

RESUMEN

TESIS DOCTORAL

Digestión anaerobia de residuos complejos: lodos de depuradora y rolo de platanera

CELESTINO PEREZ DOMINGUEZ



UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA
SECRETARIADO DE PUBLICACIONES

**DIGESTION ANAEROBIA DE
RESIDUOS COMPLEJOS:
LODOS DE DEPURADORA Y
ROLO DE PLATANERA**

Celestino Pérez Domínguez

**DIGESTION ANAEROBIA DE
RESIDUOS COMPLEJOS:
LODOS DE DEPURADORA Y
ROLO DE PLATANERA**

Celestino Pérez Domínguez



**UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA
SECRETARIADO DE PUBLICACIONES**

Esta *Tesis Doctoral*, dirigida por el Dr. D. Francisco Jarabo Friedrich, ha sido defendida el día 28 de septiembre de 1987 ante el tribunal compuesto por:

Presidente: Dr. D. Sebastián Delgado Díaz

Secretario: Dra. Dña. Dominga T. Jacinto del Castillo

Vocales: Dr. D. Federico Díaz Rodríguez

Dr. D. Venerando González Díaz

Dr. D. Gregorio Antolín Giraldo

© Universidad de La Laguna

© Celestino Pérez Domínguez

Depósito Legal: TF-267/88

ISBN: 84-7756-075-7

Imprime: Secretariado de Publicaciones UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA
C/San Agustín, 30
38201 LA LAGUNA-TENERIFE
ISLAS CANARIAS-ESPAÑA

1.- INTRODUCCION

Con el progreso de la sociedad surgen de forma continua nuevas necesidades, que inducen ciertos cambios más o menos lentos en la misma. Entre los factores que mayor incidencia han tenido en los últimos años, y siguen teniéndola, se encuentran la crisis de la energía y el deterioro del medio ambiente, que están provocando un cambio de mentalidad respecto al consumo de unos bienes que son escasos y a la mejora de la calidad de vida.

Ambos factores surgieron de forma independiente, pero se han visto con rapidez relacionados íntimamente, ya que la conservación del medio ambiente implica una economía de recursos, utilizando tecnologías que generen la mínima cantidad de residuos por unidad de masa procesada.

La energía es uno de los recursos básicos para el desarrollo vital, por lo que es necesario conservar al máximo las fuentes actualmente disponibles, explorar el empleo de otras alternativas y utilizar con mayor eficacia algunas que hoy día están más desplazadas. El agotamiento progresivo de las reservas de combustibles fósiles, así como el alza de sus precios, ha obligado a replantear seriamente el problema energético y buscar soluciones a la crisis producida por estas causas. Por este motivo, en la actualidad existe una tendencia general a tratar de utilizar fuentes alternativas de energía y, dentro de éstas, las denominadas "renovables" que, en teoría, constituyen reservas inagotables, aunque la cantidad que pueden suministrar sea limitada.

Según Whittaker, la producción anual de biomasa sobre la Tierra es de unos 170.000 millones de Tm de materia seca, con un contenido energético del orden de 68.000 millones de tep, lo que supera en más de 10 veces el consumo anual de combustibles fósiles de toda la humanidad.

• Estas cantidades de biomasa, debido a los procesos de conversión a que se ven sometidas, generan residuos, definidos como aquellos materiales generados en las actividades de producción, transformación y consumo que no han alcanzado, en el contexto en que son generados, ningún valor económico.

Teniendo en cuenta que la mayor parte de estos residuos no se aprovechan, tienen una incidencia negativa sobre el medio ambiente y son de carácter orgánico, se puede comprender que constituyan un enorme potencial para la producción de energía. La biomasa residual ofrece, pues, unas perspectivas muy amplias de aprovechamiento, ya que se produce de forma continua y creciente como consecuencia de la actividad humana y crea de forma inmediata tres tipos de problemas: su acumulación, su transporte y su eliminación.

POTENCIAL ENERGETICO DE LOS RESIDUOS VIA DIGESTION ANAEROBIA

El interés de los procesos de digestión anaerobia de residuos se manifiesta no sólo por los trabajos que se vienen realizando sobre los mismos, sino también por los estudios que diversas instituciones de diferentes países efectúan para evaluar su potencialidad energética. Así, actualmente existe en la CEE un volumen de digestión total de unos 269.000 m³, con una generación de biogás de 295.000 m³/día (24). Por su parte, el potencial de digestión anaerobia de la CEE representa del orden del 2 % de la energía consumida en 1983, con un valor aproximado de 7.000 millones de ECU.

Asimismo, se ha estimado que en EE.UU., la energía total recuperable por digestión anaerobia de residuos orgánicos es de 81,3 millones de tep anuales, existiendo en dicho país un volumen de digestión de unos 90.000 m³ y una producción total aproximada de 109.000 m³/día de biogás.

Todo ello explica que en los últimos años hayan aparecido numerosos trabajos de digestión anaerobia de residuos agrícolas, si bien fundamentalmente enfocados hacia el aprovechamiento energético de residuos ganaderos, al ser estos sustratos los más adecuados para su tratamiento anaerobio. Igualmente sucede con los lodos de depuradora, de los que se dispone de mayor experiencia, al ser utilizada su digestión desde hace bastante tiempo en las plantas depuradoras de aguas residuales urbanas. No obstante, los vertidos tratados por cada una de estas plantas suelen ser de diferente calidad, en función de diversos parámetros socioeconómicos. Por ello son también numerosos los trabajos que abordan problemas puntuales de los lodos de una

determinada planta depuradora.

Respecto a la digestión anaerobia de residuos agrarios de carácter vegetal, la bibliografía no es tan abundante, probablemente debido a los problemas que comporta el proceso al utilizar estos sustratos: inoculación previa, relación C/N superior a la óptima, problemas asociados a los tamaños de partícula, lignina contenida en los sustratos, etc. No obstante, se han obtenido buenos resultados en algunos casos, si bien en muchos de ellos el residuo se somete a pretratamiento químico o bien se somete a digestión mezclado con residuos animales o lodos de depuradora.

Por otra parte, también se llevan a cabo estudios con sustratos vegetales puros, pero procedentes de industrias agroalimentarias, caracterizados por su alta carga orgánica pero bajo contenido en sólidos en suspensión. Interesantes revisiones bibliográficas sobre el tratamiento de residuos vegetales, vía digestión anaerobia, o por procedimientos alternativos han sido realizadas por Morrell y cols. y Hilton y cols.

Por lo que se refiere a residuos vegetales sólidos, los estudios son más escasos. Cabe destacar a este respecto los trabajos de Lane sobre residuos de diversos frutos, el de Sweeten y cols., sobre sorgo dulce y el de Patel sobre rolo de platanera, si bien este último realizado en el rango termofílico de temperaturas. Todos estos trabajos indican la necesidad de inoculación previa con un residuo animal o lodos de depuradora, tanto cuando se realizaban en digestores discontinuos como cuando se llevaban a cabo de forma semicontinua. Asimismo era necesario triturar convenientemente el residuo antes de alimentarlo al digestor.

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION

La producción de plátanos es una faceta de gran importancia en la actividad agrícola de la Comunidad Autónoma de Canarias. Las 11.495 Ha dedicadas a este cultivo producen anualmente 402.323 Tm de frutos, que en su mayor parte son exportados a la Península y a diversos países de la CEE. Los 17.300 millones de pesetas ingresados por este concepto en 1985 representan un 39,42 % del valor de la producción agrícola total.

La platanera es una planta de gran talla; produce un solo racimo

de plátanos anualmente y luego muere. Después de cada cosecha, el falso tronco o "rolo" ha de ser cortado, con objeto de permitir la reproducción vegetativa a partir de un brote que emerge de la misma planta. Debido a esta operación, después de la cosecha se produce una gran cantidad de residuos, estimada en 1,5 a 2 veces el peso del fruto, es decir, unas 750.000 Tm/año en la Comunidad Autónoma de Canarias, equivalente al 45 % del total de la producción de residuos agrícolas.

Hasta el momento no ha sido seriamente considerada la utilización de estos residuos en las propias plantaciones, ni como materia prima para algún tipo de industria, ni como fuente de energía, ya que el agricultor frecuentemente entierra los rolos en el mismo terreno, esperando que su putrefacción contribuya como abono orgánico al mismo.

Considerando el posible aprovechamiento energético de este residuo, su alto contenido en agua (superior al 90 %) hace impracticable su uso como fuente de energía mediante procesos termoquímicos, por lo que se hace necesario orientar su posible utilización hacia métodos bioquímicos de obtención de energía. Por otro lado, su alto contenido en celulosa (cerca del 60 % de los sólidos) indica que la técnica más adecuada sería la digestión anaerobia, ya que su utilización en la fermentación alcohólica involucraría costosos procesos de hidrólisis previa de los componentes celulósicos.

