

Análisis de eficiencia de institutos tecnológicos de España y Brasil: una aplicación del análisis envolvente de datos (DEA)

Analysis of efficiency of technological institutes of Spain and Brazil: an application of the data envelopment analysis (DEA)

*Cássia Viviani Silva Santiago*¹ e *Antonio Francisco Ramirez de Arellano Serna*²

Resumen

La transferencia y comercialización de tecnología desde los Institutos Tecnológicos (ITs) a las empresas es un tema de gran interés para el desarrollo de los sistemas nacionales de innovación. La identificación de aquellos institutos que consiguen la máxima eficiencia en su papel de transferir tecnología a las empresas, las características de estos institutos y cómo utilizan sus *inputs* (presupuestos, investigadores, recursos para transferencia tecnológica, dotación de personal administrativo, etc.) para la consecución de unos *outputs* directamente ligados a la investigación y las relaciones contractuales con empresas, resulta muy interesante cuando se desea impulsar el proceso de transferencia y comercialización de tecnología de un sector, una región o un país. La evaluación DEA construye una frontera de eficiencia con aquellas observaciones de mayor rendimiento relativo. En nuestra análisis el modelo DEA localiza en la curva-frontera únicamente los ITs que exhiben los niveles más altos de productividad; muestra para cada IT juzgado como ineficiente las razones de ese status; y finalmente, produce una serie de objetivos que permitirían reconducir las situaciones de bajo rendimiento. El artículo pretende mostrar una visión clara de cuales son los ITs españoles y brasileños considerados eficientes y que actuaciones pueden llevarse a cabo para invertir la situación y reducir las bolsas de ineficiencia identificadas en el sector. Los resultados informan de las características de ITs representativos de la eficiencia técnica e identifican prioridades alternativas entre objetivos. Asimismo, los resultados muestran una amplia heterogeneidad en niveles de eficiencia entre ITs y por consiguiente, un significativo ámbito de mejora y de revisión de actividades.

Palabras-clave: DEA. Institutos tecnológicos. Eficiencia.

Abstract

The transfer and technology commercialization from Technological Institutes (TIs) to companies are a topic of great interest for the development of the national systems of innovation. The identification of those institutes that get the maximum efficiency in its paper of transferring technology to companies, the characteristics of these institutes and how they use their inputs (budgets, investigators, resources for technological transfer, administrative personnel's endowment, etc.) for the attainment of some outputs directly bound to the investigation and the contractual relationships with companies is very interesting, specially when someone wants to impel himself to the transfer process and commercialization of technology of a sector, a region or a country. The evaluation DEA builds a frontier of efficiency with those observations of more relative yield. In our analysis the pattern DEA only locates in the curve-frontier the TI's that exhibit the highest levels of productivity; shows for each TI judged as inefficient the reasons of that status; and finally, a series of objectives that would allow re-conduct the situations of low performances. The article seeks to show a clear vision of which are the Spanish and Brazilian TI's considered efficient and which measure can be carried out to reverse the situation and to reduce the lags of identified inefficiencies in the sector. The results inform the characteristics of representative TI's of the technical efficiency and identify alternative priorities among objectives. Also, the results show a wide heterogeneity in levels of efficiency among TI's and consequently, a significant environment of improvement and of revision of activities.

Keywords: DEA. Technological institutes. Efficiency.

¹ cassia.viviani@ufjf.edu.br- Universidade Federal de Juiz de Fora - cassia.viviani@ufjf.edu.br

² ramirezdearellano@telefonica.net- SOIKOS Consulting

1 Introducción

Los institutos de investigación y tecnología son un componente básico de un sistema nacional de innovación. Su propia dinámica se basa en la obtención, mantenimiento y abastecimiento de tecnologías y servicios tecnológicos al tejido industrial. La innovación tecnológica es la principal fuente de ventaja competitiva de las empresas y por lo tanto, del crecimiento económico. Sin embargo, la incertidumbre y los altos costes asociados al proceso innovador representan barreras insalvables para las pequeñas y medianas empresas a la hora de invertir en I+D. Las administraciones públicas, a través de la creación de Institutos Tecnológicos, pretenden incentivar la innovación y posterior transferencia tecnológica en beneficio del sector empresarial y en base a las externalidades que se generan en el sistema económico nacional. Sin embargo, la creación y operatividad de los Institutos Tecnológicos de titularidad pública es una condición necesaria pero no suficiente para el avance técnico industrial. Una serie de aspectos podrían afectar a un proceso óptimo de transferencia tecnológica. En primer lugar, no siempre existe compatibilidad entre los objetivos perseguidos por las Instituciones Tecnológicas y el sector empresarial; el avance científico y su aplicación práctica podrían no ir de la mano. En segundo lugar, el grado de flexibilidad de los Institutos Tecnológicos para adaptarse a la velocidad del cambio tecnológico y a las necesidades específicas de las empresas es en ocasiones muy limitado. En tercer lugar, el mercado de transferencia tecnológica se caracteriza por su opacidad que impide una correcta identificación de la oferta existente, y dificultades para asimilar la carga de conocimiento transferida. Por otra parte, el proceso actual de globalización que exige un mayor dinamismo tecnológico, y la necesidad de alternativas de financiación (privadas) para inversiones en I+D presiona a los sistemas de innovación nacionales a revisar y reconducir su rendimiento actual. El resultado de nuestra revisión bibliográfica nos permite indicar que no existen estudios sistemáticos sobre el papel jugado por los Institutos Tecnológicos en el proceso de transferencia tecnológica dentro de un sistema nacional de innovación. Asimismo, la Comunidad Europea en 1998 llevó a cabo un estudio sobre las prácticas de auditoría y evaluación de rendimiento interno en Institutos Tecnológicos localizados en 8 países miembros. En Francia, representando el más alto nivel, únicamente un 25% de sus instituciones de innovación tecnológica habían llevado a cabo actividades de auditoría, evaluación y benchmarking. Lo anterior sugiere que la evaluación del rendimiento de los Institutos Tecnológicos en su proceso de transferencia tecnológica a las pequeñas y medianas empresas (Pymes) es un campo inexplorado.

