Adoptar una tecnología supone en prime-

ra instancia elegir entre sus múltiples variantes. En la medida que algunos usuarios «tempranos» opten por experimentar con una variante frente a la tecnología establecida, y esta última se muestre inferior, se puede desarrollar un «efecto mayoría» (*bandwagon effect*) que lleve a posteriores adoptantes a tomar la misma decisión que los primeros, sin haber hecho la misma inversión en aprender por su propia experiencia. Las «cascadas de información» son definidas como situaciones en las que resulta óptimo para un individuo, habiendo observado las acciones de los que le preceden, seguir el comportamiento del individuo predecesor sin considerar su propia información. Un concepto cercano es el de *replicator dynamics* (Schuster y Sigmund, 1983), un patrón que se repite en numerosos fenómenos evolutivos. Los efectos de red y otros *rendimientos crecientes de la adopción* refuerzan este efecto.

Dentro de las teorías evolutivas del cambio tecnológico, en los últimos años un grupo creciente de autores ha centrado su atención en los efectos de los rendimientos crecientes de la adopción (*positive feedback*) sobre la dinámica de la difusión tecnológica, y en particular sobre el fenómeno de estandarización tecnológica que se suele derivar de aquéllos.

Una referencia destacada en esta literatura es Arthur (1989, 1990, 1994). Según Arthur, las partes de la economía basadas en los recursos físicos (agricultura, minería, etc.) están en su mayor parte sujetas a rendimientos decrecientes. Por el contrario, las partes de la economía que están basadas en el conocimiento (tecnología), están ampliamente sujetas a rendimientos crecientes. Requieren importantes inversiones iniciales en investigación, desarrollo, y herramientas, pero, una vez que las ventas comienzan, incrementar la producción es relativamente barato. A medida que se producen unidades adicionales, los costes unitarios continúan cayendo y los beneficios incrementándose.

Además, la experiencia en su producción es mayor y se alcanza un mayor conocimiento sobre cómo producir unidades adicionales de modo más barato (*learning-by-doing*) (Arrow, 1962). Se adquiere también mayor experiencia en el uso, y mejora la productividad del usuario (*learning-by-using*) (Sheshinsky, 1967). Surgen externalidades positivas porque las redes físicas e informacionales son más valiosas para los usuarios a medida que crece su tamaño (Katz y Shapiro, 1985 y 1986; Farrell y Saloner, 1986a y b; Economides, 1996). A medida que crece el número de adoptantes de una determinada tecnología, se reduce la incertidumbre y tanto los usuarios como los productores perciben un menor riesgo e incrementan su confianza sobre la calidad, desempeño y permanencia de dicha tecnología (Arthur, 1991).

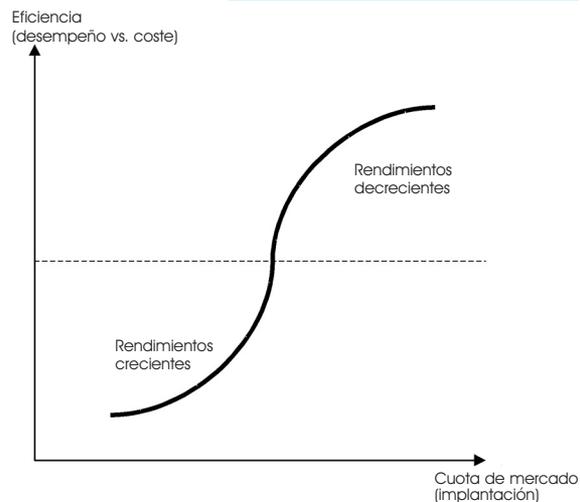
Al tiempo, el incremento en el número de usuarios reduce el coste de búsqueda de la información (Blackman, 1999). Así, a medida que una alternativa tecnológica gana cuota de mercado, los potenciales usuarios tienen un mayor incentivo a adoptar la misma alternativa, en la medida que son capaces de intercambiar información con aquellos que ya la están usando. Además, una tecnología que mejora más rápidamente o es adoptada por más agentes tiene mayores posibilidades de sobrevivir (*selectional advantage*).

En este sentido, es posible decir que «la competición consume su propio combustible» (Metcalf, 1994: 938), reduciendo la diversidad tecnológica. En términos de tecnologías alternativas, «[...] la tecnología no es escogida porque es eficiente, sino que se hace eficiente porque ha sido escogida» (Rip y Kemp, 1998: 353). De acuerdo con Foster (1986: 96), de nuevo una curva con forma de 'S' muestra con precisión cómo mejora el desempeño de una tecnología frente al esfuerzo empleado en su desarrollo. En la práctica, buena parte de este desarrollo es resultado de las economías del aprendizaje, que a su vez dependen del grado de implantación y la experiencia de los usuarios (Figura 1).

Los rendimientos no son constantes según crece la adopción de la tecnología. Esto se deriva en gran medida de los rendimientos crecientes que presentan determinadas tecnologías durante su fase de desarrollo y comercialización (difusión) y que pueden, circunstancialmente, acelerar sus mejoras respecto a alternativas competidoras. Tras un punto de inflexión, las posibles mejoras en el desempeño son progresivamente menores, alcanzándose un límite en el que se agotan a pesar de que sigan sumándose nuevos usuarios (Moreau, 1999: 9; Laffond et al., 1999; Loch y Huberman, 1999: 12). La economía convencional se centra en la parte superior –lo importante son los rendimientos en el equilibrio a largo plazo–. Bajo rendimientos crecientes de la adopción, la misma distribución de tecnologías y preferencias de los usuarios puede llevar a diferentes estructuras de resultados, dependiendo del modo en que las cosas empiecen (*first mover advantage*) (Economides, 1996: 26).

Sin embargo, una superioridad temprana no es garantía de una adecuación a largo plazo (David, 1989; Cowan, 1990; Nelson, 1994). Así, comprobamos cómo diseños aparentemente inferiores pueden quedar bloqueados en el sistema productivo en un proceso evolutivo-dependiente (*path dependent*), en el que eventos circunstanciales pueden determinar la alternativa ganadora (David, 1985, 1997). De este modo, una característica de los productos o sistemas sujetos a rendimientos crecientes

FIGURA 1
EVOLUCIÓN DEL DESEMPEÑO DE UNA TECNOLOGÍA FRENTE A SU IMPLANTACIÓN EN EL MERCADO



FUENTE:
Adaptado de Unruh, 2000

es que la evolución de los acontecimientos puede ser crítica. Mientras que otros mercados pueden ser explicados por la oferta y la demanda actuales, no es posible entender totalmente los mercados sujetos a feedbacks positivos sin conocer el patrón histórico de adopción tecnológica (Jaffe et al., 2000: 42; Economides, 1996: 26).

ESTANDARIZACIÓN Y BLOQUEO TECNOLÓGICO †

De acuerdo con Anderson y Tushman (1990), toda industria evoluciona siguiendo una sucesión de ciclos tecnológicos. Cada uno de esos ciclos comienza con una discontinuidad tecnológica, derivada de la aparición de una innovación destacada que supera en cierto orden de magnitud el «estado del arte» que caracteriza a tal industria. En términos de las curvas de Foster (1986), esta discontinuidad se podría representar como un «salto» entre dos curvas (Figura 2).

Los conceptos diseño dominante y estándar son con frecuencia utilizados indistintamente en la literatura (Afuah, 1998; Schilling, 1998), aunque la noción de diseño dominante es más amplia y en cierto modo contiene a la de estándar (Suárez y Utterback,

1995: 417). Por estándar se entiende el conjunto de especificaciones técnicas a las que se adhiere un productor, ya sea tácitamente o como resultado de un acuerdo formal (David, 1987). El proceso mediante el cual emerge un diseño dominante o estándar es a menudo considerado una «caja negra», en la que interactúan un amplio abanico de factores que resulta difícil identificar y medir (Lee et al., 1995; Suárez y Utterback, 1995). Ésta es precisamente una de las cuestiones a las que esta investigación pretende dar alguna respuesta.

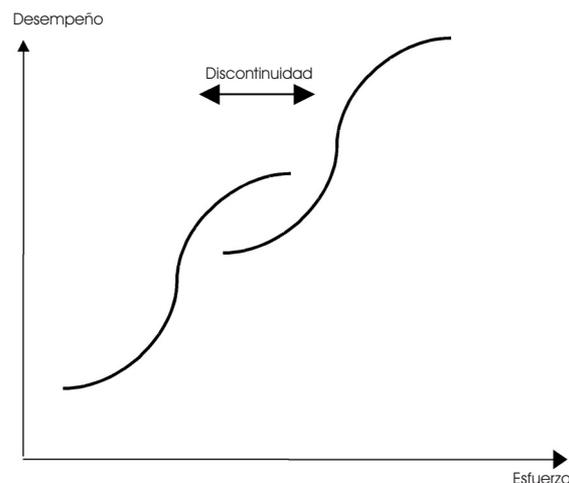
Es ampliamente aceptado que las tecnologías complejas a menudo muestran rendimientos crecientes de la adopción (Schilling, 1998: 269). En estas condiciones, el sistema posee una multiplicidad de «captosres» (*attractors*) estables o equilibrios que, expresados en términos de cuotas de mercado, pueden ser interpretados como estándares espontáneos, también denominados *de facto* o no esponsorizados (David y Greenstein, 1990). Típicamente, son situaciones en las que ningún agente tiene intereses de propietario en ninguno de los estándares relevantes y ninguna empresa es suficientemente grande para tener en cuenta el modo en que sus decisiones de precios y elección tecnológica pudieran influir en las acciones de otros vendedores o usuarios (*op. cit.*: 5). El estándar espontáneo, en definitiva, emerge como resultado de los procesos internos del mercado y no como resultado de una acción coordinada de sus participantes.

Sin embargo, una superioridad temprana no es garantía de una adecuación a largo plazo (David, 1989; Cowan, 1990; Nelson, 1994). Así, bajo rendimientos crecientes, diseños aparentemente inferiores podrían quedar indefinidamente bloqueados en el sistema productivo en un proceso histórico-dependiente, en el que eventos circunstanciales determinarían la alternativa ganadora (David, 1985, 1997). Queremos llamar la atención sobre el hecho de que el análisis de la difusión tecnológica contenido en la literatura sobre el fenómeno del *lock-in* tecnológico ha dedicado escasa atención a las cuestiones relacionadas con la existencia de alternativas anteriores o a las condiciones en las que las nuevas tecnologías son capaces de desplazar a las antiguas en una sucesión tecnológica (Windrum y Birchenhall, 2000). Además de Arthur (1989, 1990, 1994b), muchos otros autores han mostrado el proceso de selección tecnológica como una historia de «todo o nada» (Abrahamson y Rosenkopf, 1997).

Ésta es una carencia generalizada de los modelos de difusión y estandarización tecnológica que ha sido destacada repetidamente en diferentes trabajos de la última década (Schilling, 2002: 395; Jaffe et al., 2000: 41; Windrum y Birchenhall, 1998: 112;

FIGURA 2

DISCONTINUIDAD TECNOLÓGICA



FUENTE:
Adaptado de Foster, 1986

David, 1997: 36; Nelson, 1994; David y Greenstein, 1990: 8). Parece evidente que, frente a la visión determinista de los modelos convencionales de *lock-in* tecnológico, puede resultar interesante una visión formal del proceso de difusión y estandarización tecnológica ampliada, que tenga presente la posibilidad de una sucesión tecnológica (4), entendida como una secuencia de reemplazos de antiguas por nuevas alternativas que cumplen la misma función básica (Grübler, 1991).

EL MODELO ↓

Construido sobre la metodología de investigación ABM (5), en este apartado se presenta el modelo propuesto para la consecución de los objetivos y el contraste de las hipótesis de investigación, y se discute su calibración, verificación y validación.

Supuestos del modelo ↓

Consideramos un horizonte temporal indefinido de periodos en el que el tiempo evoluciona de modo discreto ($t \in N$) y la dinámica es asincrónica. Consideramos un único bien o servicio X , que puede ser producido utilizando múltiples tecnologías alternati-

vas T_j ($j=1, \dots, J_1, \dots, J$) cuyas características se definen más adelante. En cada período t se produce la libre entrada en la industria de uno o más nuevos productores individuales P_t ($i=1, \dots, I_1, \dots, I$) (6) de X en un proceso aleatorio tipo Poisson (7) con una tasa media de aparición de nuevos productores en un determinado período $\lambda_p > 0$, que por simplicidad suponemos constante a lo largo del tiempo. Así, la probabilidad de que surjan I_t nuevos productores en el período t vendrá determinada por la función de probabilidad [1] (Anexo 1).

Cada productor lleva asignado intrínsecamente un parámetro s_j de supervivencia (> 0), que por simplicidad suponemos constante a lo largo del tiempo y que en la simulación se distribuye de modo independiente y aleatorio entre los diferentes productores siguiendo una distribución normal $N(\bar{s}, \sigma_s)$. De este modo, en cada período también se produce la libre salida de los productores cuyo período de supervivencia se ha cumplido, permaneciendo el resto en el siguiente período como antiguos productores.