Asimismo, dentro del amplio campo de la bioconversión, la digestión anaerobia resulta ser un procedimiento simple para lograr la gasificación de la materia orgánica vegetal, manteniéndose un residuo no convertido que puede ser utilizado como acondicionador de suelos y fertilizante, permitiendo la continuidad de las prácticas tradicionales de mantenimiento de suelos.

Hasta ahora, el estudio de la digestión anaerobia de materiales celulósicos se ha centrado principalmente en la consideración de ciertos tipos de residuos agrarios y urbanos, tales como excrementos animales, lodos de depuradora y residuos sólidos urbanos, entre otros. Residuos fundamentalmente celulósicos sin presencia significativa de otros tipos de materia orgánica se han investigado muy poco.

Este trabajo se enmarca dentro de la línea de investigación que sobre Aprovechamiento de Residuos está llevando a cabo el Departamento de Ingeniería Química y Tecnología Farmacéutica de la Universidad de La Laguna.

En trabajos anteriores se ha comenzado el estudio de la digestión anaerobia del rolo de platanera, observándose ciertas dificultades durante el desarrollo del proceso, dificultades que se han relacionado con una baja población de bacterias metanogénicas presentes en el sustrato y una elevada producción de ácidos volátiles que inhiben el crecimiento de las mismas.

El presente estudio tiene como objetivo la investigación del comportamiento de la digestión anaerobia de rolos de platanera cuando se le añaden al alimento diferentes cantidades de lodos de depuradora, utilizados principalmente como fuente de bacterias metanogénicas, aunque también sea necesario contemplar el aporte de materia orgánica de dichos lodos al sistema global en digestión. Se compararán los resultados con los obtenidos tanto para el rolo de platanera sin mezclar como para los lodos de depuradora puros y así estudiar la influencia de las cantidades relativas de ambos sustratos en el proceso de digestión anaerobia.

2.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La fermentación anaerobia del residuo se llevó a cabo en un digester de laboratorio, diseñado para seguir la evolución del proceso a lo largo del tiempo y descrito en trabajos anteriores.

Como inóculo se utilizaron lodos de depuradora procedentes del decantador secundario (clarificador) de la depuradora de aguas residuales de Santa Cruz de Tenerife. Al ser su concentración en materia sólida muy baja (alrededor de 5 g ST/l), se procedió a su espesamiento para adecuarlos al proceso que se pretendía desarrollar. Esta operación se realizó mediante una sedimentación, añadiendo para favorecerla un floculante, que era un polielectrolito comercial (NALCO-634), en cantidades no superiores a 10 ppm. Los lodos semiconcentrados así obtenidos se filtraban a vacío en embudos Buchner, utilizándose como inóculo la torta resultante, cuyo contenido

en sólidos oscilaba en torno a los 35 g ST/l.

Los lodos así acondicionados se cargaban en el digestor y se dejaban fermentar de forma discontinua unos 30 días, durante los cuáles se producía la gasificación de una parte considerable de los sólidos susceptibles de degradación. Durante esta etapa de preparación del inóculo se seguía diariamente la digestión, con medida del gas producido, su composición y el pH del sustrato.

Transcurrido este período se comenzaba a alimentar el digestor con pequeñas cantidades del residuo a estudiar, con objeto de aclimatar a los microorganismos al nuevo sustrato.

Con objeto de alcanzar el funcionamiento continuo del sistema, se iniciaba el proceso de alimentación semicontinua (cada 24 horas) después de la aclimatación de los microorganismos. Ello se conseguía alimentando dosis crecientes de residuo hasta alcanzar el valor correspondiente al TRH que se deseaba estudiar. Antes de cada alimentación se procedía a extraer un volumen de residuo del digestor igual al del alimento que se deseaba introducir, utilizándose el efluente para realizar la medida de pH.

Una vez alcanzado el estado estacionario de producción de gas se hacía funcionar el sistema en las mismas condiciones durante varios días, con objeto de obtener un conjunto de resultados susceptibles de ser promediados, que darían lugar a los respectivos valores medios de las variables correspondientes a cada TRH ensayado.

CARACTERIZACION DEL RESIDUO

Los lodos de depuradora utilizados fueron espesados según se indicó anteriormente, obteniéndose unos lodos de las siguientes características medias:

ST : 31,14 g/l

SV : 26,47 g/l

DQO: 30,32 g/l

pH : 7,14

Para cada experimento se estimó la cantidad total de lodos a utilizar, preparándose inicialmente tal cantidad de lodos concentrados y almacenándolos en pequeñas porciones bajo refrigeración. Se conseguía así que las características del residuo permaneciesen

aceptablemente homogéneas a lo largo de un experimento. Antes de ser utilizados para alimentar el digestor se dejaba que los lodos alcanzasen la temperatura ambiente para evitar un choque térmico excesivo, que pudiera perjudicar a la población de microorganismos.

El rolo de platanera utilizado se cortaba el mismo día de la preparación previa de la alimentación. Esta consistía en un troceado y posterior molido en una trituradora doméstica, hasta lograr que el tamaño de las fibras fuese inferior a 5 mm. Una vez triturada la cantidad suficiente para un experimento, se almacenaba bajo refrigeración en pequeñas porciones, con objeto asimismo de que su composición permaneciese constante.

Los valores medios de los diferentes parámetros que permiten caracterizar este residuo fueron los siguientes:

ST: 7,41 %
celulosa: 57,38 % (sobre ST)
pentosas: 11,79 % (" ")
lignina: 7,42 % (" ")
SV: 6,52 %
relación C/N: 35
pH: 5,80

Antes de cargar este residuo al reactor se dejaba que alcanzase la temperatura ambiente y se diluía con agua hasta obtener una concentración de 32,50 g SV/l, concentración de la alimentación para todos los experimentos realizados con este residuo.

Las mezclas de lodos de depuradora y rolo de platanera se prepararon tomando como parámetro la proporción (SV procedentes de platanera)/(SV procedentes de lodos), de manera que esta proporción fuera 1:1, 2:1 y 3:1. Para ello se utilizaron como residuos básicos rolo de platanera con las características citadas y lodos de depuradora de concentración 21,82 g ST/l (18,60 g SV/l). La razón de utilizar lodos más diluidos estribaba en que ello era necesario, si se deseaban obtener concentraciones de SV entre 25 y 40 g SV/l sin necesidad de añadir agua.

Una vez calculadas las cantidades necesarias, se preparaban las mezclas en cantidades tales que se podían utilizar para una serie de días, conservándose dichas mezclas bajo refrigeración. Obsérvese que

para todos los sistemas, la cuantificación de la alimentación se hacía por pesada, aunque posteriormente se expresará en volumen. Ello es debido a que, al tratarse de suspensiones de bajo contenido en sólidos, se supuso en todos los casos que el peso específico de todos los sustratos utilizados como alimentación al digester podía considerarse como la unidad.

METODOS DE ANALISIS

Para determinar el contenido en sólidos del residuo, tanto en ST como en SV, se utilizaron los métodos convencionales normalizados (Standard Methods 209), realizándose el secado a 105 °C y la calcinación a 510 °C.

La determinación de la DQO de los lodos se llevó a cabo asimismo por el método normalizado (Standard Methods 509).

El pH del residuo se midió con un electrodo combinado de vidrio, realizándose la lectura con un pH-metro CRISON Digit-501 a la temperatura del sistema.

Las pentosas, celulosa y lignina del rolo de platanera se determinaron según las normas TAPPI.

El gas obtenido por la digestión anaerobia del residuo se analizaba por cromatografía en fase gaseosa, que permitía identificar y valorar metano, dióxido de carbono, oxígeno y nitrógeno.

3.- RESULTADOS

El estudio de la digestión anaerobia de los residuos complejos se llevó a cabo midiendo la variación que se produce en los valores de las principales variables físico-químicas del proceso (producción de gas, composición del gas y acidez del sustrato) al operar con diferentes sustratos y a distintos TRH. Los sustratos se denominaron de la siguiente forma:

P0L1: Lodos de depuradora.

P1L0: Rolo de platanera.

P1L1: Mezcla de los residuos anteriores según la relación

$$SV_P/SV_L = 1:1.$$

P2L1: Idem para $SV_P/SV_L = 2:1$.

P3L1: Idem para $SV_P/SV_L = 3:1$.

Los lodos de depuradora se utilizaron como sistema representativo de sustrato que contiene una población de microorganismos especialmente adecuada para la fermentación anaerobia. Los resultados fueron obtenidos para cada TRH estudiado.

El rolo de platanera se utilizó como sistema vegetal de alto contenido en carbono y bajo contenido en microorganismos metanogénicos, lo que provoca un aumento progresivo de las cantidades de ácidos volátiles en el medio, hecho que tiende a detener el proceso, según se ha podido comprobar realizando experimentos previos de digestión anaerobia en estado no estacionario. Dichos experimentos han aconsejado asimismo proceder a la inoculación previa del sistema con lodos de depuradora. Sin embargo, se ha considerado que el rolo de platanera es una excelente fuente de carbono, elemento fundamental de los componentes del gas producido.