La investigación que se propone en este artículo debe considerarse como una primera aproximación para analizar el desempeño de los Institutos Tecnológicos de titularidad pública. Nuestro planteamiento reside en evaluar la eficiencia técnica relativa de Institutos Tecnológicos públicos de España y Brasil. En particular, se pretende investigar los siguientes aspectos: características de los Institutos Tecnológicos españoles que se identifican con un alto rendimiento; grado de discriminación entre los objetivos de producción científica y capacidad contractual con las Pymes, y su efecto sobre la eficiencia; dimensión óptima que caracteriza a los Institutos Tecnológicos localizados en la frontera de eficiencia; impacto en la frontera de la inclusión en el análisis de Institutos Brasileños; identificación de las bolsas de ineficiencia y sus implicaciones. La estructura del trabajo es la siguiente. En primer lugar, se describe la técnica 3 utilizada para efectuar la medición de eficiencia (Análisis Envoltante de Datos). A continuación se procede a la selección de los inputs y outputs que intervienen en la función de producción de un Instituto Tecnológico standard y a la descripción de los datos referidos a 27 observaciones en el periodo 1999-2000. En tercer lugar, se proponen modelos alternativos de evaluación de eficiencia y se analizan los resultados. El trabajo concluye con el habitual apartado de conclusiones.

2 Conceptualización de la técnica Análisis Envoltante de Datos

El modelo DEA tiene como objetivo determinar que unidades productivas de una muestra con similares características configuran una “superficie envolvente”. Esta superficie recibe el nombre de función de producción empírica o frontera de eficiencia. La idea de una medida de eficiencia basada en datos observados de múltiples inputs y outputs fue introducida por Farrell (1957). Sin embargo, la idea no se llevó a la práctica hasta que Charnes, Cooper and Rhodes (1978) plantearon un problema de programación lineal para medir los niveles de eficiencia, bajo la hipótesis de rendimientos constantes a escala (RCE). La expresión original del modelo DEA de CCR (Charnes *et al.*, 1978) es la siguiente:

$$\text{Max. } \alpha_o = \frac{\sum_{m=1}^M u_m y_{m,o}}{\sum_{n=1}^N v_n x_{n,o}} \quad [1.1]$$

sujeto a

$$\frac{\sum_{m=1}^M u_m y_{m,i}}{\sum_{n=1}^N v_n x_{n,i}} \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, I \quad [1.2]$$

$$u_m, v_n \geq \varepsilon, \forall m, \forall n \quad [1.3]$$

$y_{m,o}$ = cantidad de output m obtenido por unidad o , $x_{n,o}$ = cantidad input n consumido por unidad o ,
 u_m = ponderación asignada a output m , v_n = ponderación asignada a input n , I = número de unidades,
 M = número total de outputs, N = número total de inputs, ε = número positivo pequeño.

La medida de eficiencia para cada unidad (α_o) se calcula a través del proceso de maximización de un ratio de outputs ponderados en relación a inputs ponderados sujeto a la condición de que los ratios similares para cada unidad evaluada deben ser menor o igual a uno. Cada conjunto de pesos (u_m, v_n) se obtiene a través del proceso de optimización condicionada. Charnes, Cooper y Rhodes (1978) propusieron transformar [1.1] en un problema de programación lineal donde la nueva función objetivo es la recíproca de [1.1]:

$$\text{Min. } \beta_o = \text{Min} \frac{1}{\alpha_o} = \sum_{n=1}^N v_n x_{n,o} \quad [1.4]$$

$$\text{sujeto a: } \sum_{m=1}^M u_m y_{m,o} = 1, \quad [1.5]$$

$$\sum_{m=1}^M u_m y_{m,i} - \sum_{n=1}^N v_n x_{n,i} \leq 0, \quad i = 1, \dots, I, \quad [1.6]$$

$$u_m, v_n \geq \varepsilon, \forall m, \forall n \quad [1.7]$$

Debido a que [1.4] es una formulación ordinaria de programación lineal, tiene su dual que puede ser expresado como sigue:

$$\text{Max. } \beta_o \quad [1.8]$$

$$\text{sujeto a: } \sum_{i=1}^I \lambda_i y_{m,i} \geq \beta_o y_{m,o}, \quad m = 1, \dots, M, \quad [1.9]$$

$$\sum_{i=1}^I \lambda_i x_{n,i} \leq x_{n,o}, \quad n = 1, \dots, N, \quad [1.10]$$

$$\lambda_i \geq 0 \quad [1.11]$$

La restricción [1.9] significa que la combinación de outputs ponderados excede a la proporción β_o del output de la unidad O . Las formulaciones dual y primal exhiben idénticos resultados. Generalmente es la versión dual [1.8] la escogida debido a su relativa facilidad de cómputo; la versión dual opera con $M+N$ restricciones en lugar de $I+1$ restricciones como en la versión primal. La formulación dual ofrece una más clara interpretación de lo que sucede en términos de minimización

de inputs y maximización de outputs (ver Norman y Stoker, 1991). En el anterior modelo DEA, los outputs de la unidad O pueden incrementarse hasta la proporción $\hat{\alpha}$ de su valor actual. Sin embargo, podrían darse situaciones en las que la unidad O tuviera niveles de algunos inputs superiores a los niveles de la combinación ponderada de inputs y/o algunos niveles de outputs inferiores a aquellos niveles de la combinación ponderada de outputs. Lo anterior muestra que es posible obtener mejoras adicionales. Charnes, Cooper y Rhodes (1978) incorporaron la posibilidad de esas mejoras adicionales (valores “slack”) en la formulación matemática de la siguiente manera:

$$\text{Max. } \left\{ \beta_o + \varepsilon \left(\sum_{n=1}^N s_n^- + \sum_{m=1}^M s_m^+ \right) \right\} \quad [1.12]$$

$$\text{sujeto a: } \sum_{i=1}^I \lambda_i y_{m,i} = \beta_o y_{m,o} + s_m^+, \quad m = 1, \dots, M, \quad [1.13]$$

$$\sum_{i=1}^I \lambda_i x_{n,i} = x_{n,o} - s_n^-, \quad n = 1, \dots, N, \quad [1.14]$$