Suponemos que en cada período aparecen en el mercado una o más nuevas tecnologías alternativas T_j ($j=1, \dots, J_1, \dots, J$), de modo no anticipable por los agentes productores del bien X . Estas innovaciones de proceso son proporcionadas por múltiples proveedores tecnológicos (8), que actúan motivados por la búsqueda de una patente que les otorgue, al menos temporalmente, cierto poder monopolístico (9). Supondremos que tales tecnologías surgen siguiendo un proceso aleatorio tipo Poisson (10), con $\lambda_t > 0$ constante a lo largo del tiempo¹¹ (ver expresión [2] Anexo 1).

Se asume que toda tecnología que no haya sido adoptada en algún período por al menos $P_T (> 0)$ productores —de acuerdo con los mecanismos que se describen más adelante— transcurridos $t_T (> 0)$ períodos, se considera «rechazada» por el sistema productivo, no encontrándose disponible a partir de ese momento (12). Suponemos además que cada tecnología puede ser caracterizada de acuerdo con un conjunto de criterios C_k^j o características que permiten medir su desempeño (*performance*) (13) desde K diferentes dimensiones. Siguiendo a Rogers (1995) (14), se propone la siguiente caracterización tecnológica, aunque el número de criterios y su definición no afectan a los resultados principales de este modelo, siendo la multi-dimensionalidad de la valoración el único supuesto realmente relevante (15):

C_{Ak} : Criterios de adoptabilidad

C_{A1} – Ventaja relativa

C_{A2} – Compatibilidad

C_{A3} – Complejidad

C_{A4} – Ensayabilidad

C_{A5} – Observabilidad

Así, cada tecnología T_j puede ser caracterizada por un vector de desempeño [3] (anexo 1) cuyos elementos $C_k \in [0,1]$, representando los valores 0 y 1 los extremos de una «mala» y «buena» evaluación de su desempeño respectivamente, dentro de ese intervalo continuo. De este modo, el sistema de clasificación propuesto permite caracterizar un número virtualmente ilimitado de tecnologías alternativas en la producción del bien X . Evidentemente, en la realidad esto estaría más allá de los límites cognitivos, e incluso físicos, del desarrollo tecnológico. Por otra parte, muestra la flexibilidad del modelo propuesto frente a aquéllos (16) que centran su análisis en tan sólo dos tecnologías alternativas entre sí.

En la simulación establecemos además que, debido a la presencia de rendimientos crecientes de la adopción —derivados del aprendizaje por el uso y por la práctica, los efectos de red, las economías de escala, los rendimientos crecientes de la información y las interrelaciones tecnológicas— el valor real (*actual performance*) de cada característica para cada tecnología evoluciona en el tiempo en función de su grado de adopción (*installed user base*) por los productores. Sea C_{kt}^j el valor real del desempeño de T_j en C_k en t . Como de hecho se cumple en los cinco criterios de elección individual planteados, bajo el esquema de valoración propuesto (rango [0-malo,1-bueno]), suponemos que C_{kt}^j es una función creciente del número de agentes P_j

adoptantes de la tecnología en cada t , T_j $I_t^j = \sum_t P_j^t$ (ver expresión [4] en anexo 1).

Se trata de una función de crecimiento logístico (17) (Figura 3) con una asíntota superior en el máximo nivel de desempeño \widehat{C}_{Ak}^j o «frontera de mejora», que no puede ser superada por cada criterio de una tecnología a pesar de que sigan sumándose nuevos adoptantes (18). C_{Ak0}^j representa el nivel de desempeño de partida ($I_t^j = 0$) de T_j en C_{Ak}^j . En la simulación, siempre se cumple que $\widehat{C}_{Ak}^j > C_{Ak0}^j$, distribuyéndose ambas variables de modo aleatorio e independiente entre las diferentes tecnologías nacidas en un mismo t siguiendo una $N(0,1)$ dentro del intervalo de posibles valores $[0,1]$. Se fija además para C_{Ak0}^j un límite superior, \widehat{C}_{Ak0}^j , que deberá ser más próximo a 0 que a 1 dentro de ese intervalo continuo (19).

La variable $r_j (> 0)$ representa la tasa de mejora de la tecnología T_j debida a la presencia de rendimien-

tos crecientes de la adopción (20). Por motivos de simplicidad, supondremos que el valor de esta tasa de mejora es común para todos los criterios de una misma tecnología, aunque es probable que en la realidad algunos de ellos mejoraran más rápidamente que otros con el incremento en el número de usuarios. Sin embargo, sí se recoge en el modelo el hecho de que las diferentes alternativas tecnológicas disfrutan de diferentes grados de rendimientos crecientes de la adopción. Así, en la simulación, r_j (> 0) (21) se distribuye de modo aleatorio e independiente entre las diferentes T_j nacidas en un mismo t siguiendo una $N(\bar{r}, \sigma_r)$.

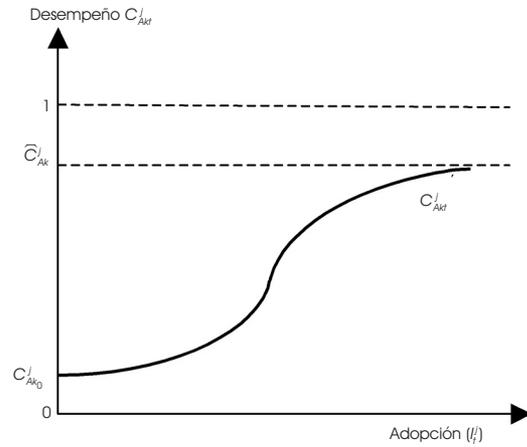
Suponemos información imperfecta en este mercado de tecnologías, de modo que cada potencial adoptante tiene una percepción diferente del desempeño de cada tecnología en sus diferentes criterios de elección individual (*perceived performance*) (22). Sea C_{Akt}^j el valor percibido por el agente P_i del desempeño de la tecnología T_j en el criterio C_{Ak} en el momento t . En la simulación, asumimos que C_{Akt}^j se distribuye entre los diferentes agentes, dentro del intervalo de posibles valores $[0, 1]$, siguiendo una distribución normal (23) con media en el valor real C_{Akt}^j y desviación σ_{Akt}^j : $C_{Akt}^j \sim N(C_{Akt}^j, \sigma_{Akt}^j)$, donde σ_{Akt}^j es una función decreciente del número de agentes adoptantes de la tecnología T_j en cada momento t , $l_t^j = \sum_i P_i^j$ (ver expresión [5] en anexo 1).

El parámetro $c > 0$ representa la tasa de comunicación entre usuarios. Mediante esta función $g(l_t^j)$, queda recogido en el modelo el hecho de que el incremento en el número de usuarios reduce la incertidumbre, disminuye el coste de búsqueda de información, e incrementa el conocimiento (24) de los agentes respecto al desempeño real de una tecnología (*actual performance*), mejorando sus expectativas (25). Esta caracterización del proceso de difusión del conocimiento, dependiente del número de usuarios (26), actúa como un auto-refuerzo del interés de los agentes productores en la tecnología cuyo desempeño real se está viendo beneficiado por el propio incremento en el número de usuarios, en una representación fiel de un «efecto mayoría» (*bandwagon effect*) en los términos definidos páginas atrás.

En intervalos aleatorios de tiempo, en un proceso estocástico de reemplazo de las tecnologías obsoletas (27), cada uno de los productores activos en cada período en el mercado, antiguos y nuevos, decide individualmente, del modo que más adelante se detalla, bien continuar con la última tecnología que decidió instalar, o bien adoptar una diferente entre las disponibles en ese período.

Para ello, en la simulación se asignará a cada agente activo en cada momento un parámetro de reem-

FIGURA 3
FUNCIÓN DE EVOLUCIÓN DEL DESEMPEÑO DE CADA CRITERIO DE UNA TECNOLOGÍA A MEDIDA QUE CRECE SU ADOPCIÓN



FUENTE:
 Elaboración propia

plazo ro_t^j que adoptará un valor igual a 1 (reemplazo) o igual a 0 (continuidad) de acuerdo con una distribución de Bernoulli de probabilidad β dentro del grupo de agentes activos en un mismo período. La mayor o menor magnitud de este parámetro β permite representar en el modelo industrias con una mayor o menor tendencia a la obsolescencia tecnológica y/o industrias con unos menores o mayores costes de cambio tecnológico.

La racionalidad limitada de un agente puede ser considerada frente a diferentes aspectos del problema, como la capacidad de cálculo o el acceso a toda la información necesaria para su resolución. En este modelo es posible argumentar que el agente individual, a pesar de su información imperfecta, puede *pretender* la optimización de su problema de elección individual. Es decir, supondremos que cada productor presenta racionalidad limitada en términos de acceso a la información, pero que dada su escala de decisión, actúa *como si* optimizara sus decisiones privadas (28).

Suponemos, además, que los agentes productores presentan preferencias heterogéneas respecto a las características de adopción de las tecnologías productivas. Así, en cada período, cada pro-

ductor adopta (29) la tecnología que presenta el máximo valor en su función lineal de decisión (30) U_i^j (ver expresión [6] en anexo 1) donde los parámetros w^l ($0 < w^l < 1$) son los pesos que cada productor atribuye en su decisión a los diferentes criterios. En la simulación suponemos que para cada productor los pesos están normalizados, es decir, se cumple que $\sum w^l = 1$; además consideramos que el valor de cada uno de los pesos que cada productor atribuye a cada criterio se distribuye de modo independiente y aleatorio entre los diferentes productores siguiendo una distribución $N(0,1)$ dentro del intervalo de posibles valores $[0,1]$. Asumimos que el valor de estos pesos, que constituye el perfil de preferencias de cada productor, no se modifica a lo largo de su vida activa. Sin embargo, podemos afirmar que los pesos medios asignados por el colectivo de productores activos en cada período sí que evoluciona, dado que el propio colectivo cambia (cuantitativa y cualitativamente) con la entrada y salida de productores en el mercado.

Por último, definimos como «tecnología estándar» o imperante en cada período aquella T_i^{ST} que alcance un cuota de mercado $\sum_j I_i^j > I^{ST} \%$, para $J_i > 2$ tecnologías (31), durante al menos t^{ST} períodos. Definimos como «tecnología retardadora» en cada período aquella T_i^{JR} que supera en primer lugar en cuota de mercado a la T_i^{ST} , una vez que ésta deja de ser el estándar. Sea t_r (tiempo de reemplazo) el momento en que T_i^{JR} reemplaza (supera en cuota de mercado) a T_i^{ST} . Sea F_i^j el *fitness* real (32) o adecuación de la tecnología j en el momento t , definido como $\sum_{Ak} C_{Akt}^j / Ak$. Sea F_i^j el *fitness* percibido en promedio por los i usuarios de la tecnología j en el momento t , definido como $(\sum_i [\sum_{Ak} C_{Akt}^j / Ak]) / I_i^j$.

El cuadro 1 recoge una recapitulación de las variables (independientes) del modelo que permiten caracterizar la industria representada, y de los atributos del proceso de estandarización tecnológica (variables dependientes) cuyas relaciones con aquéllas pretendemos identificar y valorar.

Calibración del modelo ↓

Dado nuestro interés en sus propiedades dinámicas y su intratabilidad matemática, el modelo basado en agentes (ABM) descrito ha sido desarrollado para su explotación en MATLAB™, un lenguaje de programación específicamente orientado a la matemática, reconocido por su solvencia y versatilidad (33). Con esta flexibilidad se ha pretendido dar respuesta a la propia filosofía del ABM, una metodología de investigación que pretende enri-

quecer nuestro entendimiento sobre los procesos fundamentales que pueden aparecer en diversas aplicaciones, y no representar o hacer predicciones precisas sobre una aplicación empírica concreta.

De este modo, en la calibración del modelo (escenario base) se ha optado por un conjunto de parámetros teóricamente aceptables obtenidos de la literatura, pero que no pretenden representar de modo preciso una situación o una industria concreta. Los posteriores análisis de sensibilidad permitirán valorar estadísticamente el efecto de las modificaciones sobre este escenario base.

A diferencia de los anteriores parámetros, de carácter poblacional, justificables en su magnitud a partir de estudios empíricos, el resto de parámetros iniciales del modelo son de un carácter más *ad hoc* al modo en que se han construido sus supuestos. Intentamos, en la medida de lo posible, argumentar su valor a partir de los anteriores. De este modo, dada la magnitud (justificada) de entrada y salida de empresas en la industria, que lleva a que la industria se estabilice en el escenario base en una población cercana a 80 empresas, permanentemente renovada, creemos razonable que en el escenario base una tecnología deba ser adoptada por al menos 5 empresas (P_r) en un plazo de 2 años (T_r) para no considerarla «rechazada» por el sistema productivo y que puedan entrar en juego las economías de red que la permitan competir con el resto de tecnologías. Dado este valor de P_r , y si fijamos en 0,2 la máxima dispersión σ_{Akt}^j de los desempeños percibidos C_{Akt}^j en torno al desempeño real de una tecnología C_{Akt}^j ($\in [0,1]$), de acuerdo con la expresión [5] la tasa de comunicación c deberá tener un valor de 0,8. Del mismo modo, si el máximo valor que pueden alcanzar \widehat{C}_{Ak}^j y C_{Ak0}^j es 1 y 0,5 respectivamente, de la expresión [4] podemos deducir que una tasa \bar{r} del entorno de 0,5 sitúa la «frontera de mejora» tecnológica aproximadamente en el 50% de una industria de 80 empresas. Dicho de otro modo, estamos suponiendo que tan sólo un estándar tecnológico puede alcanzar todo su potencial de desempeño, que en cualquier caso es limitado (< 1). Establecemos asimismo una desviación $\sigma_r = 0,2$ que garantiza cierta diversidad entre las alternativas tecnológicas.