Los sistemas mixtos se utilizaron con objeto de estudiar la influencia que puede tener sobre el proceso el combinar un residuo con una favorable población microbiana con otro que puede ser un buen alimento para aquélla. Se estudió la dependencia de las variables del proceso con la relación existente entre los SV de ambos residuos básicos al ser los SV una variable representativa del sustrato potencialmente biodegradable.

4.- ANALISIS DE LOS RESULTADOS

SISTEMA: LODOS DE DEPURADORA (POL1)

Los resultados obtenidos de la digestión semicontinua de los lodos de depuradora, operando a una concentración de alimento de 26,5 g SV/l y en estado estacionario, se muestran en la Tabla 4.1. Estos valores corresponden a las medias efectuadas en el periodo en el que el sistema había alcanzado para cada TRH el régimen estacionario de producción de gas.

Como se puede observar en la Tabla 4.1, el pH del efluente no permanece constante, sino que existe una clara disminución de su valor

TABLA 4.1

Resultados en estado estacionario

Sustrato: Lodos de depuradora

Experimento	TRH (días)	G (l gas/l dig.día)	B (l CH ₄ /g SV)	% CH ₄	pH
POL1-1	36,2	0,261	0,218	61,07	7,40
POL1-2	33,7	0,269	0,204	59,34	7,32
POL1-3	20,7	0,379	0,173	58,63	7,29
POL1-4	15,3	0,473	0,163	59,36	7,26
POL1-5	10,3	0,493	0,107	55,68	6,97
POL1-6	7,0	0,671	0,091	51,38	6,88
POL1-7	6,0	0,687	0,079	50,67	6,83
POL1-8	3,1	1,047	0,063	52,38	6,79
POL1-9	2,0	1,441	0,054	50,09	6,78

al disminuir el TRH. La representación gráfica de ambas variables (Figura 4.1) muestra que su relación no es lineal, sino que el pH tiende a un cierto valor al tender a infinito el TRH, mientras que, por otra parte, al tender a cero el TRH, el pH alcanza su valor mínimo. Ambos extremos pueden determinarse con mayor facilidad representando el pH frente al inverso del TRH, según se muestra en la Figura 4.2. La ordenada en el origen de esta representación ($\text{pH} = 7,40$) representa el valor para $\text{TRH} \rightarrow \infty$ mientras que, por debajo de $\text{TRH} = 6$ días, la curva reduce su pendiente, lo que permite estimar como valor mínimo, para estado estacionario, un pH alrededor de 6,80.

Asimismo, la Figura 4.2 permite observar un cambio brusco de la pendiente de la curva $\text{pH} - 1/\theta$, que se produce a $\text{TRH} = 6-7$ días, lo que parece indicar un diferente comportamiento del sistema por encima y por debajo de ese valor del TRH. No obstante, y bajo el punto de vista global, la digestión de lodos de depuradora se mantiene de forma espontánea dentro de los límites de pH citados en la bibliografía, lo que permite afirmar que el comportamiento del sistema es muy estable, a todos los TRH ensayados, si se toma como criterio de estabilidad el mantenimiento del valor del pH dentro del rango considerado como óptimo.

La variable de mayor importancia a la hora de considerar el poder calorífico del gas es su composición en metano, ya que de ella depende que en una instalación de aprovechamiento energético de biogás sea o no necesario el montaje de una unidad de separación de dióxido de carbono. Por ello se llevó a cabo el estudio del contenido en metano del gas, en las diferentes condiciones de operación.

En la Figura 4.3 se han representado, pues, el contenido de metano del gas para cada TRH. Como se puede observar, el comportamiento de esta variable con el TRH es similar al ya comentado para el pH: la curva obtenida parece tener una asíntota para $\text{TRH} \rightarrow \infty$ y asimismo alcanzar un valor mínimo a TRH bajos. Con objeto de visualizar de forma más efectiva este comportamiento, se representó asimismo el contenido en metano frente a la inversa del TRH, gráfica que se muestra en la Figura 4.4.

El análisis de la curva de la Figura 4.4 permite deducir unas conclusiones también similares a las consideradas al estudiar el pH:

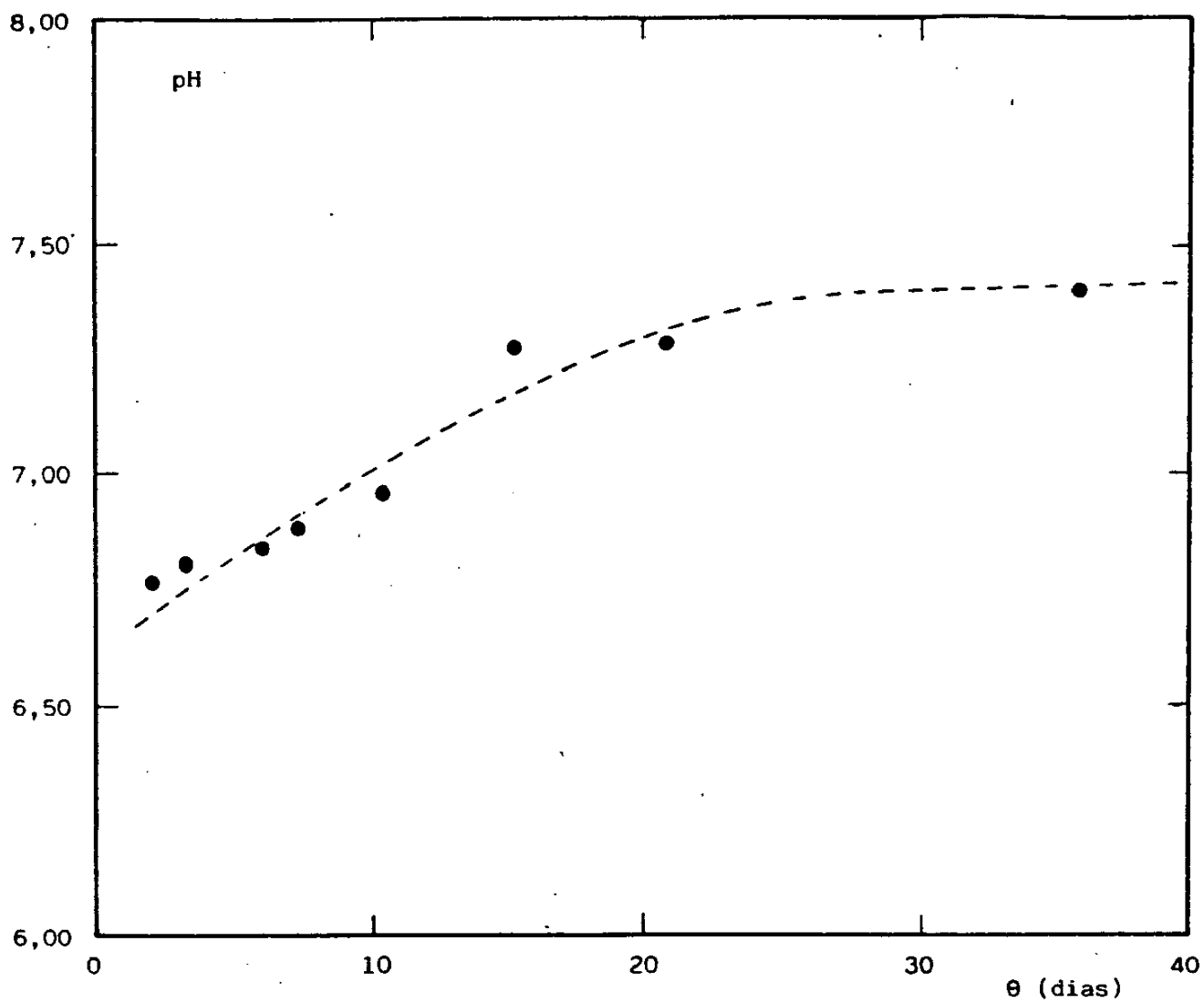


Figura 4.1

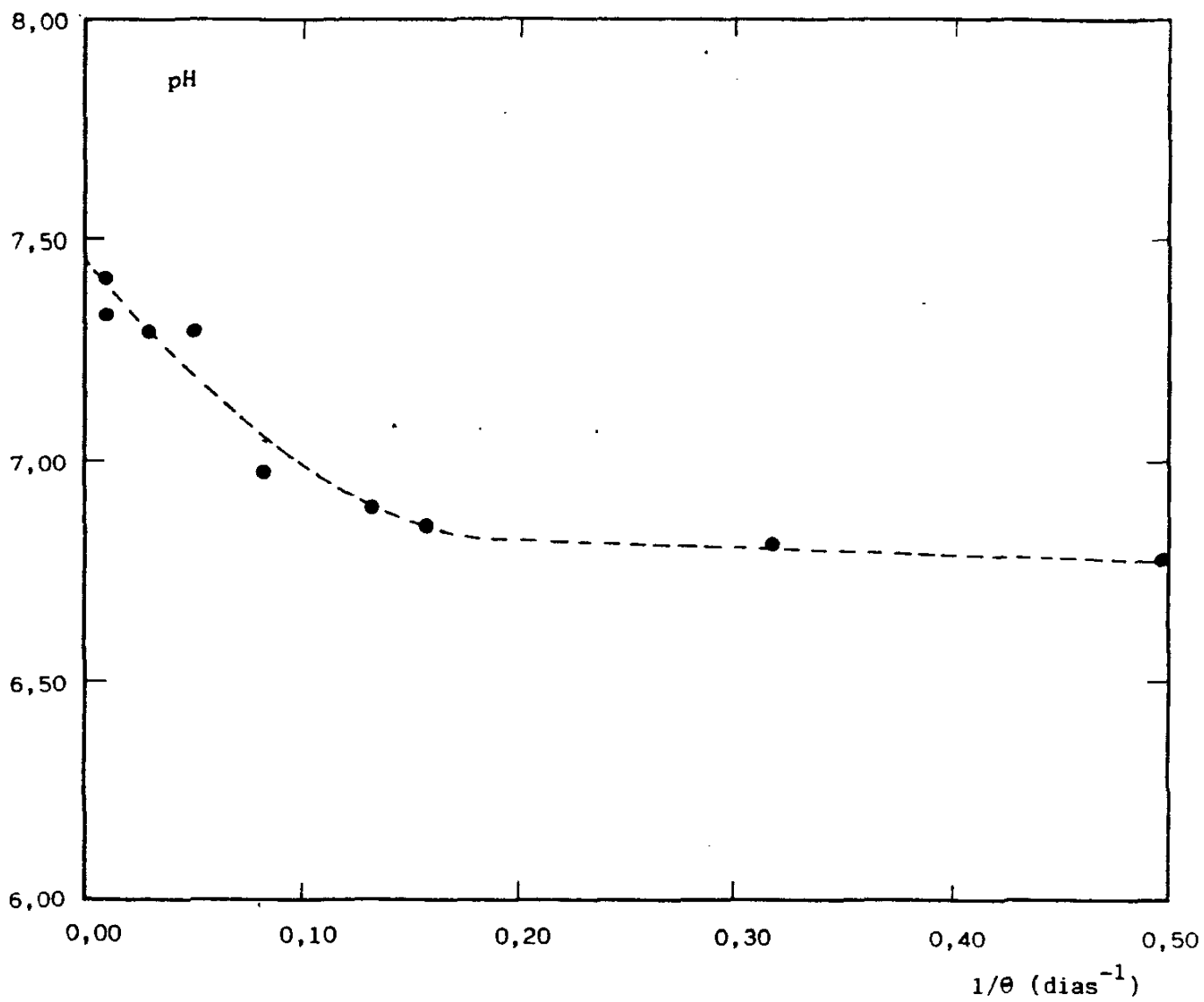


Figura 4.2

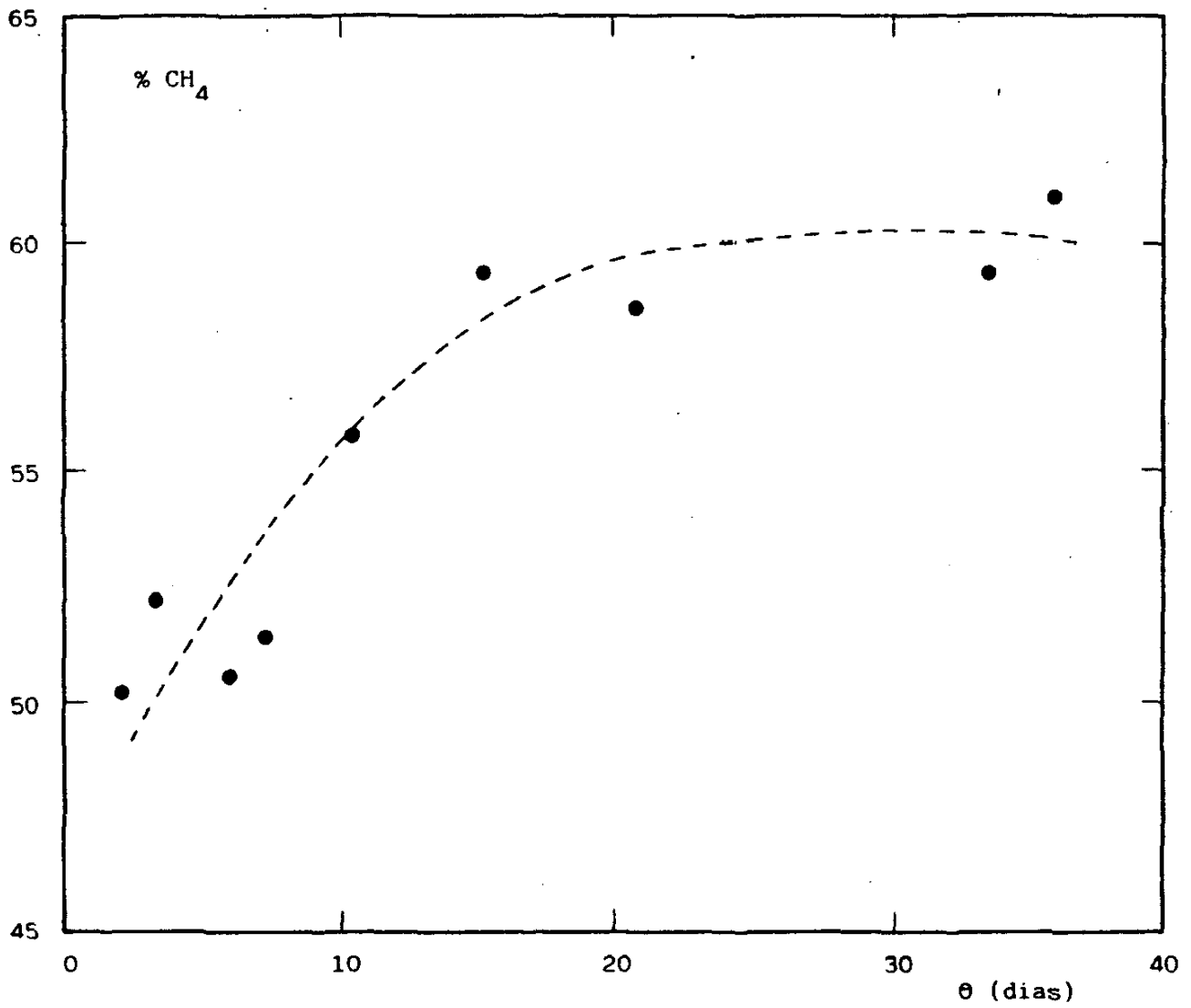


Figura 4.3

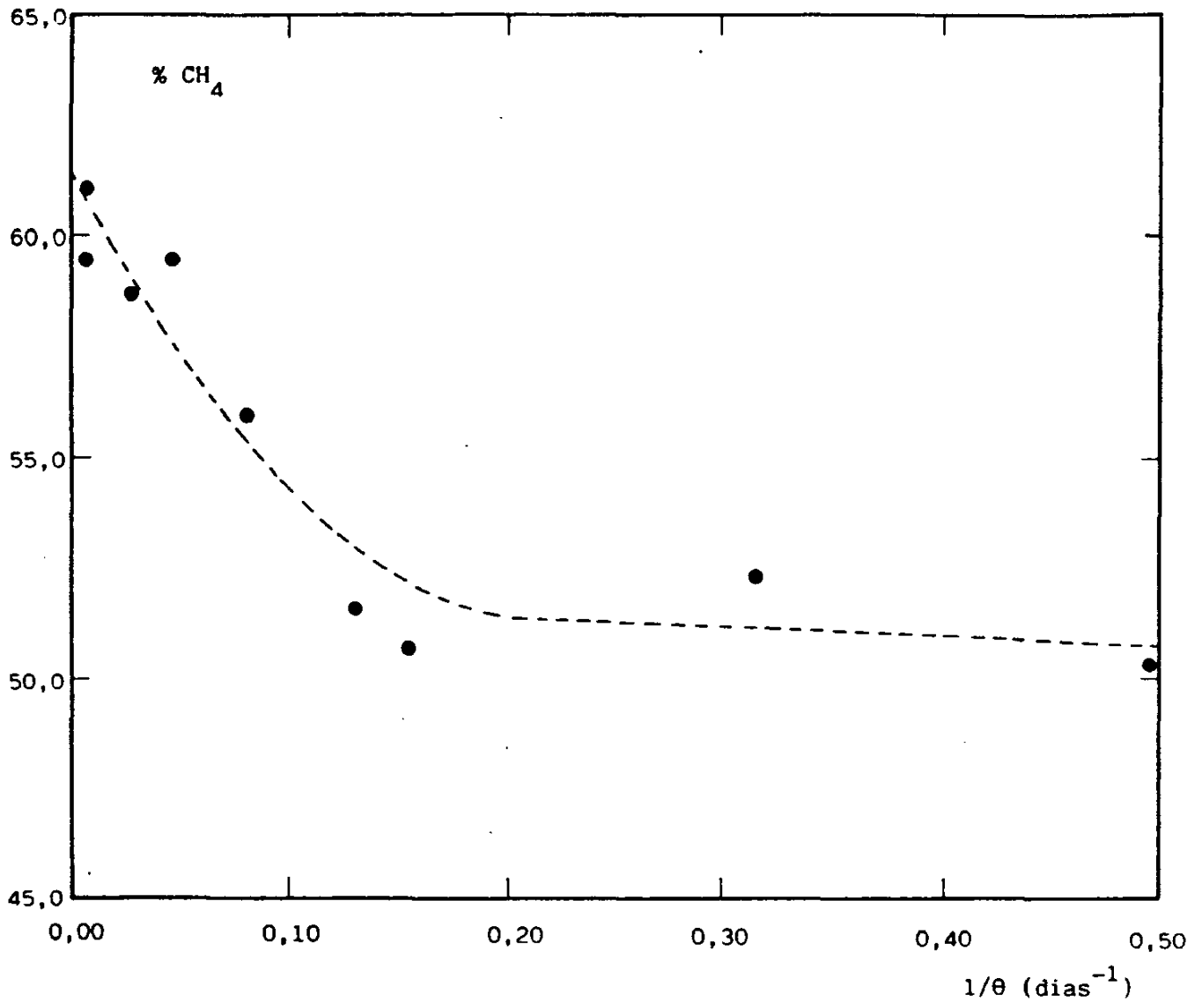


Figura 4.4

el porcentaje de metano varía linealmente y de forma acusada con $1/\theta$ para valores del TRH superiores a 7 días, alcanzando un valor máximo en torno al 61 %; a TRH inferiores la composición permanece relativamente constante, en torno a un valor medio del 51 %. La pendiente de la curva $CH_4 - 1/\theta$ cambia bruscamente en el punto de TRH citado.

La similitud en el comportamiento de las variables pH y CH_4 frente al TRH permite sospechar de la existencia de una cierta relación entre las dos primeras variables, como ya ha sido indicado por algunos autores. Por este motivo se abordó el estudio de la variación de CH_4 con el pH, representándose los valores correspondientes, para cada TRH, en la Figura 4.5. La gráfica muestra una aceptable relación lineal entre ambas variables ($r = 0,974$), lo que confirma la hipótesis enunciada, relación que en la práctica podría ser de gran utilidad en una planta industrial, ya que permitiría estimar la composición del gas mediante la medida del pH del efluente, operación de mucha mayor simplicidad que la medida directa de la composición de metano.

Para el aprovechamiento energético de un sistema de digestión anaerobia, además de conocer la calidad del gas es imprescindible realizar un estudio de su cantidad. Para ello se obtuvieron los valores de la productividad de metano, B ($m^3 CH_4/kg SV$) y se analizó su variación con el TRH, datos que se representan en la Figura 4.6.

A diferencia de lo que sucedía con las variables estudiadas anteriormente, esta variable no parece llegar a su valor máximo de forma asintótica al aumentar el TRH, siendo su límite inferior cero, mientras que el límite superior, o máxima productividad de metano del sustrato, B_{∞} , definida para $\theta \rightarrow \infty$ se puede determinar como la ordenada en el origen de la curva $B - 1/\theta$, tal como se ha hecho en la Figura 4.7. Se obtiene el valor $B_{\infty} = 0,260$ ($m^3 CH_4/kg SV$) y se observa el ya citado cambio de pendiente a TRH = 6-7 días.

Si se tiene en cuenta que la pendiente en cualquier punto de la curva de la Figura 4.6 representa la velocidad de degradación del sustrato al TRH correspondiente ($m^3 CH_4/kg SV.día$), se puede observar que dicha velocidad de degradación disminuye con el TRH.