$$\lambda_i, s_n^-, s_m^+ \geq 0 \quad \forall i, n, m \quad [1.15]$$

s_n^- y s_m^+

se denominan “variables slack” y se introducen para transformar restricciones de desigualdad en restricciones de igualdad. La existencia de estas variables implica que los objetivos para algunos inputs y outputs no se basarán únicamente en proyecciones radiales. En este sentido, la eficiencia DEA de una unidad evaluada obtendrá un coeficiente igual a uno ($\beta_o = 1$) y valores slack iguales a cero ($s_n^- = s_m^+ = 0; \forall n, m$). Una unidad ineficiente que requiere mejoras radiales en algunos factores para satisfacer sus objetivos obtendrá un coeficiente de eficiencia mayor que uno, para el modelo [1.12], y valores slack igual a cero. Finalmente, mejoras no radiales se explican por $\beta_o > 1$ y valores positivos de slacks para algunos factores. En la Figura 1 se muestra el conjunto de posibilidades de producción, y la frontera DEA representada por un segmento definido por las unidades A y B las cuales son eficientes. Aplicando el programa dual de maximización de outputs a esas observaciones se obtiene un coeficiente de eficiencia igual a uno ($\beta_o = 1$) y valores slack igual a cero ($s_n^- = s_m^+ = 0$). Las unidades ineficientes DMU_P, DMU_Q y DMU_R pueden ser proyectadas en la frontera con el fin de satisfacer el rendimiento de las unidades de referencia. En el caso de la unidad ineficiente DMU_P ($\beta_P > 1$), la expansión radial requerida de los dos outputs debe ser igual a $P(\beta_P - 1)$. En relación a la unidad DMU_R la proyección en la frontera para alcanzar el rendimiento de su unidad de referencia (DMU_B) debe ser llevada a cabo en dos fases. Primero, el incremento proporcional en los niveles actuales de outputs debe ser $R_1(\beta_R - 1)$ para alcanzar el segmento no eficiente de la frontera. Segundo, el valor positivo de la variable slack del output (s_{1R}^+) muestra la posibilidad de alcanzar un incremento adicional igual a $y_{1B} - \beta_R R_1$.

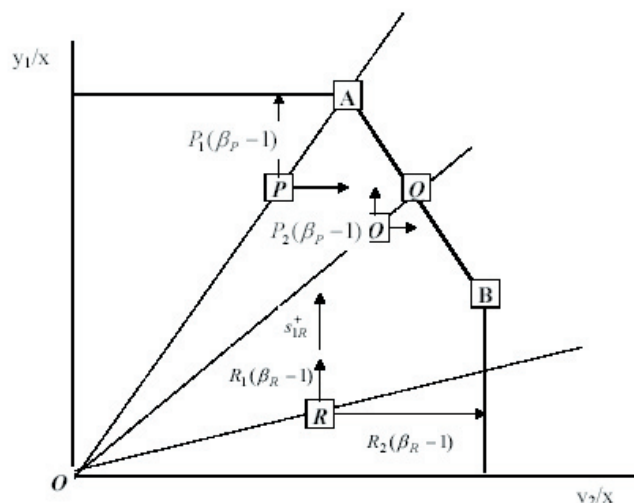


Figura 1: Representación gráfica del modelo DEA con orientación hacia los outputs

3 Especificación del modelo DEA en el ámbito de Institutos Tecnológicos

Un Instituto Tecnológico (desde ahora IT) puede definirse como una unidad productiva que emplea una serie de inputs (ej. presupuestos, investigadores, recursos específicos para transferencia tecnológica, dotación de personal administrativo, etc) para la consecución de unos outputs directamente ligados a la investigación y a las relaciones contractuales con empresas. Un IT como empresa de servicios, está afectado por consideraciones de eficiencia como cualquier otra unidad. La revisión bibliográfica que hemos llevado a cabo nos indica, hasta la fecha, inexistencia de análisis formales de evaluación de eficiencia en ITs. Este hecho no sugiere que este tipo de organizaciones no sean susceptibles de evaluación con el uso de técnicas de programación lineal. Por el contrario, se ajustan sin ningún tipo de problemas a análisis similares realizados en sectores tan dispares como: hospitales (Carey y Burgess, 1999); ambulatorios (Giuffrida y Gravelle, 2001); centros de educación primaria (Thanassoulis y Simpson, 1999); oficinas bancarias (Schaffnit et al., 1997); compañías petrolíferas (Thompson *et al.*, 1996); etc. En este sentido, tanto la vertiente de investigación (medida por el número de publicaciones, patentes, etc) como aquella asociada a la capacidad contractual con empresas externas (contratos de transferencia tecnológica) representan objetivos a maximizar por los ITs. Podemos hablar por lo tanto, de la consecución, con un empleo eficiente de recursos, de dos tipos de éxitos: éxito científico y éxito financiero o como logro ideal, una combinación óptima de ambos.

3.1 Conjunto de datos utilizados y selección de variables

Disponemos de información sobre 32 observaciones: 21 ITs Españoles y 11 ITs Brasileños. Se dispone asimismo de información sobre 11 variables relevantes: 5 inputs y 6 outputs. Sin embargo, nos vemos obligados a desestimar algunas observaciones con el fin evitar problemas de incorrecta especificación del modelo y a no emplear todo el conjunto de variables disponible para solventar situaciones de falta de homogeneidad entre observaciones. Los ajustes realizados permiten identificar las variables (inputs y outputs) que conformarían una hipotética función de producción de ITs. La figura 2 representa los inputs seleccionados y los outputs cuya consecución se traduce en el éxito financiero y científico de ITs .

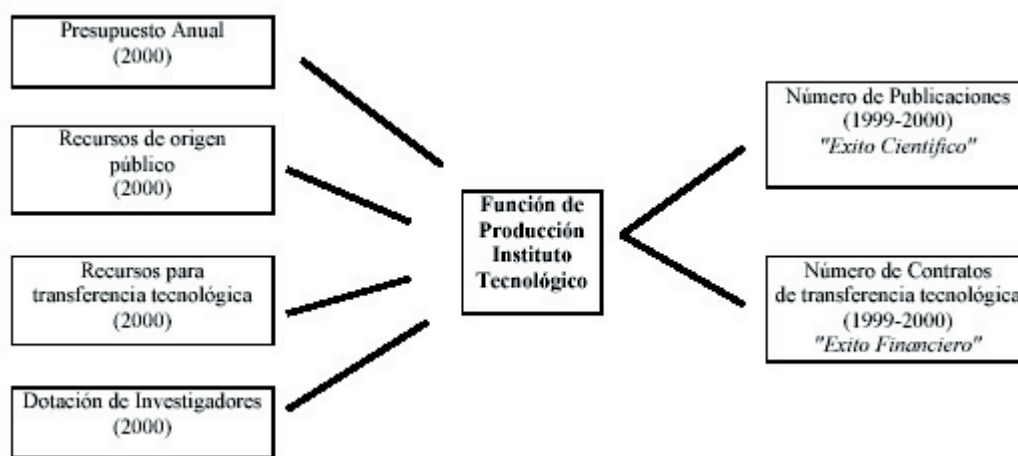


Figura 2: Variables de una hipotética función de producción de Institutos Tecnológicos

Seguidamente describimos las seis variables seleccionadas:

Presupuesto Anual: representa el total de recursos financieros de un IT para el ejercicio 2000. Esta variable está medida en millones de euros (incluyendo los ITs brasileños a los que establecemos la conversión). En términos de eficiencia técnica, para un determinado nivel de output un empleo de recursos presupuestarios menor en términos relativos se traduce automáticamente en mejoras de eficiencia.