Justificamos por último el valor asignado en el escenario base a β probabilidad de que el agente i reemplace su tecnología j en el momento t) un valor de 0,2, que reconoce una relativa tendencia a la obsolescencia tecnológica y unos considerables costes del cambio tecnológico en la industria.

CUADRO 1
RECAPITULACIÓN DE VARIABLES Y PARÁMETROS DE MODELO

Características de la industria: variables independientes del modelo

Parámetro	Definición e interpretación
λ_T	Tasa media de aparición de nuevas tecnologías disponibles por período en la industria («tasa media de innovación»)
P_T	Número mínimo de adoptantes a obtener en un plazo máximo de tiempo t_T para la supervivencia de una tecnología («escala de red» necesaria)
t_T	Plazo máximo de tiempo en la obtención de P_T adoptantes para la supervivencia de una tecnología («competitividad del mercado tecnológico»)
\bar{r}	Tasa media de mejora con la adopción de las tecnologías T_j nacidas en un mismo período t («grado de rendimientos crecientes de la adopción»)
σ_r	Dispersión de la tasa media de mejora entre las tecnologías T_j nacidas en un mismo período t («grado de diferenciación en las capacidades de los proveedores tecnológicos»)
λ_p	Tasa media de aparición de nuevos productores activos en cada período («barreras de entrada»)
\bar{s}	«Supervivencia media de las empresas»
σ_s	Dispersión de la supervivencia media de las empresas («competitividad de la industria»)
c	«Tasa de comunicación» entre usuarios
β	Probabilidad de que el agente i reemplace su tecnología j en el momento t («tendencia a la obsolescencia tecnológica en la industria»; «costes del cambio tecnológico en la industria»)
$f^{ST}\%$	Cuota de mercado mínima, en términos de número relativo de adoptantes, que debe alcanzar una tecnología durante f^{ST} períodos para ser considerada el «estándar» tecnológico de la industria
t^{ST}	Tiempo mínimo que una tecnología debe mantener la cuota de mercado mínima $f^{ST}\%$ para ser considerada el «estándar» tecnológico de la industria

Atributos del proceso de estandarización tecnológica: variables dependientes

Variable	Definición e interpretación
t_0^{ST}	<i>Aparición:</i> para cada simulación, primer momento t en que una tecnología supera una cuota del $f^{ST}\%$ de los usuarios activos (para $J_t > 2$) durante al menos f^{ST} períodos, convirtiéndose en estándar.
f_r^{ST}	<i>Frecuencia:</i> para cada simulación, número de veces que se produce el hecho anterior a lo largo de la misma.
p^{ST}	<i>Profundidad:</i> para cada estándar, cuota máxima alcanzada por la tecnología durante su permanencia como estándar.
dco^{ST}	<i>Debilidad frente a cambios en la oferta:</i> para cada estándar, magnitud necesaria de mejora en el desempeño percibido de una tecnología alternativa para romper su dominio (variación porcentual entre F_t^{JR} y F_t^{JST} en el momento t). <i>Debilidad frente a cambios en la demanda:</i> para cada estándar, magnitud de cambio en las preferencias de los usuarios necesaria para romper el dominio de una tecnología estándar.
dcd^{JST}	$\forall i \in I^{JR}, W_{Ak} = (W_{A1}^i, \dots, W_{Ak}^i), W_{Ak} = \frac{\sum_j W_{Ak}^{-j}}{I^{JR}}$ $\forall i \in I^{JST}, W_{Ak} = (W_{A1}^i, \dots, W_{Ak}^i), W_{Ak} = \frac{\sum_j W_{Ak}^{-j}}{I^{JST}}$ $\bar{a} = \left \frac{W_{Ak}^{-JR} - W_{Ak}^{-JST}}{W_{Ak}^{-JR} + W_{Ak}^{-JST}} \right , \bar{b} = \frac{W_{Ak}^{-JR} - W_{Ak}^{-JST}}{2}$ $dcd^{JST} = \bar{a} \cdot \bar{b} = \sum_k \alpha_{Ak} \cdot b_{Ak} \text{ en el momento } t$

Otras variables dependientes del modelo

Variable	Definición e interpretación
F_{tST}^{JST}	«Fitness» real o adecuación del estándar tecnológico j en el momento t_{ST} en que se constituye como estándar. Definido como $\sum_{Ak, JST} C_{Akt}^{JST} / Ak$.
F_{tST}^{JBAT}	«Fitness» real o adecuación de la que hubiera sido la mejor alternativa tecnológica j , coetánea y precedente, a un estándar en el momento t_{ST} en que éste se constituye como tal y de haber sido adoptada por un número equivalente de usuarios. Definido como $\sum_{Ak, JST} C_{Akt}^{JBAT} / Ak$.

FUENTE: Elaboración propia

CUADRO 2
CALIBRACIÓN DEL MODELO EN EL ESCENARIO BASE

Parámetro	Definición e interpretación	Valor	Fuente
$f^{ST\%}$	Cuota de mercado mínima, en términos de número relativo de adoptantes, que debe alcanzar una tecnología durante f^{ST} periodos para ser considerada el «estándar» tecnológico de la industria	50% o más de los procesos instalados (*) durante al menos 3 años consecutivos (**)	Anderson y Tushman (1990)
λ_p	Tasa media de aparición de nuevos productores activos en cada período («barreras de entrada»)	15	Klepper y Simons (1997); Gort y Klepper (1982)
\bar{s}	«Supervivencia media de las empresas»	5 años	Klepper y Simons (1997);
σ_s	Dispersión de la supervivencia media de las empresas («competitividad de la industria»)	2 años	Mata y Portugal (1994); Tegarden <i>et al.</i> (2000)
λ_T	Tasa media de aparición de nuevas tecnologías disponibles por período en la industria («tasa media de innovación»)	1	Klepper y Simons (1997)

(*) Condición que evidentemente sólo puede alcanzar una tecnología en cada momento t .

(**) Anderson y Tushman varían esta cifra en sus diferentes estudios entre los 3 y los 4 años

FUENTE: Elaboración propia

Simulaciones numéricas ↓

Para dar respuesta a los objetivos de investigación se llevó a cabo un experimento sobre el escenario base, de 150 simulaciones de 50 iteraciones cada una y con semillas aleatorias distintas en cada simulación. A modo de muestra y por motivos de espacio, en el anexo 2 se presenta para tan sólo las primeras 10 simulaciones la totalidad de estándares registrados en cada simulación. En la tabla de este apéndice se recogen las diferentes características de cada uno de los estándares, y del proceso completo de estandarización, registrados en cada «historia» (simulación) de esta industria, de acuerdo con los atributos anteriormente expuestos (momento, frecuencia, velocidad, duración, profundidad, debilidad frente a cambios en la oferta y frente a cambios en la demanda).

El juego de gráficos del anexo 3 representa los resultados de una simulación típica del modelo sobre el escenario base. El primer gráfico muestra la evolución en el tiempo de la adopción (cuotas de mercado en tanto por 1) de las diferentes tecnologías por parte de los diferentes productores presentes en cada momento en la industria del bien X. Siguiendo a Anderson y Tushman (1990), las tecnologías que superan la cuota del 50% durante al menos 3 periodos, quedan identificadas como estándares tecnológicos (34).

Los dos últimos gráficos muestran respectivamente la evolución de la población de empresas y de la población de tecnologías. Cabe destacar el fuerte isomorfismo visual de los resultados de modelo propuesto con los patrones del fenómeno observado en industrias reales, considerado un indicador de la validez del modelo en el sentido de Marney y Tarbert

(2000). En una prueba de validez externa en el sentido de Kleijnen (1998), en el anexo 4 se puede comprobar que nuestro modelo ofrece una representación del fenómeno de sucesión tecnológica fiel y consistente con la evidencia empírica sobre la difusión de tecnologías en industrias tan diversas como la de los chips de RAM, el acero o la producción de energía.

A diferencia de los modelos convencionales de difusión y estandarización tecnológica, centrados en la tasa de difusión a la que una nueva tecnología es plenamente adoptada, nuestro modelo permite realizar una aproximación ampliada al proceso de cambio tecnológico, desde la perspectiva de la extensión de la difusión de múltiples tecnologías alternativas, y del fenómeno relacionado de la estandarización. Anteriormente destacábamos que, además de Arthur, muchos otros autores han mostrado el proceso de selección tecnológica como una historia de «todo o nada» (Abrahamson y Rosenkopf, 1997). Esta es una carencia generalizada de los modelos de difusión y estandarización que ha sido señalada repetidamente en diferentes trabajos de la última década (Schilling, 2002: 395; Jaffe *et al.*, 2000: 41; Windrum y Birchenhall, 1998: 112; David, 1997: 36; Nelson, 1994b; David y Greenstein, 1990: 8).

A pesar de que diferentes fuerzas (*positive feedbacks*) ayudan a consolidar la posición dominante de un estándar tecnológico, la experiencia muestra que ningún estándar permanece indefinidamente instalado en una industria (Abrahamson y Rosenkopf, 1997; Ruffan, 1997; Witt, 1997; Grübler, 1990; Ausubel, 1989). Por el contrario en la realidad, en un horizonte suficientemente prolongado, se observa una sucesión de estándares, una dinámica de tran-

CUADRO 3
RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

		Efecto sobre la variable							
		f_0^{ST}	f^{ST}	v^{ST}	d^{ST}	p^{ST}	dco^{ST}	dcd^{ST}	
Variación del parámetro	λ_r	b	0,076	-0,482	0,076	-0,441	-0,615	-0,121	0,046
		t	0,688	-4,995**	0,688	-4,423**	-7,014**	-1,096	0,418
	\bar{r}	b	-0,525	0,308	-0,585	0,335	0,524	0,013	-0,106
		t	-7,011**	3,672**	-8,196**	4,039**	6,994**	0,143	-1,211
	β	b	-0,215	-0,183	-0,632	-0,499	0,519	-0,552	0,051
		t	-1,589	-1,342	-5,873**	-4,154**	4,379**	-4,778**	0,356
	λ_p	b	0,580	0,308	0,383	0,450	0,407	0,014	-0,471
		t	7,226**	3,288**	4,208**	5,108**	4,527**	0,144	-5,424**
	\bar{s}	b	0,179	-0,207	0,179	0,651	-0,010	0,076	0,166
		t	2,020*	-2,346*	2,020*	9,521**	-0,114	0,850	1,866
	c	b	-0,370	-0,188	-0,370	-0,404	0,228	0,127	0,035
		t	-3,623**	-1,742	-3,623**	-4,030**	2,129*	1,168	0,313

(*) Relación significativa con un nivel de confianza del 95%.
(**) Relación significativa con un nivel de confianza del 99%

FUENTE: Elaboración propia

sición entre equilibrios inestables que logra representar y caracterizar este modelo.

Es poco frecuente que un estándar tecnológico alcance una difusión absoluta en una industria, entendida como un 100% de cuota de mercado. Por el contrario, habitualmente se observa cómo estándares en diferentes grados conviven con alternativas tecnológicas de menor éxito, que pueden sobrevivir durante períodos más o menos prolongados en nichos de mercado (Grübler, 1990; Dalle, 1995; Freeman, 1996). La existencia de estos nichos viene explicada tanto por el surgimiento de nuevas alternativas que empiezan a construir su base instalada, como por la heterogeneidad en las preferencias de los usuarios, que circunstancialmente puede mantener diferentes colectivos al margen de estándar dominante. De nuevo, el modelo propuesto permite mostrar con una mayor riqueza que los modelos convencionales del tipo «todo o nada» —por otra parte, habitualmente centrados en la competencia entre tan sólo dos alternativas— la realidad de una industria repartida en cada momento entre múltiples alternativas disponibles, todas ellas con diferentes grados de adopción en cada momento del tiempo.

PATRONES INDUSTRIALES DE DIFUSIÓN Y ESTANDARIZACIÓN TECNOLÓGICA †

Para identificar y valorar las relaciones entre las principales características de la industria y los atributos del proceso de estandarización tecnológica (Cuadro 1), se llevaron a cabo seis diferentes análisis

de sensibilidad (35) de los efectos de modificaciones incrementales en los parámetros λ_r , \bar{r} , β , λ_p , \bar{s} y c sobre las variables f_0^{ST} , f^{ST} , v^{ST} , d^{ST} , p^{ST} , dco^{ST} y dcd^{ST} . El Cuadro 3 muestra un resumen de los resultados de las 42 regresiones.