Asimismo se ha analizado la velocidad volumétrica de producción

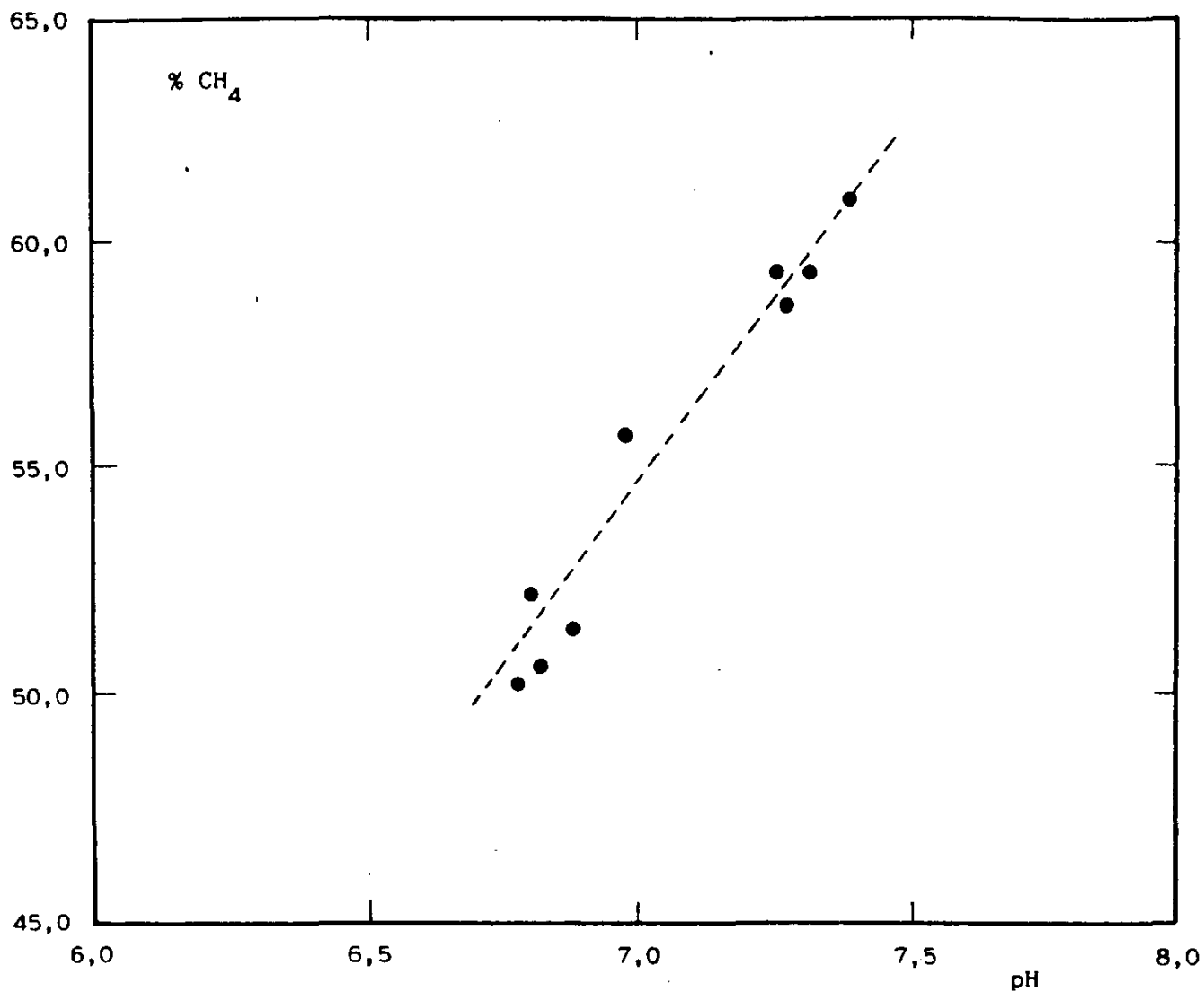


Figura 4.5

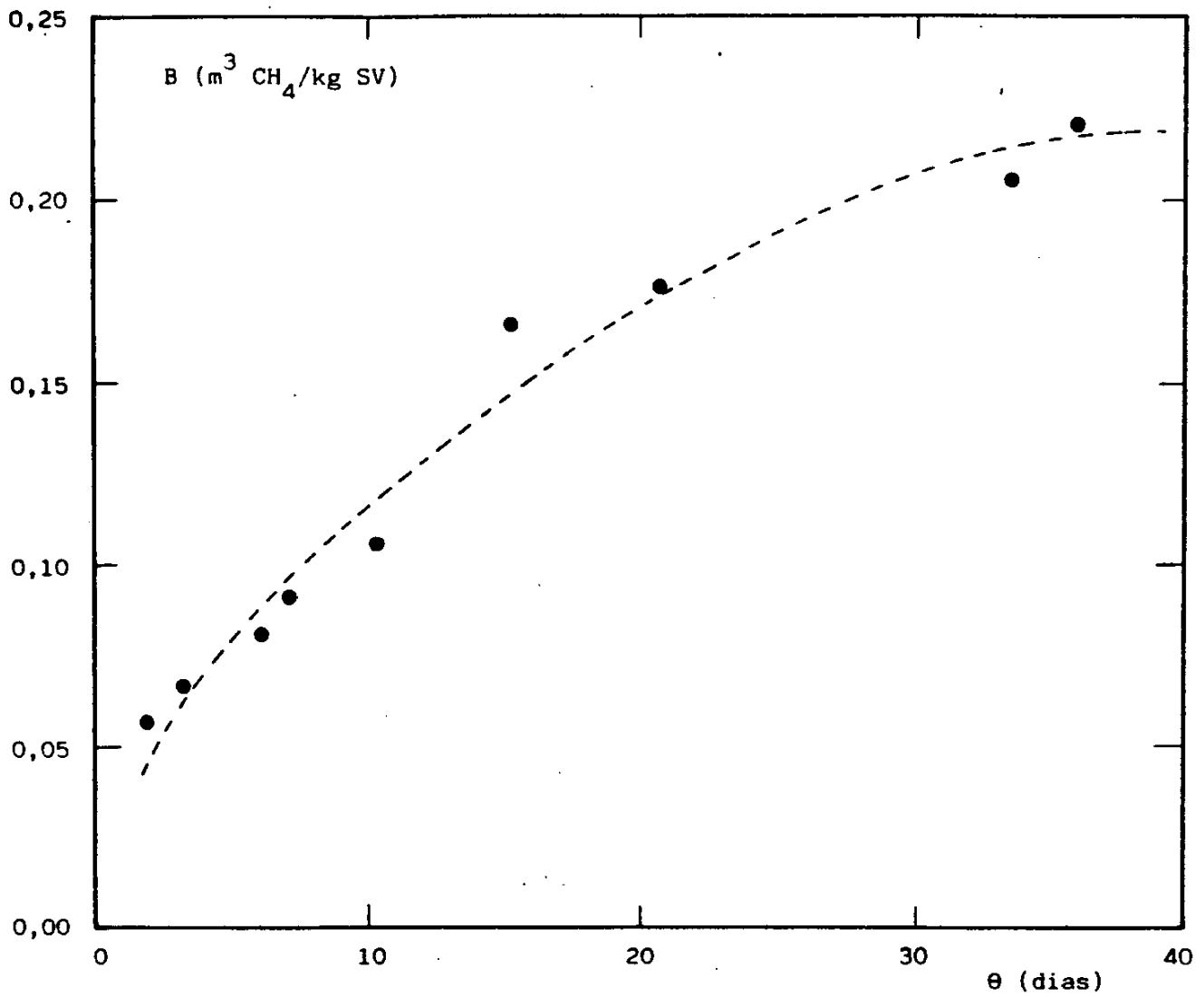


Figura 4.6

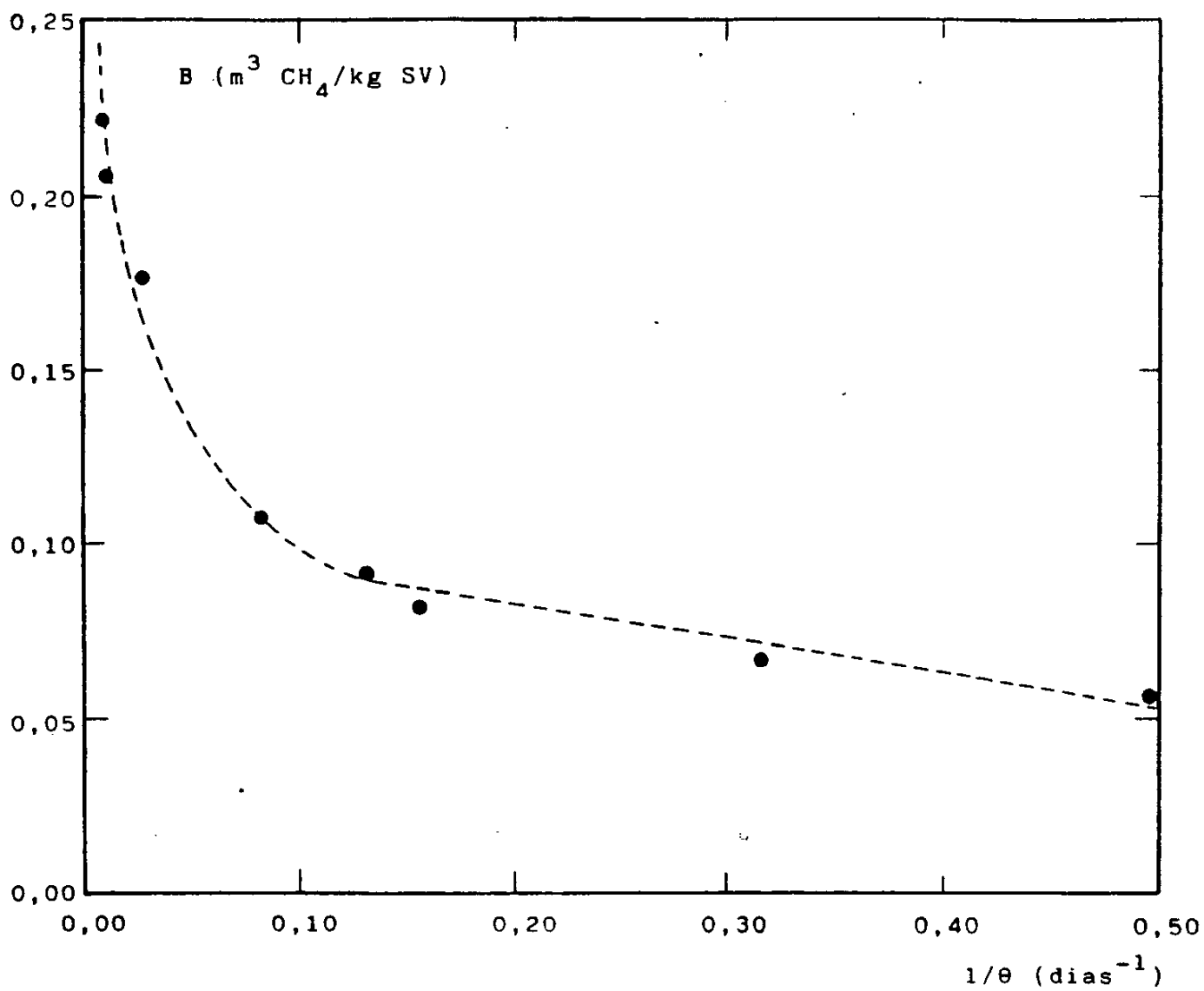


Figura 4.7

de gas, G (m^3 gas/ m^3 digestor.día), al ser esta variable de gran importancia para el diseño de digestores y del sistema de aprovechamiento de gas. En este sentido, la Figura 4.8 muestra una representación de los datos obtenidos para esta variable frente al TRH, donde se puede observar que esta variable evoluciona de forma inversa a la del resto de las variables estudiadas, es decir, el valor de G disminuye al aumentar el TRH, dándose los valores máximos de G a TRH muy pequeños.

SISTEMA: ROLO DE PLATANERA (PILO)

En la Tabla 4.2 se muestran los resultados correspondientes a la operación en estado estacionario de los digestores alimentados con rolo de platanera, con una concentración en la alimentación de 32,5 g SV/l.

Se puede observar en la Tabla 4.2 que los TRH de operación son considerablemente superiores a los estudiados para los lodos. Ello es debido a que, operando a TRH inferiores que los indicados, el sistema no era estable, ya que no se mantenía espontáneamente constante ninguna de las variables medidas, B, % CH₄ y pH. En efecto, representando los valores de estas variables, medidas para TRH = 29,7 días frente al tiempo (Figura 4.9), se observa una lenta caída de aquéllos, de forma que a los 40 días de haber comenzado la alimentación correspondiente al TRH estudiado, el proceso se había detenido completamente.

Por su parte, operando a TRH aún más bajos, TRH = 23,8 días la caída de los valores de las variables con el tiempo es aún más brusca, tal como muestra la Figura 4.10, parándose completamente el proceso después de 12 días de haberse comenzado a alimentar el sistema con la cantidad de sustrato correspondiente al TRH citado.