Recursos de Origen Público: Este segundo input, valorado también en millones de euros para el ejercicio 2000, identifica la parte de financiación de ITs por entes gubernamentales. La consecución de un volumen determinado de outputs con un empleo relativamente reducido de recursos públicos, y por lo tanto un alto grado de autofinanciación, puede considerarse como un objetivo deseable no sólo en aras de la eficiencia productiva, sino también de la eficiencia social. Las reducciones de financiación pública para ITs experimentadas en los últimos años y las perspectivas de mayores reducciones futuras convierten a la autofinanciación en un aspecto clave de la gestión de ITs.

Recursos para Transferencia Tecnológica: esta variable, valorada en millones de euros para el ejercicio 2000, identifica un input a minimizar para obtener ganancias de eficiencia. ITs con niveles de output similares mostrarán grados

de eficiencia dispares según su capacidad de utilizar correctamente sus recursos. En este sentido, niveles relativamente reducidos de recursos para transferencia serán positivamente valorados por el programa DEA.

Dotación de Investigadores: este input se mide en unidades físicas (número de investigadores en plantilla en el 2000). Comportamientos eficientes implicarán productividades medias elevadas para este factor-trabajo.

Número de Publicaciones: este output representa una de las actividades claves de la actividad de los ITs: la investigación. Utilizamos como medida el número efectivo de publicaciones en el bienio 1999-2000. Para niveles similares en la utilización de inputs, ganancias de eficiencia se traducen en maximizar la producción de publicaciones. Asimismo, esta variable nos permite evaluar y contrastar el “éxito científico” de los ITs analizados. No disponemos de información que discrimine la calidad de las publicaciones producidas ni el objeto de la misma (investigación básica o aplicada). Por lo tanto, la interpretación de los resultados del análisis debe tener en cuenta este hecho, que en cualquier caso debe asumirse por la generalizada inexistencia de indicadores de calidad en este y en otros sectores.

Numero de Contratos de Transferencia Tecnológica: representa el segundo tipo de actividad crucial de un IT. Está medido en unidades físicas para el bienio 1999-2000 y determina la capacidad contractual de los ITs y por lo tanto, la actividad desarrollada para empresas externas, principalmente para las Pymes. Asimismo, existiría una relación directa entre esta actividad de provisión de servicios con el “éxito financiero” ya que representa una de las fuentes más importantes de la autofinanciación de los ITs.

Es importante señalar el hecho de no hemos incluido como output el “Número de Patentes en el bienio 1999-2000” debido a que sólo 7 de los 21 ITs españoles han producido patentes en ese periodo. Por su parte, ninguno de los 11 ITs brasileños lleva a cabo este tipo de actividad. Por lo tanto, la inclusión de esta variable en el modelo produciría una situación de acusada heterogeneidad entre las observaciones y favorecería de partida a un 22% de las unidades analizadas. Se debe indicar también, que la producción de patentes no es considerada como un output crucial de los ITs, entre otras razones debido a la rapidez del cambio tecnológico que se traduce en una amenaza para invertir recursos en esta actividad.

3.2 Análisis preliminar de datos

La Tabla 1 identifica el conjunto de datos para las 25 observaciones de la muestra que finalmente han sido seleccionadas para llevar a cabo la evaluación de eficiencia. Se puede observar que los ITs han sido clasificados en la tabla según su localización geográfica: 9 ITs pertenecientes a Cataluña; 5 localizados en la Comunidad Valenciana; 5 ITs del resto del estado español; y finalmente, 6 ITs Brasileños localizados en el estado de Sao Paulo.

Tabla 1: Conjunto de datos para una muestra de 25 Institutos Tecnológicos ITs Presupuesto Anual (2000)

ITs	Presupuesto Anual (2000) (en miles de euros)	No de Científicos/ Investigadores (2000) (unidades físicas)	Recursos de Origen Público (2000) (miles de euros)	Recursos para Transferencia Tecnológica (2000) (miles de euros)	No. de Contratos de Transferencia (1999-2000) (unidades físicas)	No.de Publicaciones (1999-2000) (unidades físicas)
CATA1B	691	35	421	451	4	36
CATA2A	12.170	100	3.005	12.170	450	10
CATA3A	12.717	111	7.753	90	41	180
CATA4A	7.212	55	902	0	5	0
CATA5M	4.213	40	3.372	0	30	230
CATA6A	7.212	38	2.885	3.726	23	83
CATA7M	2.104	65	150	1.803	70	190
CATA8A	12.020	80	6.010	1.082	20	200
CATA9M	2.518	23	1.689	2.512	50	152
VALE1M	2.043	8	481	240	5	2
VALE2M	2.632	39	962	84	232	14
VALE3M	1.827	30	841	240	40	10
VALE4M	2.705	55	1.202	2.705	55	41
VALESB	643	2	421	0	6	4
MADRIA	18.030	20	16.227	3.065	12	50
ANDA1M	1.503	6	0	481	15	10
ARAG1M	2.080	3	1.040	198	170	10
EXTR1B	902	13	871	721	5	15
CAST1B	216	9	60	156	3	10
BRAS1A	8.030	110	4.141	7.146	239	337
BRAS2B	998	3	499	42	2	20
BRAS3M	3.227	11	2.987	126	18	80
BRAS4B	337	30	162	18	200	500
BRAS5A	6.431	70	5.613	1.725	20	525
BRAS6M	3.390	50	577	0	4	5