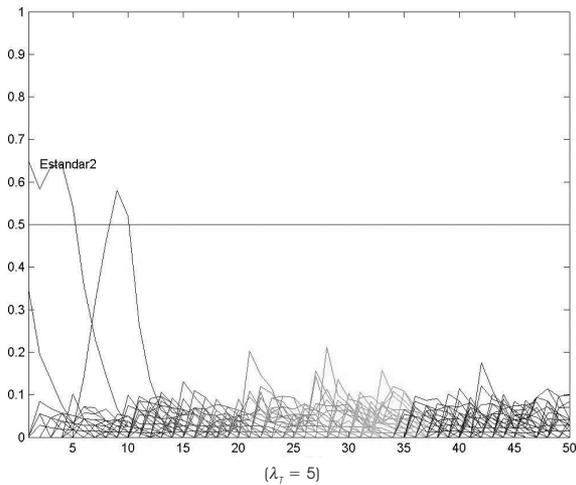
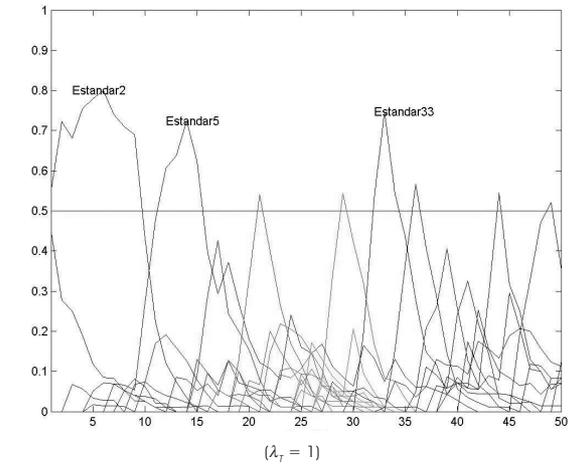
Determinadas industrias muestran un mayor dinamismo frente a otras en la introducción de nuevas innovaciones tecnológicas en sus procesos productivos. De acuerdo con los resultados significativos del análisis de sensibilidad sobre λ_r , en industrias (o en fases de la vida de una industria) con una mayor tasa de innovación los estándares muestran una tendencia a aparecer con menor frecuencia, duran menos tiempo y alcanzan una menor cuota (cuadro 2 y figura 4). La existencia de un mayor número de alternativas, y su mayor ritmo de renovación, dificulta que alguna de ellas alcance una cuota de mercado diferencial sobre el resto. De alcanzarla, no resulta demasiado profunda y pronto se ve amenazada por la aparición de nuevas alternativas que pueden resultar más atractivas.

La presencia de rendimientos crecientes de la adopción tecnológica es mayor en sectores productivos en los que la tecnología muestra una naturaleza integrada y sistémica, una larga historia y especiales requerimientos de infraestructuras. Los resultados significativos del análisis de sensibilidad sobre \bar{r} muestran que en industrias (o en fases de la vida de una industria) con una mayor tasa media de rendimientos crecientes de la adopción, los estándares muestran una tendencia a aparecer más pronto y con mayor frecuencia, se desarrollan más

FIGURA 4

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD
SOBRE LA TASA DE
INNOVACIÓN (λ_t)

Resultados típicos; evolución de cuotas
de mercado en el tiempo

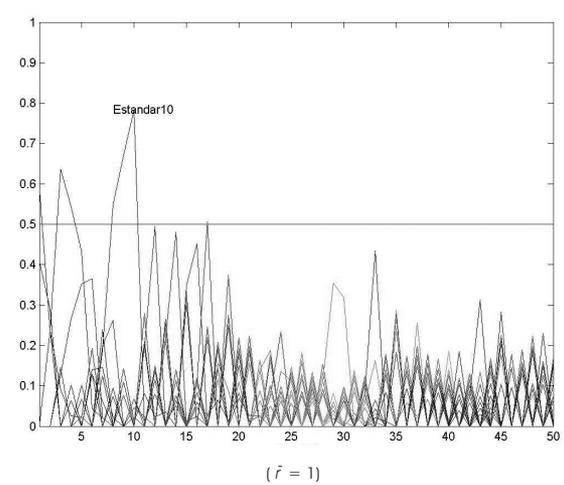
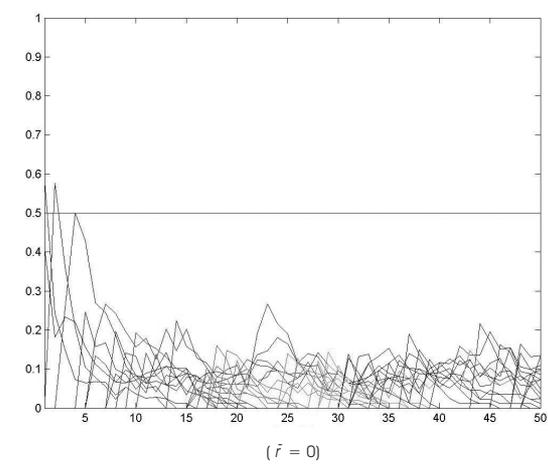


rápidamente, duran más tiempo y alcanzan una mayor cuota (cuadro 2 y figura 5). Como cabía esperar, en una nueva prueba de la consistencia del modelo, una mayor intensidad en la que hemos argumentado como fuente del fenómeno investigado tiene como resultado una intensificación en la manifestación del mismo. El signo de las relaciones ha sido suficientemente discutido a lo largo de la investigación y concuerda con la evidencia empírica. Asimismo, se ha comprobado en numerosos experimentos que bajo rendimientos constantes de

FIGURA 5

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD
SOBRE LA TASA DE
REDIMIENTOS CRECIENTES (\bar{r})

Resultados típicos; evolución de cuotas
de mercado en el tiempo



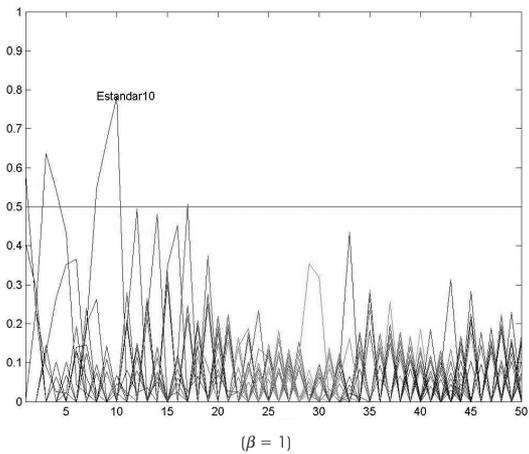
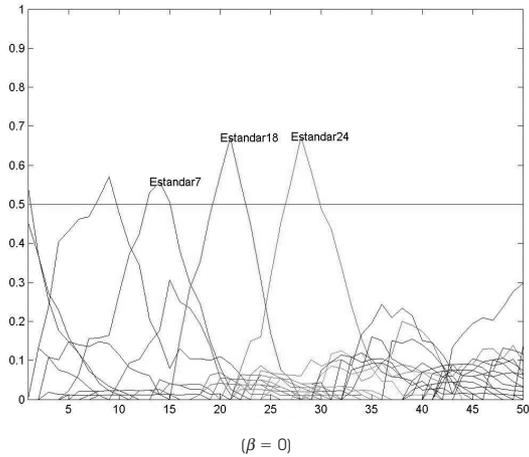
la adopción ($\bar{r}=0$) el modelo no registra ningún estándar (o lo hace muy excepcionalmente y en los primeros periodos).

La frecuencia con que se renuevan las tecnologías productivas varía entre las diferentes industrias en función del ritmo al que se produzca la obsolescencia de los equipos y de los costes del cambio de los mismos. El análisis de sensibilidad sobre β , en sus resultados significativos, indica que en industrias (o en fases de la vida de una industria) con una mayor

FIGURA 6

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD
SOBRE FRECUENCIA DE
RENOVACIÓN (β)

Resultados típicos; evolución de cuotas
de mercado en el tiempo

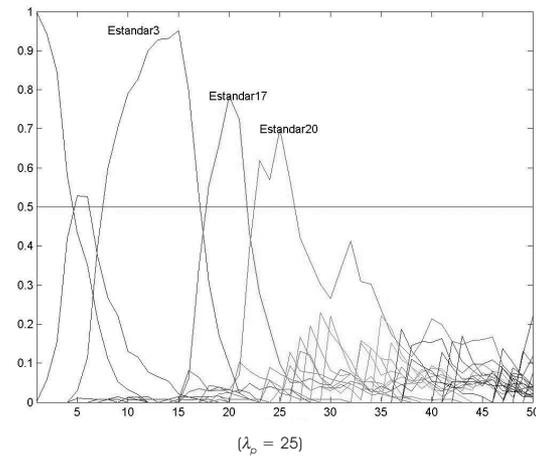
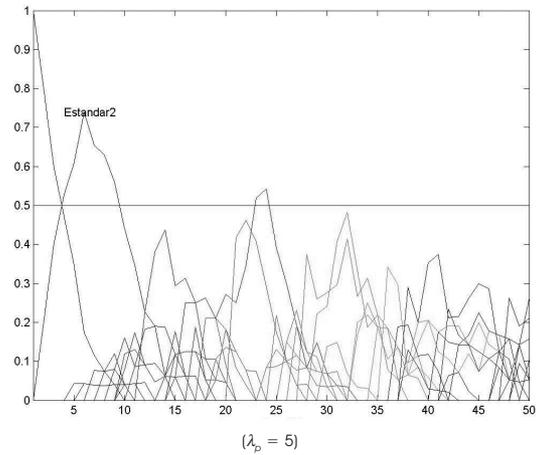


frecuencia de renovación tecnológica (por mayor ritmo de obsolescencia y/o menor coste de cambio), los estándares muestran una tendencia a desarrollarse más rápidamente, duran menos tiempo y alcanzan una mayor cuota (cuadro 2 y figura 6). Cuando las empresas quieren o deben (y son capaces de) renovar su equipo con mayor frecuencia, los procesos de adhesión a una alternativa pueden verse acelerados e intensificados, aunque la escasa fidelidad de los adoptantes hace que los estándares sean efímeros. Prueba de ello es el resultado adi-

FIGURA 7

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD
SOBRE LA TASA DE
ENTRADA DE ADOPTANTES (λ_p)

Resultados típicos; evolución de cuotas
de mercado en el tiempo



cional que muestra que en industrias con mayor frecuencia de renovación tecnológica los estándares son más débiles frente a mejoras en las características de las alternativas.

Algunas industrias son más accesibles que otras para las nuevas empresas que pretenden entrar y establecerse en el sector. Los resultados significativos del análisis de sensibilidad sobre λ_p indican que en industrias (o en fases de la vida de una industria) con unas menores barreras de entrada para los usuarios,

los estándares muestran una tendencia a aparecer más tarde y con mayor frecuencia, se desarrollan más lentamente, duran más tiempo y alcanzan una mayor cuota (Cuadro 2 y figura 7). Como cabría esperar, dada la heterogeneidad de los adoptantes, su mayor número dificulta la convergencia en un primer estándar. Sin embargo, una vez alcanzada una determinada base de usuarios, el flujo de nuevos entrantes se dirige con facilidad hacia el acuerdo establecido por los precedentes, consolidando su alcance y permanencia en el tiempo. Los resultados muestran además que los estándares en industrias accesibles son más débiles frente a cambios en las preferencias de los usuarios. Podría interpretarse que, dada la constante renovación del parque de usuarios, la mencionada consolidación del estándar tiene una mayor garantía si la heterogeneidad de las preferencias de los adoptantes permanece relativamente estable.

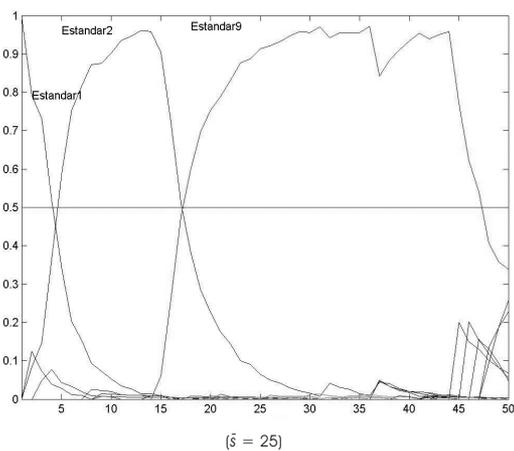
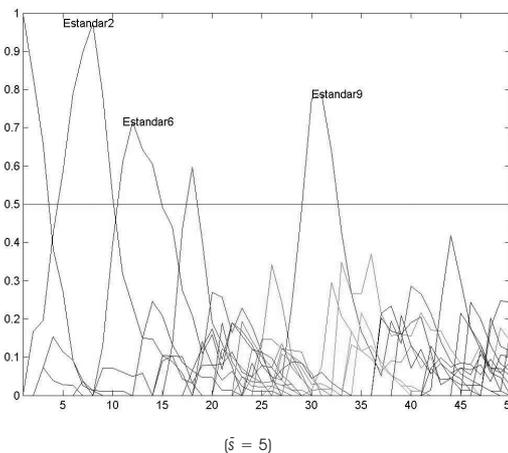
Las industrias en las que, por diferentes circunstancias, se da una menor presión competitiva registran menores tasas de salida de empresas. Los resultados significativos del análisis de sensibilidad sobre \bar{s} muestran que en industrias (o en fases de la vida de una industria) con unas mayores tasas de supervivencia entre los usuarios, los estándares muestran una tendencia a aparecer más tarde y con menor frecuencia, se desarrollan más lentamente y duran más tiempo (cuadro 2 y figura 8). Al igual que en el análisis anterior, dada la heterogeneidad de los adoptantes, su mayor número dificulta la convergencia en un primer estándar. Sin embargo en esta ocasión, bajo el supuesto (restrictivo) realizado en el modelo de que las preferencias de cada usuario se mantienen constantes, la estabilidad en la heterogeneidad del parque de usuarios está más garantizada, y con ella la mayor duración y la menor frecuencia de reemplazo en los estándares.