Todo ello indica que el sistema alimentado con rolo de platanera sólo es estable a TRH > 37 días, lo que se puede confirmar analizando los valores obtenidos para el pH. Como se observa en la Figura 4.11, el pH disminuye al hacerlo el TRH, en el intervalo de esta variable que permite un proceso estable. Por su parte, el valor máximo que podría alcanzar el pH sería de 7,24, obtenido de la ordenada en el origen de la representación del pH frente al inverso del TRH. Este

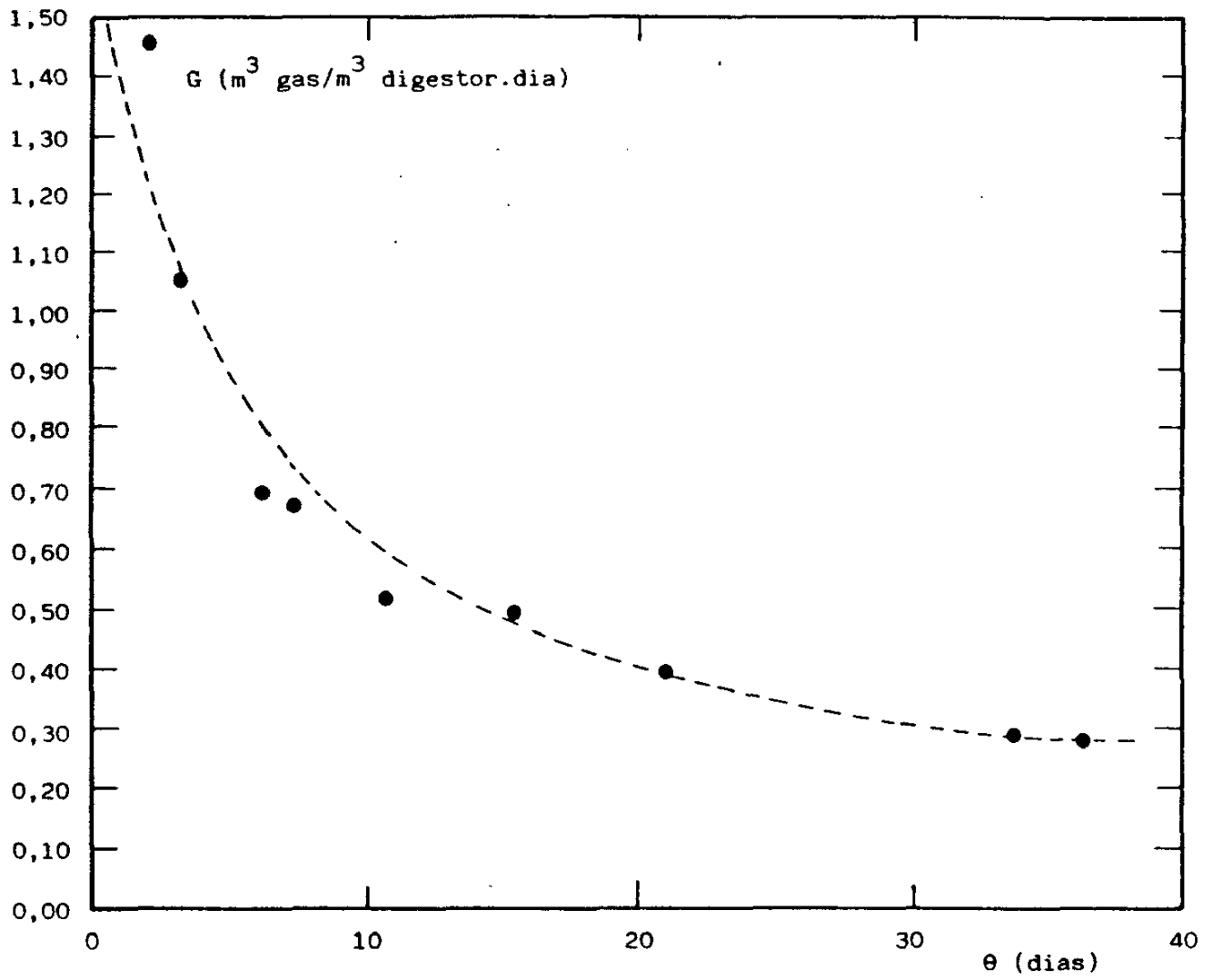


Figura 4.8

TABLA 4.2

Resultados en estado estacionario

Sustrato: Rolo de platanera

Experimento	TRH (días)	G (l gas/l dig.día)	B (l CH ₄ g SV)	% CH ₄	pH
PILO-1	72,1	0,419	0,383	41,24	7,12
PILO-2	57,4	0,490	0,368	42,57	7,10
PILO-3	49,2	0,349	0,225	42,52	7,08
PILO-4	40,3	0,397	0,209	42,37	7,10
PILO-5	36,9	0,464	0,210	39,85	6,98