Asimismo, la Tabla 1 informa sobre como se distribuye la dimensionalidad de los 25 ITs de la muestra. Hemos escogido como indicador de dimensión la cuantía del presupuesto anual de cada IT, identificando tres intervalos de discriminación. Las observaciones se distribuyen de la siguiente manera: 24% de ITs son de “Baja dimensionalidad” con un presupuesto igual o inferior a 1,20 millones €; 44% de “Mediana dimensionalidad” con presupuesto entre 1,50 y 4,20 millones €; y el 32% restante de “Alta dimensionalidad” con presupuesto superior a 6 millones de €. A su vez, la Tabla 2 muestra el caso agregado del total de observaciones ($N = 25$) y la primera impresión que ofrece es la significativa variabilidad de los respectivos datos respecto a la media aritmética (medida por la Desviación Standard). En efecto, nos encontramos con una gran dispersión de los datos que informa sobre un alto grado de heterogeneidad entre los ITs analizados, aspecto que se confirma observando la gran distancia entre valores máximos y mínimos para cada una de las variables. Esta conclusión se observa también analizando por separado las observaciones de ITs españoles. Lo anterior nos hace prever que la evaluación de eficiencia que se va a llevar a cabo identificará para algunos ITs niveles de ineficiencia muy significativos y de difícil superación en el corto y medio plazo, cuando se comparen con los ITs localizados en la frontera de eficiencia.

Tabla 2: Análisis estadístico básico del caso agregado (ITs españoles y brasileños)

Variable	Mean	Std Dev	Minimum	Maximum	N
(-) Presupuesto Anual (2000)	4.634,04	4.717,22	216	18.030	25
(-) No.Científicos/Investigadores (2000)	40.24	33.56	2	111	25
(-) Recursos Públicos (2000)	2491,83	3538,82	0	16.227	25
(-) Recursos Transferencia Tecn. (2000)	1551,33	2772,59	0	12.170	25
(+) No. de Contratos (1999-2000)	68.76	108.19	2	450	25
(+) No.de Publicaciones (1999-2000)	108.56	151.27	0	525	25

3.3 Establecimiento de hipótesis y modelo DEA restringido

Se emplea el modelo original de Charnes, Cooper y Rhodes (1978) que establece la hipótesis de “Rendimientos Constantes a Escala”. Esta hipótesis considera que incrementos proporcionales en la utilización de inputs implican incrementos en la misma proporción de outputs producidos. Esta consideración es aplicable en infinidad de procesos productivos y creemos que no existe razón alguna para no traducirla a nuestro análisis de ITs. En cualquier caso, la hipótesis alternativa de “Rendimientos Variables a Escala” afecta al análisis de eficiencia en que es menos restrictivo que bajo la hipótesis de “Rendimientos Constantes a Escala” (Norman y Stoker, 1991). En otras palabras, la evaluación de eficiencia en este último caso es más severa, pone el listón más alto, para juzgar a una unidad como eficiente y por tanto, resulta deseable en nuestra evaluación de ITs. La segunda hipótesis se refiere a la orientación del proceso de optimización. Vamos a llegar a cabo la evaluación de eficiencia para ITs con orientación hacia los outputs, es decir, se persigue la maximización de los niveles de output (“No.de publicaciones” y “No.de contratos de transferencia tecnológica”). Esta 10 opción implica los esfuerzos que debe llegar a cabo una unidad juzgada como ineficiente para alcanzar la frontera, se concentran en mayor medida por el lado de los outputs que por el lado de los inputs. Debemos indicar, que en el modelo original de “Rendimientos Constantes a Escala” los resultados de eficiencia son idénticos tanto en el caso de orientación hacia outputs como en el caso de orientación hacia los inputs (Charnes *et al*, 1978). La única diferencia reside en los objetivos (“targets”) que establece el programa. Por otra parte, y desde el punto de vista de la política de gestión de ITs, parece deseable valorar en mayor medida a aquellas unidades eficientes que muestran un alto rendimiento relativo tanto en su capacidad científica como en su capacidad contractual. En este sentido, se introducirá un tipo de restricciones en las ponderaciones de los outputs de manera que el programa DEA juzgue con la misma importancia a los outputs “No.de publicaciones” y “No.de contratos de transferencia” eliminando la flexibilidad original para asignar pesos a estos dos tipos de output. La especificación matemática del modelo restringido en su versión Primal es la siguiente:

$$\text{Min} \cdot \beta_j = \text{Min} \frac{1}{\alpha_j} = \sum_{n=1}^4 V_n \cdot X_{n,j} \quad [1.16]$$

s. \alpha:

$$\sum_{m=1}^2 U_m \cdot Y_{m,j} = 1 \quad [1.17]$$

$$\sum_{m=1}^2 U_m \cdot Y_{m,i} - \sum_{n=1}^4 V_n \cdot X_{n,i} \leq 0 \quad i = 1, \dots, 19 \quad [1.18]$$

$$U_m, V_n \geq \epsilon, \forall m, \forall n \quad [1.19]$$

$$\frac{U_m \cdot Y_{m,i}}{\sum_{m=1}^2 U_m \cdot Y_{m,i}} = 0.5 \quad i = 1, \dots, 19 \quad [1.20]$$

Puede observarse que se ha introducido una restricción adicional [1.20] la cual establece que la importancia relativa del output 1 “No.de publicaciones” debe ser igual a la importancia relativa asociada al output 2 “No.de contratos de transferencia”. A este enfoque de restricciones desarrollado por Wong y Beasley (1990) se le denomina restricciones sobre pesos “virtuales” de los outputs. Considerando la restricción [1.17] se identifica que cada uno de los dos outputs entrará en el análisis de eficiencia mostrando una importancia relativa del 50% o dicho en términos económicos, la contribución sobre los beneficios totales de una unidad (recordemos que los pesos, U_m , pueden traducirse en precios) será para cada uno de los dos outputs producidos igual al 50%.

4 Análisis de resultados

Nuestra línea de investigación analiza en primer lugar el caso español compuesto de 19 observaciones. Seguidamente, se estudia el impacto en la frontera de eficiencia de incluir observaciones de ITs brasileños. Se propone para cada análisis la especificación de cuatro modelos alternativos: el primero, analizará los objetivos conjuntos de “éxito científico” y “éxito financiero”; el segundo, explorará los niveles de eficiencia respecto a la consecución del “éxito científico”; el tercero, analizará exclusivamente el “éxito financiero”; y finalmente, el cuarto modelo llevará a cabo el análisis conjunto de ambos éxitos pero con la introducción de restricciones, en ponderaciones de outputs, en el enfoque matemático DEA.