Motivos intrínsecos a las tecnologías (complejidad, observabilidad) o a la naturaleza de la industria (dispersión geográfica, transparencia), pueden suponer muy diferentes grados de comunicación de experiencias entre los usuarios y los potenciales adoptantes. Los resultados significativos del análisis de sensibilidad sobre \bar{s} permiten afirmar que en industrias (o en fases de la vida de una industria) con una mayor comunicación entre los usuarios, los estándares muestran una tendencia a aparecer más pronto, se desarrollan más rápidamente, duran menos tiempo y alcanzan una mayor cuota (cuadro 2 y figura 9). Un mayor grado de comunicación de las experiencias reduce la incertidumbre, disminuye el coste de búsqueda de información e incrementa el conocimiento de los potenciales usuarios. Consiguientemente, la primera convergencia en torno a una alternativa, y los sucesivos acuerdos, se alcanzan

FIGURA 8

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD
SOBRE LA TASA DE
SUPERVIVENCIA (\bar{s})

Resultados típicos; evolución de cuotas
de mercado en el tiempo



con facilidad y profundidad. Sin embargo, la menor incertidumbre también facilita que los adoptantes reconozcan y apuesten pronto por nuevas alternativas, por lo que los estándares en este tipo de industrias no alcanzan gran duración.

Como se ha podido comprobar, dentro de su relativa sencillez y sus limitaciones el modelo propuesto permite realizar una amplia y consistente caracterización o taxonomía de las relaciones entre las circunstancias de una industria y los atributos de sus procesos de estandarización tecnológica. Los resul-

tados de la simulación permiten corroborar algunas intuiciones económicas al tiempo que llaman la atención sobre relaciones menos evidentes, dando pie a potenciales estudios empíricos que confirmen y amplíen las conclusiones obtenidas.

CONCLUSIONES

Los modelos convencionales de difusión y estandarización tecnológica han abordado tradicionalmente la cuestión de la tasa de difusión a la que una nueva tecnología es plenamente adoptada. El modelo presentado en esta investigación ha permitido realizar una aproximación ampliada al proceso de cambio tecnológico, desde la perspectiva de la extensión de la difusión de múltiples tecnologías alternativas, y del fenómeno relacionado de la estandarización.

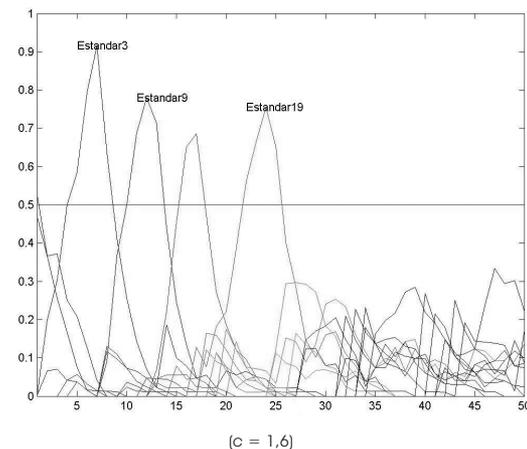
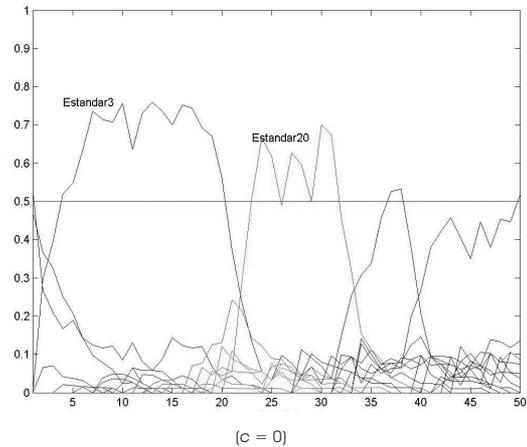
La experiencia muestra que ningún estándar permanece indefinidamente instalado en una industria, y que es poco frecuente que un estándar tecnológico alcance una difusión absoluta. Por el contrario en la realidad, en un horizonte suficientemente prolongado, se observa una sucesión de estándares en diferentes grados que conviven con alternativas tecnológicas de menor éxito, que pueden sobrevivir durante períodos más o menos prolongados en nichos de mercado. El modelo propuesto permite mostrar con una mayor riqueza que los modelos convencionales del tipo «todo o nada» —por otra parte, habitualmente centrados en la competencia entre tan sólo dos alternativas— la realidad de una dinámica de transición entre equilibrios inestables, en una industria repartida en cada momento entre múltiples alternativas disponibles, todas ellas con diferentes grados de adopción en cada momento del tiempo.

La mayor parte de la investigación sobre los factores que influyen en el proceso de difusión tecnológica se ha concentrado en las características de las tecnologías y en las características de las empresas adoptantes. No se encuentran sin embargo en la literatura demasiadas aproximaciones al modo en que las características agregadas de la industria o sector afectan al proceso de difusión tecnológica (y en particular a la dinámica de la estandarización). Los escasos estudios de carácter sectorial, en su mayor parte empíricos, utilizan habitualmente los promedios de las características de las empresas pertenecientes al sector y presentan además resultados poco concluyentes e incluso contradictorios. El modelo propuesto ha permitido realizar una amplia y consistente caracterización o taxonomía de las relaciones entre las circunstancias de una industria y los atributos de sus procesos de estandarización tecnológica, corroborando algunas intuicio-

FIGURA 9

**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD
SOBRE LA TASA DE
COMUNICACIÓN (c)**

Resultados típicos; evolución de cuotas de mercado en el tiempo



nes económicas al tiempo que ha llamado la atención sobre relaciones menos evidentes susceptibles de una mayor investigación.

NOTAS

[1] Las principales diferencias entre la aproximación al análisis del cambio tecnológico convencional o neoclásica y la aproximación evolutiva, adoptada en nuestro trabajo, surgen esencialmente de las objeciones que hacen los economistas evolutivos al modo en que la función (agregada)

de producción es usada por los economistas neoclásicos, y a su aparente incapacidad para explicar la naturaleza de los procesos de innovación tecnológica (Nelson y Winter, 1974, 1977 y 1982; Dosi, 1982; Dosi *et al.*, 1988). Así, mientras la aproximación neoclásica nos muestra el cambio tecnológico como un simple cambio en la información disponible sobre las relaciones entre los *inputs* y *outputs* en la economía (Stoneman, 1983; Gomulka, 1990), la aproximación evolutiva considera el cambio tecnológico como el resultado de un proceso de evolución, auto-referenciado e influido por las instituciones económicas, sociales y políticas. Según esta aproximación, el desarrollo tecnológico debe ser entendido como un proceso evolutivo, en el que las alternativas tecnológicas compiten entre sí y con la tecnología dominante, con una selección *a posteriori* que determina los ganadores y los perdedores, y con considerable incertidumbre *a priori* acerca de cuáles serán estos ganadores (Nelson y Winter, 1982). Dado que la incertidumbre es intrínseca al proceso de cambio tecnológico, el supuesto de comportamiento racional maximizador es reemplazado por una búsqueda de beneficio «a tientas» (rutinas heurísticas de búsqueda); como consecuencia de lo anterior, no hay un equilibrio único maximizador del bienestar, sino múltiples equilibrios posibles: accidentes históricos determinan entonces qué equilibrio se alcanzará o aproximará en un momento dado; la estructura, incluyendo a las instituciones, es a menudo explicitada en los modelos evolutivos, de modo que puede ser estudiado su lugar en el proceso de cambio tecnológico (Lipsey y Carlaw, 1998).

- [2] Ante la dificultad que representa abordar la amplia diversidad de situaciones existentes en los procesos de cambio tecnológico, Molero (1994: 12) afirma: «[...] Como en otras muchas ramas del saber, la taxonomía es un camino imprescindible para pasar del conocimiento del caso específico al de las regularidades y elementos compartidos por colectivos amplios, a partir de los cuales es posible establecer pautas de comportamiento y relaciones estables que sustenten un trabajo teórico más consistente». En Buesa y Molero (1998: 240) se insiste en el valor de esta perspectiva de la investigación del proceso de cambio tecnológico: «[...] Desde un punto de vista teórico, el énfasis en la diversidad y heterogeneidad de situaciones plantea algunas interrogantes no despreciables. En particular es importante responder cómo enfrentar el trabajo teórico si estamos ante casos que difieren entre sí de manera tan considerable [...] Una respuesta que nos parece convincente y abordable en el estado actual de conocimiento del proceso de innovación tecnológica consiste en establecer taxonomías que permitan conocer las regularidades que afectan a los comportamientos no de la generalidad de los agentes innovadores, sino de algún conjunto de ellos que guarden similitudes comprobables en áreas fundamentales del cambio tecnológico».
- [3] Otras denominaciones habituales para esta disciplina son: *Agent-Based Simulation*, *Agent-Based Computational Economics* (ACE) o *Multi-Agent Systems* (MAS).
- [4] Como se verá más adelante, nuestra aproximación metodológica al problema de investigación se aparta de los escasos modelos formales, de carácter matemático, que han abordado los procesos de sustitución tecnológica con múltiples alternativas (Peterka y Fleck, 1978; Marchetti y Nakicenovic, 1979) y también obviamente de los modelos binarios de reemplazo tecnológico (Fisher y Pry, 1971). Por esta razón, en beneficio de una exposición más clara y

directa de nuestra aproximación, hemos preferido no extendernos en su explicación. Para más información sobre estos modelos, véase por ejemplo Kwasnicky (1999b).

- [5] En los últimos años, la simulación se está convirtiendo en un popular medio para describir y explorar sistemas complejos, naturales y sociales (Hannerman y Patrick, 1997). El reconocimiento de que los fenómenos sociales y económicos frecuentemente muestran las características típicas de los sistemas complejos, entre ellas una significativa no-linealidad, es un desafío a los métodos tradicionales de investigación (Holland, 1998; Epstein y Axtell, 1996; Latané, 1996; Gilbert, 1995). Así, la simulación es propuesta como una nueva forma de realizar investigación, una «tercera disciplina científica» (Ilgen y Hulin, 2000; Axelrod, 1997), que complementa y se construye sobre los métodos tradicionales de la inducción y la deducción. Una importante rama de la simulación en las ciencias sociales es la basada en agentes (ABM)⁶, caracterizada por representar un número de agentes autónomos que interactúan entre sí y con su entorno, con escasa o ninguna coordinación central (Conte *et al.*, 1997; Epstein y Axtell, 1996; Gilbert y Troitzsch, 1999; Weiss, 1999). Así, las propiedades emergentes de un ABM (macro-comportamiento del sistema) son el resultado de procesos *bottom-up* (micro-interacción de los agentes del sistema) más que de procesos *top-down*. De acuerdo con Wooldridge y Jennins (1995), en el ABM los agentes son procesos computacionales que se caracterizan por su: i. autonomía, en el sentido que controlan sus propias acciones; ii. habilidad social, interactuando con los otros agentes mediante algún tipo de «lenguaje»; iii. reactividad, pueden percibir su entorno y responder a él; y iv. proactividad, de modo que son capaces de llevar a cabo acciones para alcanzar un objetivo. Es evidente que los agentes empresariales muestran en buena medida estas características, lo que hace del ABM una metodología apropiada para el estudio de fenómenos emergentes en los mercados. Queremos destacar que aunque el ABM emplea la simulación su meta no es necesariamente representar de modo preciso una aplicación empírica concreta, sino enriquecer nuestro entendimiento sobre los procesos fundamentales que pueden aparecer en diversas aplicaciones. Si este es el objetivo, la simplicidad en los supuestos y no la representación detallada de una realidad es lo importante (Axelrod, 1997).
- [6] El suponer un número finito de agentes en la industria da respuesta a una de las críticas al modelo de Arthur, entre ellas la de Dalle (1995), que cuestiona la validez de «[...] suponer que existe un número infinito de agentes, ya que la unanimidad no se obtiene más que en el límite, haciendo tender el tiempo y por lo tanto el número de agentes hasta el infinito. Nos parece que los sistemas económicos están más bien constituidos por un número finito de agentes, formando una red y aprovechando canales locales de información gracias a los cuales toman sus decisiones».
- [7] La asunción de una distribución de Poisson es realista y está bien establecida en la literatura para situaciones en las que numerosos eventos sucesivos (en este caso, entrada de empresas en el sector) tienen fuentes independientes (Mayer y Chappell, 1992: 772; Loch y Hubberman, 1999: 6)
- [8] De acuerdo con Kemp (1997: 221), las innovaciones en los procesos son habitualmente desarrolladas por proveedores especializados, instituciones investigadoras diferentes de las empresas productoras, mientras que las innovaciones en los productos suelen ser desarrolladas por estas últimas. El modelo presentado pretende recoger la difusión del primer

- tipo de innovación: nuevas tecnologías que modifican sustancialmente los procesos.
- [9] Véase Romer (1987), (1990); Aghion y Howitt (1992); Grossman y Helpman (1991).
- [10] Como se hace, por ejemplo, en Silveberg y Lehnert (1993), (1994).
- [11] De este modo, el modelo supera otra de las críticas habituales al modelo de Arthur: «(...) una hipótesis poco convincente es adoptada habitualmente en los modelos de competencia tecnológica. En el modelo de Arthur, por ejemplo, las tecnologías en competencia aparecen simultáneamente en un mercado virgen. Parece bastante más realista considerar una nueva tecnología entrando en un mercado dominado por una o varias tecnologías bien establecidas» (Moreau, 1999: 8).
- [12] «Aquellas tecnologías que no son preseleccionadas o fallan en acomodarse al sistema (...) están destinadas a fracasar y no sobrevivirán» (Arentsen *et al.*, 1999: 9). Una relajación de este supuesto podría efectuarse con facilidad si se acepta que las nuevas tecnologías que surgen en cada período son «versiones mejoradas» de las que han sido rechazadas por el mercado. Esto podría dar a pie a la introducción en el modelo de la cuestión del *learning-by-doing* y *learning-by-using* en el I+D (Jaffe *et al.*, 2000: 44) y a los modelos de «escaleras de calidad» (Sala-i-Martin, 1994: 113).
- [13] De acuerdo con David y Greenstein (1990: 30), las especificaciones orientadas al desempeño (*performance-oriented*) son generalmente preferibles a las especificaciones orientadas al diseño, especialmente en el desarrollo de estándares adelantados (*anticipatory standards*).
- [14] Siguiendo a la principal referencia en la literatura en esta cuestión, Rogers (1995: 206), los *atributos percibidos* de una innovación por sus potenciales usuarios explican en gran medida la tasa de adopción de tal innovación. Según este autor, entre el 49 y el 87 por ciento de la variación de la tasa de adopción es explicada por tan sólo cinco atributos: la *ventaja relativa* es el grado en el que una innovación es percibida como mejor que la idea que la precede (la percepción de la ventaja relativa de una innovación está positivamente relacionada con su tasa de adopción); la *compatibilidad* es el grado en que una innovación es percibida como consistente con los valores existentes, experiencias pasadas y necesidades de los potenciales adoptantes (percepción positivamente relacionada con la tasa de adopción); la *complejidad* es el grado en que una innovación es percibida como relativamente difícil de comprender y usar (percepción negativamente relacionada con la tasa de adopción); la *ensayabilidad* es el grado en que una innovación puede ser experimentada en una base limitada (percepción positivamente relacionada con la tasa de adopción); la *observabilidad* es el grado en que los resultados de una innovación son visibles para los otros (percepción positivamente relacionada con la tasa de adopción). Con respecto a la *sustentabilidad*, véase el apartado 6 de este documento.
- [15] La aproximación tradicional a la decisión de inversión en una tecnología (adopción) se ha centrado en la valoración por parte del adoptante de un único criterio, habitualmente su rentabilidad esperada. Sin embargo, es comúnmente aceptado que el desempeño de una tecnología es una construcción multi-dimensional (Anderson y Tushman, 1990: 627; Foray y Grübler, 1990; Suárez y Utterback, 1995: 418; Rogers, 1995: 206; Kemp, 1997: 88; Christensen, 1997; Windrum y Birchenhall, 1998: 114; Nelson, 2000: 70; Cantner y Hanusch, 2001: 229). Por lo tanto, parece razonable suponer que los empresarios toman sus decisiones de adopción tecnológica teniendo en cuenta múltiples dimensiones o atributos de una tecnología, valorando sus percepciones (imperfectas) sobre las mismas de acuerdo a sus preferencias (heterogéneas) respecto a cada dimensión o atributo.
- [16] Véase por ejemplo Arthur (1983, 1988, 1989); Laffond *et al.* (1999); Farrell y Saloner, (1986); Shy, (1996); Cowan, (1988).
- [17] Como se argumentó en el apartado 3, de acuerdo con Foster (1986: 96), una curva con forma de 'S' muestra con precisión cómo mejora el desempeño de una tecnología frente al esfuerzo empleado en su desarrollo. En la práctica, buena parte de este desarrollo es resultado de las economías del aprendizaje, que a su vez dependen del grado de implantación y la experiencia de los usuarios. Diferentes trabajos sugieren una función similar: Loch y Huberman (1999: 12); Windrum (2000: 12); Frenken y Verbart (1998).
- [18] Un supuesto similar es adoptado en Moreau (1999: 9), Laffond *et al.* (1999) o Loch y Huberman, (1999: 12).
- [19] Según Kemp (1997: 273), «Numerosos estudios históricos muestran que, en el momento de su introducción, las nuevas tecnologías estaban frecuentemente infra-desarrolladas en términos de sus características de desempeño y ofrecían escasas ventajas respecto a las tecnologías existentes. Necesitaban ser mejoradas, en términos tanto de precios como de características técnicas, para difundirse más ampliamente». De acuerdo con Rosenberg y Frischtak (1983: 147), «Las nuevas invenciones son típicamente muy primitivas en el momento de su nacimiento. Su desempeño es habitualmente pobre, comparado con las tecnologías (alternativas) existentes y con su futuro desempeño».
- [20] Queremos destacar que a pesar de que las fuentes de rendimientos crecientes sean diferentes (derivados del aprendizaje por el uso y por la práctica, los efectos de red, las economías de escala, los rendimientos crecientes de la información y las interrelaciones tecnológicas), suelen abordarse matemáticamente en conjunto (Nelson, 1995: 74; David y Greenstein, 1990: 6; Cabral, 1987; Metcalfe, 1994: 937).
- [21] Por otra parte, en la simulación, un valor de $\tilde{r} > 0$, para toda T_j , nos permitiría representar una situación de rendimientos decrecientes de la adopción, mientras que con $\tilde{r} = 0$ (y $\sigma_i = 0$), para toda T_j , estaríamos ante rendimientos constantes de la adopción.
- [22] Rogers (1995: 206), argumenta que los *atributos percibidos* de una innovación por sus potenciales usuarios explican en gran medida la tasa de adopción de tal innovación. Frenken y Verbart (1998) destacan que la rentabilidad de una adopción tecnológica probablemente depende de su utilidad *percibida* en llevar a cabo cierta tarea o en resolver un problema en particular.
- [23] Abrahamson y Rosenkopf (1993)
- [24] Anteriormente argumentamos que a medida que crece el número de adoptantes de una determinada tecnología se reduce la incertidumbre y tanto los usuarios como los productores perciben un menor riesgo e incrementan su confianza sobre la calidad, desempeño y permanencia de dicha tecnología (Arthur, 1991). Al tiempo, el incremento en el número de usuarios reduce el coste de búsqueda de la información (Blackman, 1999).

- [25] Antes de tomar la decisión de adoptar o no una alternativa tecnológica, los potenciales usuarios disponen de una información limitada e imperfecta respecto al desempeño real de la misma. Es un hecho ampliamente aceptado que las expectativas de los agentes respecto a la difusión de una tecnología afectan a su decisión de adquirirla o invertir en ella (Katz y Shapiro, 1985: 426; Farrell y Saloner, 1986: 941; David y Greenstein, S., 1990: 7; Loch y Huberman, 1999; Mulder *et al.*, 1999: 9). A pesar de este consenso, la mayoría de modelos de cambio tecnológico tienen como eje fundamental de su dinámica los cambios en el desempeño real de las tecnologías (si es que no lo consideran constante). El modelo aquí propuesto realiza una aproximación alternativa y más realista, poniendo el foco en los cambios en las *percepciones* que tienen los potenciales usuarios sobre el desempeño real de las alternativas tecnológicas. Como sucede en la realidad, en el modelo tales percepciones sobre una tecnología mejoran con la experiencia del mercado, confluyendo en el desempeño real a medida que se incrementa su número de usuarios.
- [26] Respondiendo a la crítica de Dalle (1995) al modelo de Arthur, el modelo aquí planteado no exige que el potencial adoptante conozca el *número exacto* de usuarios de cada tecnología, sino que introduce la ventaja de la tecnología con un mayor número de usuarios a través de una función que refleja su mejor desempeño real [4] y de una función que recoge su menor incertidumbre [5] en torno a tal desempeño real en los desempeños percibidos por parte de los productores.
- [27] David y Greenstein, 1990: 6.
- [28] De acuerdo con Nelson (1995: 50), «No hay una diferencia real entre decir que las empresas literalmente maximizan, y decir que sus comportamientos han sido aprendidos mediante prueba, error, y corrección, y en algunos casos han sido seleccionados a través del proceso competitivo. De este modo, los agentes actúan ‘como si’ maximizaran». Siguiendo esta aproximación, por ejemplo Loch y Huberman (1999: 5) asumen que «[...] los agentes se rigen por el beneficio pero son incapaces de optimizar debido a su racionalidad limitada. [bajo este supuesto] Los agentes simplemente eligen ‘la mejor’ de las tecnologías disponibles, sin ser capaces de una evaluación perfecta o de anticipar el equilibrio del sistema».
- [29] Dicho de otro modo, cada agente se adhiere a una «población tecnológica», en el sentido de Saviotti (2000: 200), que evoluciona en términos cuantitativos (tamaño) y cualitativos (composición).
- [30] Aplicamos un simple método de suma (lineal) ponderada (véase por ejemplo Pomeroy y Barba-Romero, 2000: 76).
- [31] En la simulación, esta condición (*para $J_i > 2$ tecnologías*) operará tan sólo durante los primeros momentos tras el «nacimiento» de la industria, puesto que con un número de tecnologías reducido (< 2) el que una de ellas consiga más del 50% de los adoptantes puede ser resultado del azar (*first mover advantage*), más que de su propio mérito. Sin embargo, si más adelante en el tiempo se diera la circunstancia de que durante el dominio de una tecnología el resto de alternativas se redujera, o incluso desapareciera, no tendría sentido que el incumplimiento de esa condición (*para $J_i > 2$ tecnologías*) hiciera perder a dicha tecnología el reconocimiento de *estándar*, ganado, esta vez sí, por mérito propio.
- [32] Nelson (1995: 64) define el «*fitness*» de una tecnología como su capacidad para resolver mejor un problema tecnológico concreto; Saviotti (2001: 207) como su capacidad para adaptarse a entorno en el que opera.
- [33] Tal y como ha sido diseñado, este modelo permite al analista introducir fácilmente las condiciones de partida del experimento. Es posible modificar tanto la magnitud de los parámetros iniciales que describen la industria (tasa de innovación, barreras de entrada, tasa de rendimientos crecientes, etc.) como las condiciones generales del experimento (número de dimensiones de la tecnología, número de iteraciones por simulación y número de simulaciones por experimento). Asimismo, permite guardar y volver a utilizar bajo diferentes condiciones una determinada «semilla aleatoria» (*random seed*). Además de experimentar con un «escenario base», es posible realizar con facilidad múltiples análisis de sensibilidad sobre los diferentes parámetros del modelo. Por último, el modelo propuesto genera una amplia batería de gráficos y tablas numéricas que registran las trayectorias y recogen de modo detallado las diferentes perspectivas del proceso de cambio tecnológico que nos interesa estudiar. Por supuesto, se puede solicitar al autor el código fuente del modelo, junto con la información técnica correspondiente la estructura modular del programa, la nomenclatura y descripción de las variables del modelo, así como las rutinas que contiene.
- [34] El número adjunto a la palabra «estándar» corresponde al identificador de la tecnología en cuestión, y es coincidente con su orden de aparición en la historia de la industria representada.
- [35] Se tomaron 5 valores para cada parámetro analizado y se ejecutaron 30 simulaciones para cada valor (en total, 150 simulaciones por cada análisis), manteniendo invariables el resto de parámetros y la semilla aleatoria en todas las simulaciones.