4.1 Resultados relativos a la muestra de Institutos Tecnológicos de España

La Tabla 3 muestra los resultados de evaluación de eficiencia en cuatro situaciones alternativas. Se observa como en la última columna, que muestra los resultados del modelo DEA restringido cuatro unidades resultan juzgadas como técnicamente eficientes. En este caso, la evaluación de eficiencia se basa en una política de gestión de ITs donde el “Éxito Científico” y el “Éxito Financiero” son igualmente deseables. Por lo tanto, las unidades CATA7M, CATA5M, ANDA1M y ARAG1M son los únicos ITs de la muestra que se muestran eficientes, en términos relativos, respecto a los objetivos simultáneos de investigación y capacidad contractual. Observamos que comparando con el análisis DEA standard de análisis conjunto de ambos objetivos (primera columna), tres unidades pierden su condición de eficiencia (CATA9M, VALE2M y VALE5B). Estos ITs que se caracterizan por concentrar sus esfuerzos en uno de los objetivos (especialización en un objetivo) ya no consiguen beneficiarse de este hecho. En efecto, al introducir en el programa DEA el requerimiento de que sólo unidades capaces de mostrar un alto rendimiento en ambos outputs (y por supuesto, en la utilización de inputs) pueden ser juzgadas como eficientes, implica una mayor severidad en la evaluación que afecta negativamente a unidades que establecen prioridades respecto a uno u otro output. Los resultados del modelo DEA standard para cada uno de los “Éxitos” identifican a esas unidades denominadas “outliers”, que consiguen eficiencias parciales pero nunca conjuntas respecto a los dos objetivos de producción. En particular, los ITs de la Comunidad de Valencia (VALE2M Y VALE5B) centran su actividad casi exclusivamente en el “Éxito Financiero”. Por su parte, el IT de Cataluña (CATA9M) se concentra en el “Éxito Científico”.

La incorporación de restricciones en el modelo DEA que obliga a valorar en igual medida el “Éxito Científico” y el “Éxito Financiero”, identifica todavía más a la dimensión “Media” de ITs como la más óptima. Este hecho no sólo ratifica la importancia de la dimensionalidad media de ITs en el análisis de eficiencia, sino que además lo acentúa.

Tabla 3: Resultados de eficiencia para cuatro modelos DEA alternativos

	DEA Standard "Éxito Financiero y Científico"	DEA Standard "Éxito Financiero"	DEA Standard "Éxito Científico"	DEA Restringido "Éxito Financiero y Científico"
(Eficientes/Ineficientes)	7/19	5/19	4/19	4/19
Valor promedio Coeficiente de Eficiencia	61,46%	42,56%	46,63%	39,32%
ITs Eficientes	CATA5M CATA7M CATA9M VALE2M VALESB ANDA1M ARAG1M	CATA7M VALE2M VALESB ANDA1M ARAG1M	CATA5M CATA7M CATA9M ANDA1M	CATA5M CATA7M ANDA1M ARAG1M

Las evaluaciones de eficiencia realizadas con el modelo DEA han establecido, para las diferentes versiones, una frontera de eficiencia donde se localizan aquellos ITs que muestran un mayor rendimiento relativo en la utilización de inputs y producción de outputs. Estas unidades juzgadas como eficientes sirven de modelo o referencia para las unidades ineficientes. Otro aspecto interesante de la técnica DEA es que no sólo identifica y discrimina unidades de alto y bajo rendimiento relativo, sino que además establece objetivos ("targets") para aquellas unidades juzgadas como ineficientes. Estos objetivos si se cumplieran a través de reconducir la gestión interna, permitirían alcanzar un rendimiento similar al mostrado por las unidades localizadas en la curva frontera. Nos interesa ahora explorar que grado de ineficiencia técnica se vislumbra en la muestra de ITs españoles. Es decir, identificadas unas unidades de alta productividad relativa que conforman la frontera, interesa cuantificar el grado de ineficiencia de toda la muestra de unidades.

Tabla 4: Comparación entre niveles actuales y objetivos DEA para toda la muestra

Modelo DEA Standard "Éxito Financiero y Científico"	Niveles Actuales	DEA Objetivos	%
Presupuesto Anual (2000) (miles de euros)	93.439	60.925	- 34,80%
No.de Investigadores (2000)	732	650	- 11,20%
Recursos de Origen Público (2000) (miles de euros)	48.291	32.100	- 33,53%
Recursos para Transferencia Tec. (2000) (miles de euros)	29.726	17.033	- 42,70%
No.de Contratos de Transf. (1999-2000)	1.236	2.005	+ 62,22%
No.de Publicaciones (1999-2000)	1.247	2.357	+ 89,01%

En la Tabla 4 se identifican, para toda la muestra analizada, las diferencias entre niveles actuales y objetivos establecidos por el programa DEA para cada una de las variables. En ella podemos obtener conclusiones referidas a los ahorros de recursos y a los niveles de actividad potenciales que alcanzarían los ITs de la muestra si todos ellos, sin excepción, mostraran un rendimiento productivo similar al que ofrecen los siete ITs localizados en la curva-frontera. Dicho en otras palabras, en la tabla resumen se traducen los efectos de la ineficiencia provocada por una alta disparidad de productividad entre las unidades de la muestra. Las conclusiones son las siguientes:

- i. Los niveles de producción científica y el número de contratos de transferencia tecnológica con empresas externas podría aumentar, considerando periodos bianuales, en un 89.01% y 62.22% respectivamente si todos los ITs de la muestra funcionaran de forma tan eficiente como las siete unidades de la frontera.
- ii. Los incrementos significativos de output se podrían obtener con un empleo de recursos inferior a los que se utilizan actualmente. En efecto, el presupuesto anual conjunto muestra un exceso del 34.80% respecto al nivel actual; la dotación de investigadores es excedentaria en un 11.20%; los recursos empleados para transferencia tecnológica podrían reducirse en un 42.70%; y finalmente, el nivel de ineficiencia asociado a los ITs de la muestra provoca un exceso de financiación pública del 33.53% que se traduce en problemas de ineficiencia social.

4.2 Resultados relativos a la muestra agregada de ITs de España y Brasil

La primera conclusión que ofrece la Tabla 5 es que la introducción de representantes brasileños en el análisis DEA Standard no afecta a la frontera que se constituía para el caso español. Ciertamente, las nuevas unidades no representan una amenaza para las unidades eficientes españolas, la frontera simplemente se amplía con la inclusión de dos ITs brasileños (BRAS3M y BRAS5A). En segundo lugar, es interesante observar el rendimiento productivo global de la submuestra de unidades brasileñas; de los 5 ITs evaluados, dos de ellos se localizan en la frontera y otros dos se sitúan en el umbral de la misma (BRAS2B y BRAS1A). En términos comparativos podemos afirmar que la submuestra de unidades brasileñas ofrece el más alto rendimiento relativo cuando se compara con las restantes submuestras. En este sentido, podemos señalar que si bien la inclusión de observaciones de Brasil no afecta a las unidades españolas de la frontera, si que se localizan en la tabla con situación privilegiada.

Tabla 5: Resultados de eficiencia en la evaluación de éxito financiero y científico

(Modelo DEA Standard)					
Table of efficiencies (radial)					
7.30 VALE1M	23.37 EXTR1B	28.54 VALE3M			
32.06 CATA6A	33.28 VALE4M	33.83 MADR1A			
34.28 CATA3A	38.89 CATA4A	39.94 CATA8A			
51.05 BRAS6M	52.37 CAST1B	59.66 CATA1B			
65.40 CATA2A	73.67 BRAS1A	94.41 BRAS2B			
100.00 ANDA1M	100.00 ARAG1M	100.00 BRAS3M			
100.00 BRAS5A	100.00 CATA5M	100.00 CATA7M			
100.00 CATA9M	100.00 VALE2M	100.00 VALE5B			

(Modelo DEA con Restricciones en Outputs)					
Table of efficiencies (radial)					
2.09 MADR1A	3.93 CATA8A	4.38 CATA2A			
7.19 BRAS5A	7.30 VALE1M	8.44 CATA6A			
8.63 BRAS2B	12.36 EXTR1B	13.05 CATA1B			
20.28 CATA3A	21.85 BRAS6M	23.39 VALE3M			
24.22 BRAS3M	30.80 VALE4M	34.24 CAST1B			
37.49 VALE2M	45.59 CATA9M	64.00 VALE5B			
65.17 BRAS1A	88.69 ARAG1M	100.00 CATA5M			
	100.00 ANDA1M	100.00 CATA7M			

Sin embargo, los resultados del modelo DEA restringido modifican substancialmente la posición relativa de los ITs brasileños. La imposición de restricciones que exigen un alto rendimiento conjunto en la consecución de ambos objetivos provoca una reducción drástica del número de ITs juzgados como eficientes. Los representantes del estado de Sao Paulo pierden automáticamente su condición de eficiencia. Más aún, la caída en el ranking de eficiencia es muy drástica para el caso brasileño llegando a la conclusión de que la 14 representación brasileña es la que identifica un mayor grado de discriminación entre objetivos. En otras palabras, concentra casi todos los esfuerzos en la consecución eficiente de uno de los outputs a costa de una clara marginación del restante.

Tabla 6: Coeficientes de eficiencia de Institutos Tecnológicos brasileños

	DEA Standard "Éxito Financiero y Científico"	DEA Standard "Éxito Financiero"	DEA Standard "Éxito Científico"	DEA Restringido "Éxito Financiero y Científico"
BRAS1A	73.67%	33.98%	61.28%	65.17%
BRAS2B	94.91%	4.34%	94.41%	8.63%
BRAS3M	100%	12.27%	100%	24.22%
BRAS5A	100%	3.61%	100%	7.19%
BRAS6M	51.05%	48.61%	12.70%	21.85%

La información que aporta la Tabla 6 confirma la conclusión anterior de que los ITs brasileños de nuestra muestra concentran sus esfuerzos exclusivamente en el objetivo científico. En efecto, cuando se aplica el modelo DEA orientado a la maximización del output "Éxito Científico" las observaciones BRAS2B, BRAS3M y BRAS5A obtienen coeficientes

de eficiencia de 94.41%, 100% y 100%, respectivamente. A su vez, cuando el proceso optimización se centra en el “Éxito Financiero” la caída de los coeficientes de eficiencia es espectacular; 4.34%, 12.27% y 3.61%, respectivamente. Esta discriminación de objetivos tan acusada, y sin comparación con los ITs españoles de la muestra, se hace patente en los resultados del modelo DEA restringido (última columna) que penaliza a aquellas observaciones incapaces y/o reticentes de alcanzar un alto rendimiento en la consecución de ambos objetivos.

Finalmente, los ITs CATA5M, CATA7M y ANDA1M confirman, tanto en la evaluación del caso español como en el caso agregado, su condición de optimalidad incluso en situaciones de evaluación donde se les exige eficiencia conjunta en investigación y en capacidad contractual. Su dimensión (mediana) se confirma asimismo como la más óptima. Esta última observación viene avalada por el privilegiado posicionamiento, en términos relativos, de todos los ITs de dimensión mediana en todas las tablas de eficiencia generadas en nuestra investigación.

Tabla 7: Características de ITs de la muestra representativos de la eficiencia técnica

ITs	No de Investigadores	Presupuesto Anual por Investigador	No. de Contratos bianuales por Investigador	No. de Publicaciones bianuales por Investigador	% RecPublicos respecto al Presupuesto	% RecTransferencia respecto al Presupuesto
CATA5M	40	105 (miles euros)	0,75	5,75	80,01%	0%
CATA7M	65	32,33 (miles de euros)	1,08	2,92	7,14%	85,71%
ANDA1M	6	249 (miles de euros)	2,5	1,67	0%	32%

La tabla 7 ilustra una serie de ratios que muestran las peculiaridades de las tres unidades de la muestra representativas de la eficiencia técnica derivada del modelo con mayor severidad de evaluación. Estas tres unidades son las más óptimas en términos relativos y las únicas en localizarse en la frontera de eficiencia bajo el criterio de evaluación que exige alto rendimiento conjunto en objetivos científicos y financieros. El resto de unidades de la muestra podrán mostrar los rendimientos más altos en uno u otro objetivo, pero se muestran incapaces de alcanzar la eficiencia conjunta en ambos objetivos. Se observa como los tres ITs identifican diferentes características en los ratios presentados (el rendimiento eficiente global no es único e inflexible) y por lo tanto, muestran tres puntos de referencia diferentes para servir de modelo al resto de unidades de la muestra juzgadas como ineficientes.