ANEXO 1
EXPRESIONES MATEMÁTICAS INCLUIDAS EN LOS SUPUESTOS DEL MODELO

$$f(I_t) = \frac{(e^{-\lambda_t} \cdot \lambda_t^{I_t})}{I_t!}, I_t = 1, 2, \dots, I \quad [1]$$

$$f(J_t) = \frac{(e^{-\lambda_t} \cdot \lambda_t^{J_t})}{J_t!}, J_t = 1, 2, \dots, J \quad [2]$$

$$\overline{D}_j(C_{A1}^j, C_{A2}^j, C_{A3}^j, C_{A4}^j, C_{A5}^j) \quad [3]$$

$$C_{Akt}^j = f(I_t^j) = \frac{\widehat{C}_{Ak}^j}{1 + \left(\left[\widehat{C}_{Ak}^j - C_{Ak_0}^j \right] / C_{Ak_0}^j \right) \cdot e^{-\lambda_t^j I_t^j}} \quad [4]$$

$$\sigma_{Akt}^j = g(I_t^j) = \frac{1}{1 + C \cdot I_t^j} \quad [5]$$

$$\text{Max } U_t^j = w_1^j \cdot C_{A1t}^j + w_2^j \cdot C_{A2t}^j + w_3^j \cdot C_{A3t}^j + w_4^j \cdot C_{A4t}^j + w_5^j \cdot C_{A5t}^j \quad [6]$$

ANEXO 2
RESULTADOS DEL MODELO EN EL ESCENARIO BASE A TRAVÉS DE LA MUESTRA DE LAS 10 PRIMERAS SIMULACIONES

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
SIM	ID_ST	TST	TFST	CA01	CA02	CA03	CA04	CA05	FIT_ST	FIT_BAT	ID_BAT	FST	VST	DST	PST	ID_TRET	TR	DCO	DCD
1	1	3	50	0,254	0,451	0,101	0,157	0,329	0,650	0,692	3	1	0	47	0,988				
2	1	2	50	0,058	0,422	0,478	0,366	0,269	0,716	0,576	2	1	0	48	0,989				
3	2	2	11	0,469	0,390	0,272	0,370	0,397	0,722	0,674	3	3	1	9	0,847	9	12	-2,425	6,722
3	9	16	20	0,443	0,127	0,416	0,041	0,190	0,488	0,769	8	3	11	4	0,667	17	24	-2,425	3,307
3	9	47	50	0,443	0,127	0,416	0,041	0,190	0,508	0,866	28	3	40	3	0,688				
4	3	4	10	0,191	0,410	0,134	0,350	0,292	0,746	0,723	5	2	3	6	0,667	12	9	1,980	4,213
4	14	16	19	0,464	0,412	0,155	0,082	0,178	0,679	0,746	3	2	4	3	0,730	20	20	1,980	2,228
6	1	28	34	0,244	0,264	0,440	0,185	0,208	0,499	0,781	14	2	27	6	0,713				
6	1	35	43	0,244	0,264	0,440	0,185	0,208	0,499	0,781	14	2	34	8	0,713				
7	13	15	18	0,188	0,282	0,405	0,418	0,486	0,579	0,699	2	1	4	3	0,667	20	24	56,295	6,936
8	2	2	6	0,497	0,248	0,201	0,147	0,476	0,766	0,731	4	1	1	4	0,907	6	5	-5,472	2,659
9	4	7	10	0,145	0,089	0,252	0,394	0,082	0,670	0,751	5	1	4	3	0,733	5	10	-2,368	5,021
10	1	21	32	0,261	0,144	0,388	0,124	0,333	0,538	0,782	8	2	20	11	0,737				
10	1	44	50	0,261	0,144	0,388	0,124	0,333	0,538	0,782	8	2	41	6	0,737				
...

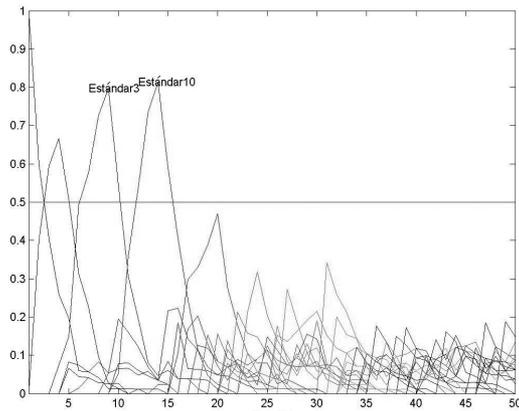
Correspondencia entre las abreviaturas de la tabla y las variables del modelo

Modelo		Modelo	
SIM	Número de simulación	VST	Velocidad (v^{jST})*
ID_ST	Identificador del estándar	DST	Duración (d^{jST})
TST	Aparición del estándar (t_0^{jST})	PST	Profundidad (p^{jST})
TFST	Final del estándar	ID_TRET	Identificador de la tecnología retardora
CA01	Desempeño inicial de T^{jST} en el criterio de adopción 1 ($C_{Ak_0}^{jST}, k = 1$)	TR	Tiempo de reemplazo (t_r)
CA02	Idem $k = 2$	DCO	Debilidad frente a cambios en la oferta (dco^{jST})*
CA03	Idem $k = 3$	DCD	Debilidad frente a cambios en la demanda (dcd^{jST})*
CA04	Idem $k = 4$		
CA05	Idem $k = 5$		
FIT_ST	<i>Fitness</i> (F_i) del estándar en t_0^{jST}		
FIT_BAT	<i>Fitness</i> (F_i) de la BAT en t_0^{jST}		
ID_BAT	Identificador de la BAT		
FST	Frecuencia de estándares en la simulación (f^{jST})		

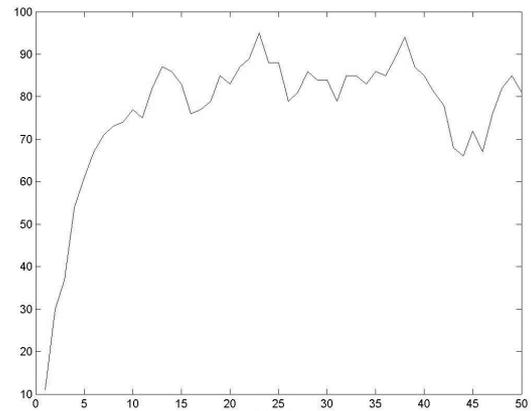
* Nota: una mayor cifra indica un menor valor de esta magnitud

ANEXO 3
CARACTERIZACIÓN GRÁFICA DE UNA SIMULACIÓN TÍPICA DEL MODELO

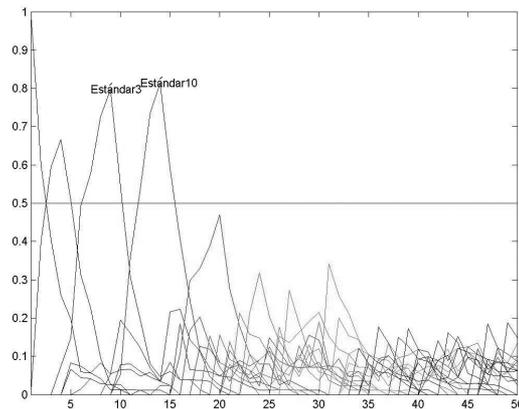
Evolución de cuotas de mercado frente a t sin agencia



Evolución de número de productores frente a t



Evolución del número de tecnologías frente a t



BIBLIOGRAFÍA

ABRAHAMSON, E. y ROSENKOPF, L. (1997), «Social network effects on the extent of innovation diffusion: A computer simulation», *Organization Science*, 8(3): 289-309.

AFUAH, A. (1998), *Innovation Management: Strategies, Implementation and Profits*, Oxford University Press, New York.

ANDERSON, P. y TUSHMAN, M.L. (1990), «Technological discontinuities and dominant designs: A cyclical model of technological change», *Administrative Science Quarterly*, 35: 604-633.

ARENSEN, M.J., DINICA, V. y MARQUART, E. (1999), «Innovating innovation policy: Rethinking green innovation policy in evolutionary perspective», Communication to the European Meeting on Applied Evolutionary Economics, 7-9 June, Grenoble, France.

ARROW, K.J. (1962), «The economic implications of learning-by-doing», *Review of Economic Studies*, 29: 155-173.

ARTHUR, W.B. (1989), «Competing technologies, increasing

returns and lock-in by historical events», *Economic Journal*, 99: 116-131.

ARTHUR, W.B. (1990), «Positive feedbacks in the economy», *Scientific American*, February: 92-99.

ARTHUR, W.B. (1991), «Information constriction and information contagion», Working Paper, 91-05-026, Santa Fe Institute, Santa Fe.

ARTHUR, W.B. (1994), *Increasing Returns and Path Dependence in the Economy*, The University of Michigan Press, Ann Arbor.

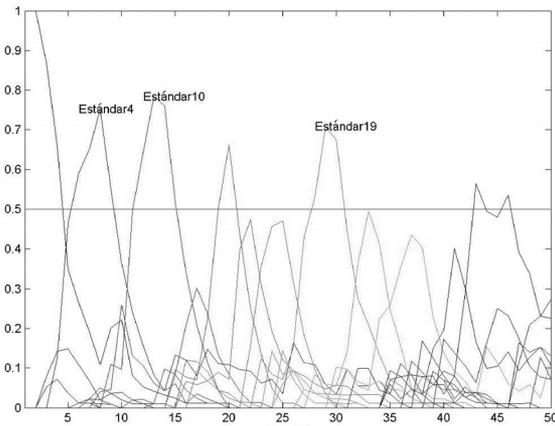
AUSUBEL, J.H. (1989), «Regularities in technological development: An environmental view», en Ausubel, J. y Sladovich, H. (eds.), *Technology and Environment*, National Academy Press, Washington D.C.

AXELROD, R. (1997), «Advancing the art of simulation in the social sciences», *Complexity*, 3(2): 16-22.

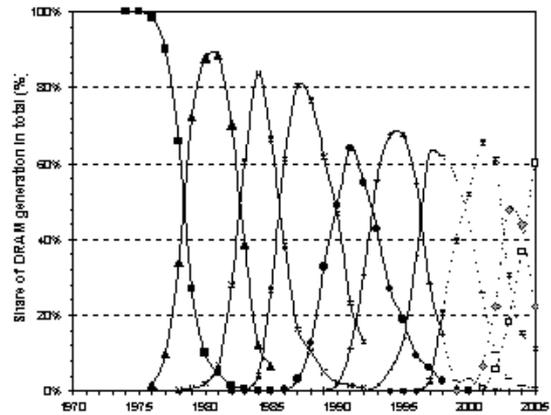
BANNERJEE, A. (1992), «A simple model of herd behavior», *Quarterly Journal of Economics*, 107: 797-817.

ANEXO 5
ISOMORFISMO VISUAL DE LOS RESULTADOS DEL MODELO CON PATRONES DE SUCESIÓN
Y ESTANDARIZACIÓN TECNOLÓGICA EN DIFERENTES INDUSTRIAS

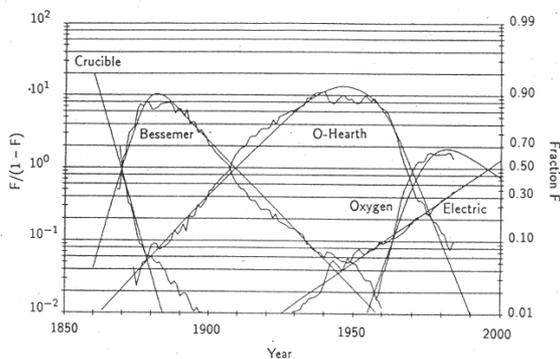
Resultado típico del modelo en el escenario base



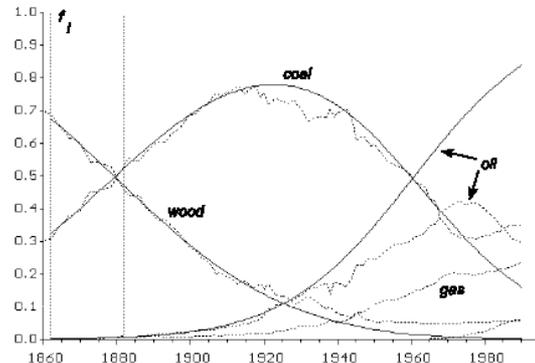
Tecnología de RAM (Nadejda y Ausubel, 2002)



Tecnologías de producción de acero (Grübler, 1991)



Tecnologías de producción de energía (Kwasnicki, 1999b)



BIKHCHANDANI, S., HIRSCHLEIFER, D. y WELCH, I. (1992), «A theory of fads, fashion, custom and cultural change as informational cascades», *Journal of Political Economy*, 100: 992-1026.

BIKHCHANDANI, S., HIRSCHLEIFER, D. y WELCH, I. (1998), «Learning from the behaviour of others: Conformity, fads and informational cascades», *Journal of Economic Perspectives*, 12: 151-170.

BLACKMAN, A. (1999), «The economics of technology diffusion: Implications for climate policy in developing countries», Discussion Paper 99.42, Resources for the Future, Washington, D.C.

BUESA, M. y MOLERO, J. (1998), *Economía Industrial de España: Organización Tecnología e Internacionalización*, Editorial Civitas, Madrid.

CABRAL, L. (1987), «On the adoption of innovations with 'network' externalities», Center for Economic Policy Research, Technical Paper Number 97, Stanford University.

CANTNER, U. y HANUSCH, H. (2001), «Heterogeneity and evolutionary change: Empirical conception, findings and unresolved issues», en Foster, J. y Metcalfe, J.S. (eds.), *Frontiers of Evolutionary Economics*, Edward Elgar, Cheltenham, UK, Northampton, MA, USA: 228-267.

CHRISTENSEN, C.M. (1997), *The Innovator's Dilemma*, HBS Press, Boston, MA.

CONTE, R., HEGESELMAN, R. y TERNA, P. (eds.) (1997), «Simulating Social Phenomena», en *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Springer, Berlin.

COWAN, R. (1988), «A simple model of sequential technological choice», Department of Economics, New York University (mimeo).

COWAN, R. (1990), «Nuclear power reactors: A study in technological lock-in», *Journal of Economic History*, 50: 541-567.

COWAN, R. y HULTEN, S. (1996), «Escaping lock-in: The case of the electric vehicle», *Technological Forecasting and Social Change*, 53: 61-79.

DALLE, J.M. (1995), «Dynamiques d'adoption, coordination et diversité: la diffusion des standards technologiques», *Revue économique*, 46(4): 1081-1098.

DAVID, P.A. (1969), «A contribution to the Theory of Diffusion», Memorandum 71, Stanford University: Centre for Research in Economic Growth.

DAVID, P.A. (1985), «Clio and the economics of QWERTY», *The American Economic Review*, 75(2): 332-337.

DAVID, P.A. (1987), «Some new standards for the economics of standardization in the information age», en Dasgupta, P. y Stoneman, L. (eds.), *The Economic Theory of Technology Policy*, Cambridge University Press, London.