Conclusiones

La investigación presentada constituye un primer paso en la evaluación del comportamiento eficiente de los Institutos Tecnológicos. El objetivo del estudio ha sido mostrar la utilidad del análisis envolvente de datos en un sector que hasta la fecha no ha recibido la atención necesaria desde el punto de vista de la evaluación de rendimiento. El actual proceso de globalización y los límites de la financiación pública van a obligar a reconducir las funciones y objetivos de los Institutos Tecnológicos tanto en el ámbito español como brasileño. Para llevar a cabo una revisión de actuaciones y establecer nuevas metas y objetivos se hace necesario disponer de puntos de referencia. Este estudio ha mostrado la potencialidad del análisis envolvente de datos para identificar unidades de alto rendimiento relativo que sirvan de referencia a unidades ineficientes. Asimismo, se ha mostrado la flexibilidad del modelo DEA para ajustarse a objetivos de política de gestión, como es el caso de exigir un alto rendimiento en la consecución simultánea de objetivos científicos y financieros. Nuestro trabajo ha puesto de manifiesto las características de aquellos Institutos Tecnológicos que conforman la frontera de eficiencia, siendo un aspecto clave la dimensionalidad media. Se ha identificado una acusada discriminación entre los objetivos de éxito científico y financiero por parte de un número significativo de ITs; en particular, las submuestras de la Comunidad de Valencia y del Estado de Sao Paulo. Finalmente, se ha estimado el impacto de la ineficiencia al comparar los niveles actuales de inputs y outputs de la muestra con los objetivos que produce el programa DEA.

La flexibilidad y capacidad de adaptación representan ventajas asociadas a la metodología DEA. Sin embargo, también se ve afectada por limitaciones. La estimación de la frontera DEA y los índices de eficiencia se ven influenciados por los siguientes aspectos: heterogeneidad de las unidades evaluadas; omisión (inclusión) de inputs y outputs relevantes (irrelevantes); errores de medida en las variables; existencia de outliers (unidades que exhiben un alto rendimiento e uno sólo o en número reducido de factores) (Smith, 1997). La flexibilidad que

se asocia al modelo DEA al construir una frontera empírica de eficiencia sin necesidad de establecer hipótesis sobre la forma funcional, se ve contrarrestado por la influencia que tiene sobre los resultados el conjunto de observaciones y la especificación del modelo (selección de inputs y outputs). Una especificación incorrecta del modelo puede conducir a obtener una distribución sesgada del término ineficiencia (Street, 2002). El problema yace en la inexistencia de procedimientos estandarizados para la construcción de modelos DEA (Pedraja *et al.*, 1999).

Finalmente, creemos oportuno señalar que una mayor información sobre los inputs y outputs que intervienen en la función de producción de los Institutos Tecnológicos; concentrar el análisis en un sector o industria determinado (para reducir la heterogeneidad de las 16 observaciones); y un análisis incorporando un horizonte temporal más dilatado, fortalecería los resultados obtenidos.

Referencias

- CAREY, K.; BURGESS, J. On measuring the hospital cost/quality trade-off. *Health Economics*, Chichester, v. 8, p. 509-520, 1999.
- CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of DMUs. *European Journal of Operational Research*, Amsterdam, v. 2, n. 6, p. 429-444, 1978.
- CHARNES, A. et al. *Data envelopment analysis: theory, methodology and applications*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- FARE, R.; GROSSKOPF, S.; KNOX, L. *Production frontiers*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- FARRELL, M. J. The measurement of productive efficiency. *Journal of Royal Society of Statistics*, London, v. 120, p. 253-81, 1957.
- GIUFFRIDA, A. Productivity and efficiency changes in primary care: a malmquist index approach. *Health Care Management Science*, Amsterdam, v. 2, p. 11-26, 1999.
- GIUFFRIDA, A.; GRAVELLE H. Measuring performance in primary care: econometric analysis and DEA. *Applied Economics*, London, v. 33, p. 163-175, 2001.
- HOLLINGSWORTH, B. Non parametric efficiency measurement. *Economic Journal*, London, v. 114, p. 307-311, 2004.
- HOLLINGSWORTH, B.; DAWSON, P.; MANIADAKIS, N. Efficiency measurement of health care: a review of non-parametric methods and applications. *Health Care Management Science*, Amsterdam, p. 161-172, 1999.
- NORMAN, M.; STOKER, B. *Data envelopment analysis: the assessment of performance*. London: John Wiley & Sons, 1991
- PEDRAJA-CHAPARRO, F.; SALINAS-JIMENEZ, J.; SMITH, P. On the quality of the data envelopment analysis model. *Journal of the Operational Research Society*, Oxford, v. 50, n. 6, p. 636-644, 1999.
- PUIG, J.; DALMAU, E. Qué sabemos acerca de la eficiencia de las organizaciones sanitarias en España? JORNADAS DE ECONOMÍA DE LA SALUD, 20., 2000, Palma de Mayorca. *Anales...* Palma de Mayorca: AES, 2000. p. 151-197.
- SCHAFFNIT, C.; ROSEN, D.; Paradi, C. P. Best practice analysis of Bank Branches: an application of DEA in a large Canadian Bank. *European Journal of Operational Research*, Amsterdam, v. 98, p. 269-289, 1997.
- SMITH, P. Model misspecification in data envelopment analysis. *Annals of Operations Research*, Amsterdam, v. 73, p. 233-252, 1997.
- STREET, A. *Measuring efficiency: an overview and comparison of economic methods*. New York: Center fo Health Economics, University of York, 2002. Report for the Commission for Health Improvement.
- THANASSOULIS, E.; SIMPSON, G. Setting individual achievement targets with DEA. *OR Insight*, Coventry, v. 12, n. 2, p. 2-7, 1999.
- THOMPSON, R. G. et al. DEA AR efficiency and profitability of 14 major oil companies in US exploration and production. *Computers and Operations Research*, London, v. 23, n. 4, p. 357-73, 1996.
- WONG, Y. H. B.; BEASLEY, J. E. Restricting weight flexibility in data envelopment analysis. *Journal of Operational Research Society*, London, v. 41, n. 9, p. 829-835, 1990.

Recibido em: 05.12.2004

Aprovado em: 19.5.2005