- DAVID, P.A. (1989), «Path dependence and predictability in dynamic systems with local network externalities: A paradigm for historical economics», High Technology Impact Program Working Paper, Center for Economic Policy Research, Stanford University.
- DAVID, P.A. (1997), «Path Dependence and the Quest for Historical Economics: One More Chorus in the Ballad of QWERTY», *Discussion Papers in the Economic and Social History*, 20, University of Oxford.
- DAVID, P.A. y GREENSTEIN, S. (1990), «The economics of compatibility standards: An introduction to recent research», *Economics of Innovation and New Technology*, 1: 3-41.
- DAVIES, S. (1979), *The Diffusion of Process Innovations*, Cambridge University Press, Cambridge.
- DE VANY, A. y WALLS, W. (1996), «Bose-Einstein dynamics and adaptive contracting in the motion picture industry», *Economic Journal*, 106: 1493-1514.
- DOSI, G. (1982), «Technological paradigms and technological trajectories», *Research Policy*, 11: 147-162.
- DOSI, G., FREEMAN, C., NELSON, R., SILVERBERG, G. y SOETE, L. (eds.) (1988), *Technical Change and Economic Theory*, Pinter, London.
- DRUCKER, P. (1993), *Innovation and Entrepreneurship*, HarperBusiness, New York.
- ECONOMIDES, N. (1996), «The economics of networks», *International Journal of Industrial Organization*, 14.
- EPSTEIN, J.M. y AXTELL, R. (1996), *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*, MIT Press, Cambridge, MA.
- FARRELL, J. y SALONER, G. (1986a), «Installed base and compatibility: Innovation, product preannouncements, and predation», *The American Economic Review*, 76(5): 940-955.
- FARRELL, J. y SALONER, G. (1986b), «Standardization and Variety», *Economic Letters*, 20: 71-74.
- FISHER, J.C. y PRY, R.H. (1971), «A simple substitution model of technological change», *Technological Forecasting and Social Change*, 20: 199-213.
- FORAY, D. y GRÜBLER, A. (1990), «Morphological analyses, diffusion and lock-out of technologies: Ferrous casting in France and FRG», *Research Policy*, 19: 535-550.
- FOSTER, R.N. (1986), *Innovation: The Attacker's Advantage*, MacMillan, London.
- FREEMAN, C. (1996), «The greening of technology and models of innovation», *Technological Forecasting and Social Change*, 53: 27-39.
- FRENKEN, K. y VERBART, O. (1998), «Simulating paradigm shifts using a lock-in model», en Ahrweiler, P. y Gilbert, N. (eds.), *Computer Simulation in Science and Technology Studies*, Springer-Verlag, Berlin.
- GILBERT, N. (1995), «Computer simulation of social processes», *Social Research Update*, 6, University of Surrey.
- GILBERT, N. y TROITZSCH, K.G. (1999), *Simulation for the Social Scientist*, Open University Press, London.
- GOMULKA, S. (1990), *The Theory of Technological Change and Economic Growth*, Pinter Publishers, London.
- GORT, M. y KEPLER, S. (1982), «Time paths in the diffusion of product innovations», *Economic Journal*, 92: 630-653.
- GRILICHES, Z. (1957), «Hybrid corn: An exploration in the Economics of Technological Change», *Econometrica*, 25: 501-522.
- GROVE, A. (1996), *Only the Paranoid Survive*, Doubleday, New York.
- GRÜBLER, A. (1990), *The Rise and Fall of Infrastructures*, Springer, Heidelberg.
- GRÜBLER, A. (1991), «Diffusion: Long patterns and discontinuities», *Technological Forecasting and Social Change*, 39: 159-180.
- HANNERMAN, R.A. y PATRICK, S. (1997), «On the uses of computer-assisted simulation modeling in the social sciences», *Sociological Research Online*, 2(2).
- HOLLAND, J.H. (1998), *Emergence: From Chaos to Order*, Addison Wesley, MA.
- ILGEN, D.R. y HULIN, C.L. (eds.) (2000), *Computational Modeling of Behavior Organizations: The Third Scientific Discipline*, American Psychological Association, Washington D.C..
- JAFFE, A.B., NEWELL, R.G. y STAVINS, R.N. (2000), «Technological change and the environment», Discussion Paper 00-47, Resources for the Future, Washington D.C..
- KATZ, M.L. y SHAPIRO, C. (1985), «Network externalities, competition and compatibility», *The American Economic Review*, 75(3): 424-440.
- KATZ, M.L. y SHAPIRO, C. (1986a), «Product compatibility choice in a market with technological progress», *Oxford Economic Papers*, 38 (Supplement): 146-165.
- KATZ, M.L. y SHAPIRO, C. (1986b), «Technology adoption in the presence of network externalities», *Journal of Political Economy*, 94(4): 822-841.
- KEMP, R. (1997), *Environmental Policy and Technical Change*, Edward Elgar, Cheltenham, UK - Brookfield, US.
- KLEIJNEN, J.P.C. (1998), «Validation of simulation, with and without real data», Department of Information Systems and Auditing (BIKA) / Center for Economic Research (CentER), Tilburg University.
- KLEPPER, S. y SIMONS, K.L. (1997), «Technological extinctions of industrial firms: An inquiry into their nature and causes», *Industrial and Corporate Change*, 6(2): 379-460.
- KWASNICKI, W. (1999), «Technological substitution processes: An evolutionary model», Institute of Industrial Engineering and Management, Wrocław University of Technology.
- LAFFOND, G., LESOURNE, J. y MOREAU, F. (1999), «Interaction between public policies and technological competition under environmental risks», en U. Cartner, H. Hanusch y S. Klepper (eds.), *Economic Evolution, Learning and Complexity*, Springer Verlag, Heilderberg.
- LATANÉ, B. (1996), «Dynamic social impact: Robust predictions from simple theory», en Hegselmann, R., Mueller, U. y Troitzsch, K. (eds.), *Modeling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View*, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.
- LEE, J.R., O'NEAL, D.E., PRET, M.W. y THOMAS, H. (1995), «Planning for dominance: A strategic perspective on the emergence of a dominant design», *R&D Management*, 25(1): 3-25.
- LIPSEY, R.G. y CARLAW, K. (1998), «Technology policies in neo-classical and structuralist-evolutionary models», *STI Review*, 22: 31-73.
- LOCH, C.H. y HUBERMAN, B.A. (1999), «A punctuated-equilibrium model of technology diffusion», *Management Science*, 45(2): 160-177.
- MANSFIELD, E. (1961), «Technical change and the rate of imitation», *Econometrica*, 29: 741-765.
- MANSFIELD, E. (1968), *Industrial Research and Technological Innovation*, W.W. Norton, New York.
- MARCHETTI, C. y NAKICENOVIC, N. (1979), «The dynamics of energy system and logistic substitution model», RR-79-13, IIASA, Laxenbug, Austria.
- MARNEY, J.P. y TARBERT, F.E. (2000), «Why do simulation? Towards a working epistemology for practitioners of the dark arts», *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 3(4).
- MATA, J. y PORTUGAL, P. (1994), «Life duration of new firms», *The Journal of Industrial Economics*, XLII(3): 227-243.
- MAYER, W.J. y CHAPPELL, W.F. (1992), «Determinants of Entry and Exit: An Application of the Compounded Bivariate Poisson Distribution to U.S. Industries, 1972-1977», *Southern Economic Journal*, 58(3): 770-778.
- METCALFE, J.S. (1994), «Evolutionary economics and technology policy», *The Economic Journal*, 104: 931-944.
- MOLERO, J. (1994), «Desarrollos actuales de la teoría del cambio tecnológico: Tipologías y modelos organizativos», *Información Comercial Española*, 726: 7-22.
- MOREAU, F. (1999), «The role of the State in an Evolutionary Microeconomics», *Working Paper du Laboratoire d'Économétrie*, n°99-1, Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris.
- MULDER, P., RESCHKE, C.H. y KEMP, R. (1999), «Evolutionary Theorising on Technological Change and Sustainable Development», *European Meeting on Applied Evolutionary Economics*, 7-9 June, Grenoble, France.

- NADEJDA, M.V. y AUSUBEL, J.H. (2002), «DRAM as model organisms for study of technological evolution», *Technological Forecasting and Social Change*, 69(3): 243-262.
- NELSON, R.R. (1994), «The coevolution of technologies and institutions», en England, R.W. (ed.), *Evolutionary Concepts in Contemporary Economics*, University of Michigan, Ann Arbor.
- NELSON, R.R. (2000), «Selection criteria and selection processes in cultural evolution theories», en Ziman, J. (ed.) *Technological Innovation as an Evolutionary Process*, Cambridge University Press: 66-74.
- NELSON, R.R. y WINTER, S.G. (1974), «Neo-classical vs. Evolutionary theories of economic growth», *Economic Journal*, 84: 886-905.
- NELSON, R.R. y WINTER, S.G. (1977), «In search of useful theory of innovation», *Research Policy*, 6: 36-37.
- NELSON, R.R. y WINTER, S.G. (1982), *An Evolutionary Theory of Economic Change*, Harvard University Press, Cambridge, MA.
- PETERKA, V. y FLECK, F. (1978), «The dynamics of energy systems and logistic substitution model, Volume 2: Theoretical part», Administrative Report AR-78-1C, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria .
- POMEROL, J.C. y BARBA-ROMERO, S. (2000), *Multicriterion Decision in Management: Principles and Practice*, Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London.
- RIP, A. y KEMP, R. (1998), «Technological change», en Rayner, S. y Malone, L. (eds.) *Human Choice and Climate Change*, Vol.2 Resources and Technology, Batelle Press, Washington, D.C.: 327-400.
- ROGERS, E.M. (1995), *Diffusion of Innovations* (4th Ed.), The Free Press, NY.
- ROSENBERG, N. y FRISCHTAK, C. (1983), «Long waves and economic growth: A critical appraisal», *The American Economic Review – Paper and Proceedings* (May).
- RUTAN, V.W. (1997), «Induced innovation, Evolutionary Theory and path dependence: Sources of technical change», *Economic Journal*, 107: 1520-1529.
- SALA-I-MARTÍN, X. (1994), *Apuntes de Crecimiento Económico*, Antoni Bosch, Barcelona.
- SAVIOTTI, P.P. (2001), «Considerations about a production system with qualitative change», en Foster, J. y Meitcalfe, J.S. (eds.), *Frontiers of Evolutionary Economics*, Edward Elgar, Cheltenham, UK, Northampton, MA, USA.
- SCHILLING, M.A. (1998), «Technology lockout: An integrative model of the economic and strategic factors driving technology success and failure», *Academy of Management Review*, 23(2): 267-284.
- SCHILLING, M.A. (2002), «Technology success and failure in winner-take-all markets: The impact of learning orientation, timing, and network externalities», *Academy of Management Review*, 45(2): 387-398.
- SCHUSTER, P. y SIGMUND, K. (1983), «Replicator dynamics», *Journal of Theoretical Biology*, 100: 535-538.
- SHESHINSKI, E. (1967), «Optimal accumulation with learning by doing», en Shell, K. (ed.), *Essays on the Theory of Optimal Economic Growth*, MIT Press, Cambridge MA: 31-52.
- SHY, O. (1996), «Technology revolutions in the presence of network externalities», *International Journal of Industrial Organization*, 14: 785-800.
- SILVERBERG, G. y LEHNERT, D. (1993), «Long waves and 'evolutionary chaos' in a simple Schumpeterian model of embodied technical change», *Structural Change and Economic Dynamics*, 4: 9-37.
- SILVERBERG, G. y LEHNERT, D. (1994), «Growth fluctuations in an evolutionary model of creative destruction», en Silverberg, G. y Soete, L. (eds.), *The Economics of Growth and Technical Change*, Edward Elgar, Aldershot.
- STONEMAN, P. (1983), *The Economic Analysis of Technological Change*, Oxford University Press, New York.
- STONEMAN, P. (1986), «Technological diffusion: The viewpoint of Economic Theory», *Ricerche Economiche*, 40: 585-606.
- SUÁREZ, F.F. y UTERBACK, J.M. (1995), «Dominant Designs and the Survival of Firms», *Strategic Management Journal*, Vol. 16: 415-430.
- TEGARDEN, L.F., ECHOLS, A.E., y HATFIELD, D.E. (2000), «The value of patients and start-up firms: A re-examination of entry timing for emerging markets», *Entrepreneurship Theory and Practice*, 24(4): 41-58.
- UNRUH, G. (2000), «Understanding carbon lock-in», *Energy Policy*, 28(12): 817-830.
- WEISS, G. (ed.) (1999), *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*, MIT Press, Cambridge, MA.
- WINDRUM, P. y BIRCHENHALL, C. (1998), «Is product life cycle theory a special case? Dominant designs and the emergence of market niches through coevolutionary-learning», *Structural Change and Economic Dynamics*, 9: 109-134.
- WINDRUM, P. y BIRCHENHALL, C. (2000), «Modelling technological successions in E-Commerce», MERIT/Infonomics, University of Maastricht.
- WITT, U. (1997), «'Lock-in' vs. 'critical masses': Industrial change under network externalities», *International Journal of Industrial Organization*, 15: 757-773.
- WOOLDRIDGE, S. y JENNINGS, N.R. (1995), «Intelligent agents: Theory and practice», *Knowledge Engineering Review*, 10(2): 115-152.