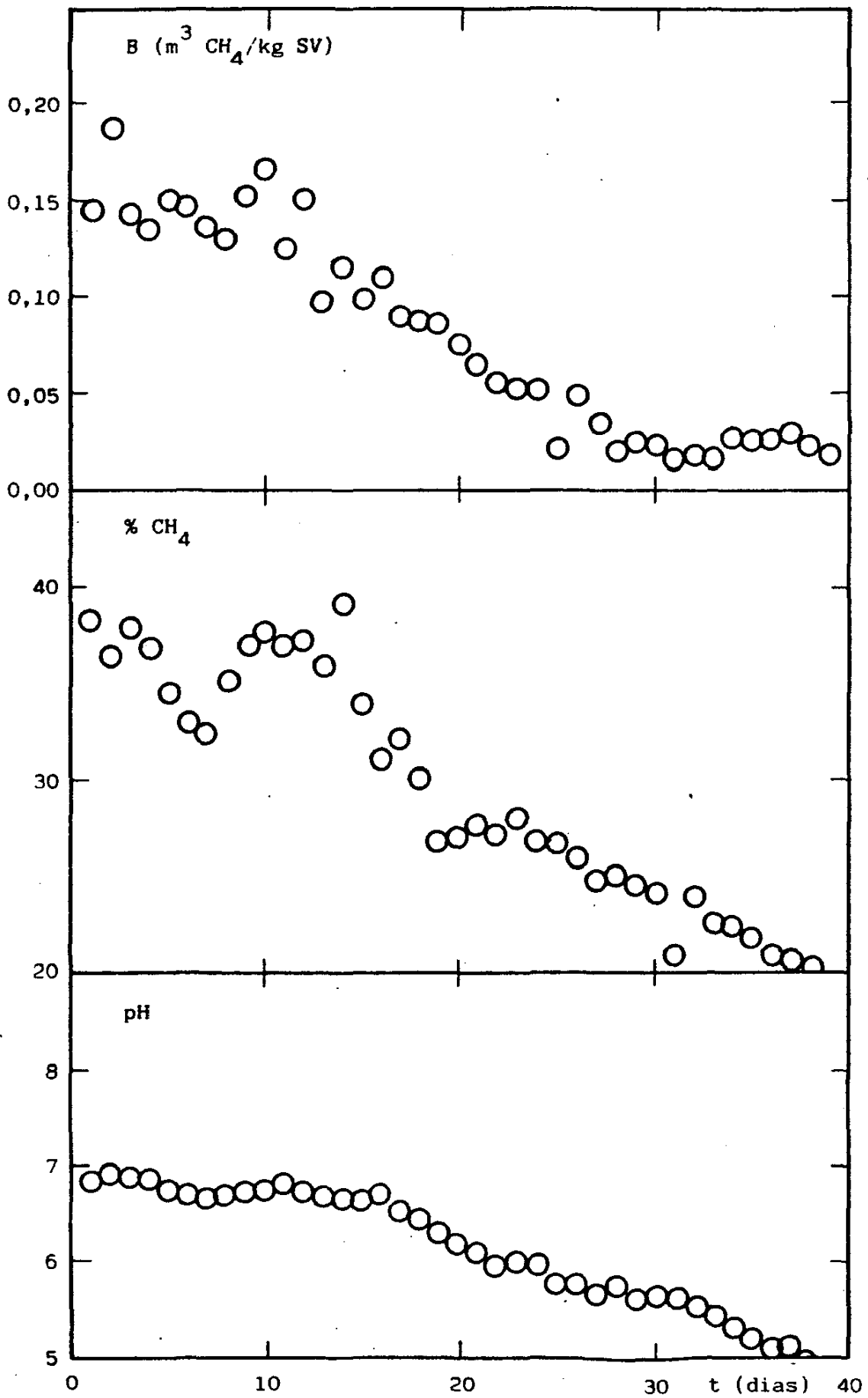


Figura 4.9

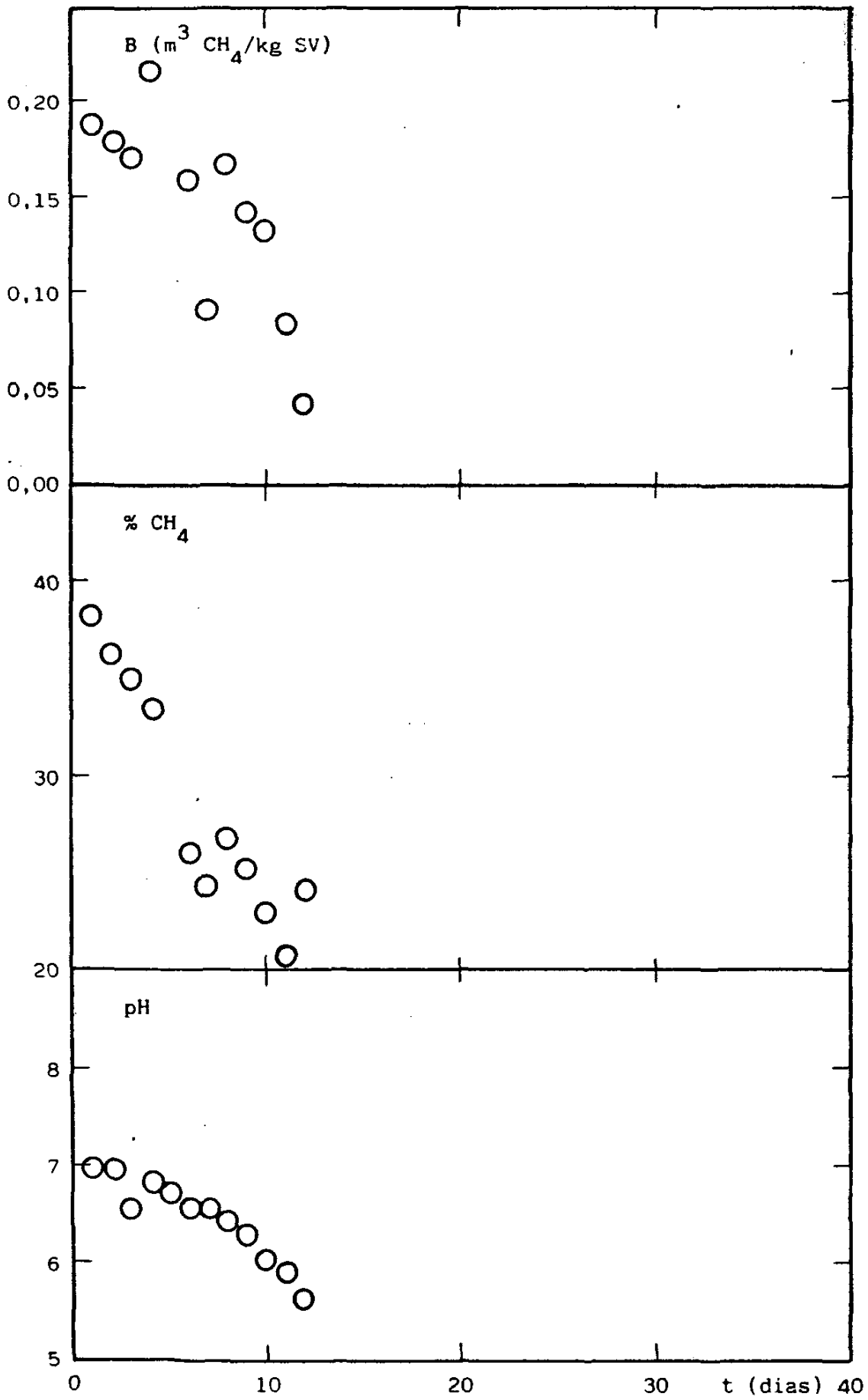


Figura 4.10

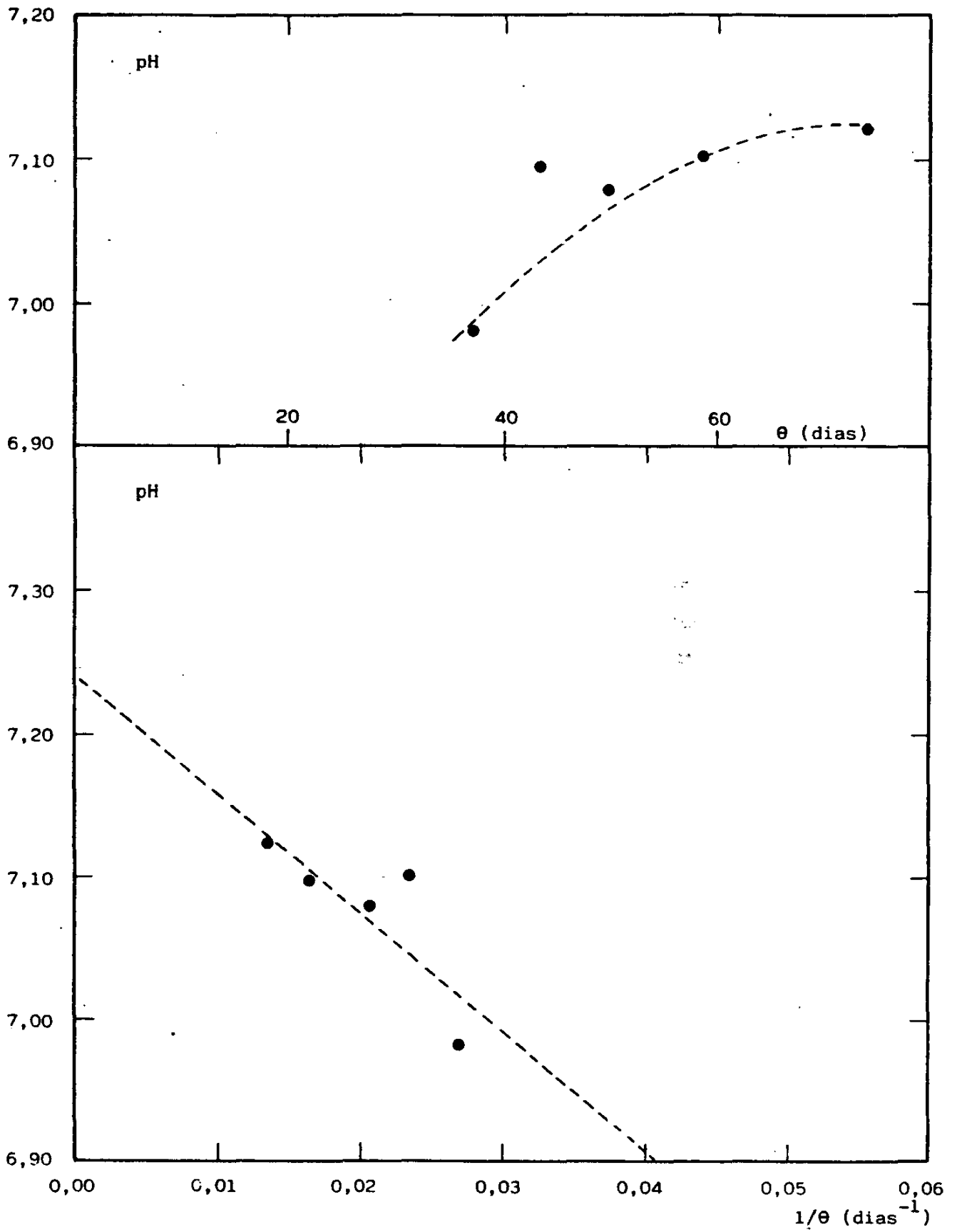


Figura 4.11

valor del pH, aunque comprendido dentro de los valores óptimos citados anteriormente, indica una mayor producción de ácidos en el sistema.

En el intervalo de TRH estudiado, la composición en metano del gas producido por el rolo de platanera es sensiblemente inferior a la de los lodos de depuradora. Como ya se ha indicado, para éstos existía una relación lineal entre la composición del gas y el pH; sin embargo, en el caso del rolo de platanera dicha relación no se observa, ya que los datos mostrados en la Tabla 4.2 permiten observar que el porcentaje de metano se encuentra alrededor de un valor medio del 41,7 % en el intervalo de TRH considerado, resultado sensiblemente menor al determinado para los lodos, para los que en ningún caso se obtuvieron valores inferiores al 50 %.

La Figura 4.12 muestra la variación de la productividad de metano con el TRH para el sistema de digestión del rolo de platanera, pudiéndose observar que los puntos se alinean sobre una recta en el intervalo considerado. Ello significa que la velocidad de degradación del sustrato es prácticamente constante, ya que la pendiente de esta recta representa el caudal de metano generado por unidad de masa de SV y unidad de tiempo. Esto explicaría además la relativa constancia observada en la composición del gas en el intervalo de TRH estudiado.

Por otro lado, y con objeto de estimar la máxima productividad de metano, se representaron los valores de B frente a $1/\theta$ (Figura 4.13), obteniéndose una ordenada en el origen ($\theta \rightarrow \infty$) de $B_{\infty} = 0,587 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{kg SV}$, valor que duplica el obtenido para los lodos, lo que parece indicar una mayor degradabilidad del rolo de platanera, hecho en consonancia con su mayor contenido en carbono susceptible de ser degradado.

En lo que se refiere a la velocidad de producción de metano, calculada de los datos de la Tabla 4.2, su valor oscila alrededor de una media de $0,175 \text{ (m}^3\text{CH}_4/\text{m}^3\text{digestor.día)}$, para TRH altos. A TRH = 36,9 días, mínimo de comportamiento estable, se obtiene un máximo de velocidad de producción de metano, que resulta ser $M = 0,184 \text{ (m}^3\text{CH}_4/\text{m}^3\text{digestor.día)}$, prácticamente la mitad del valor máximo obtenido para los lodos de depuradora; ello se podría deber a una menor actividad de los microorganismos metanogénicos presentes en la digestión del rolo de platanera por la alta producción de ácidos

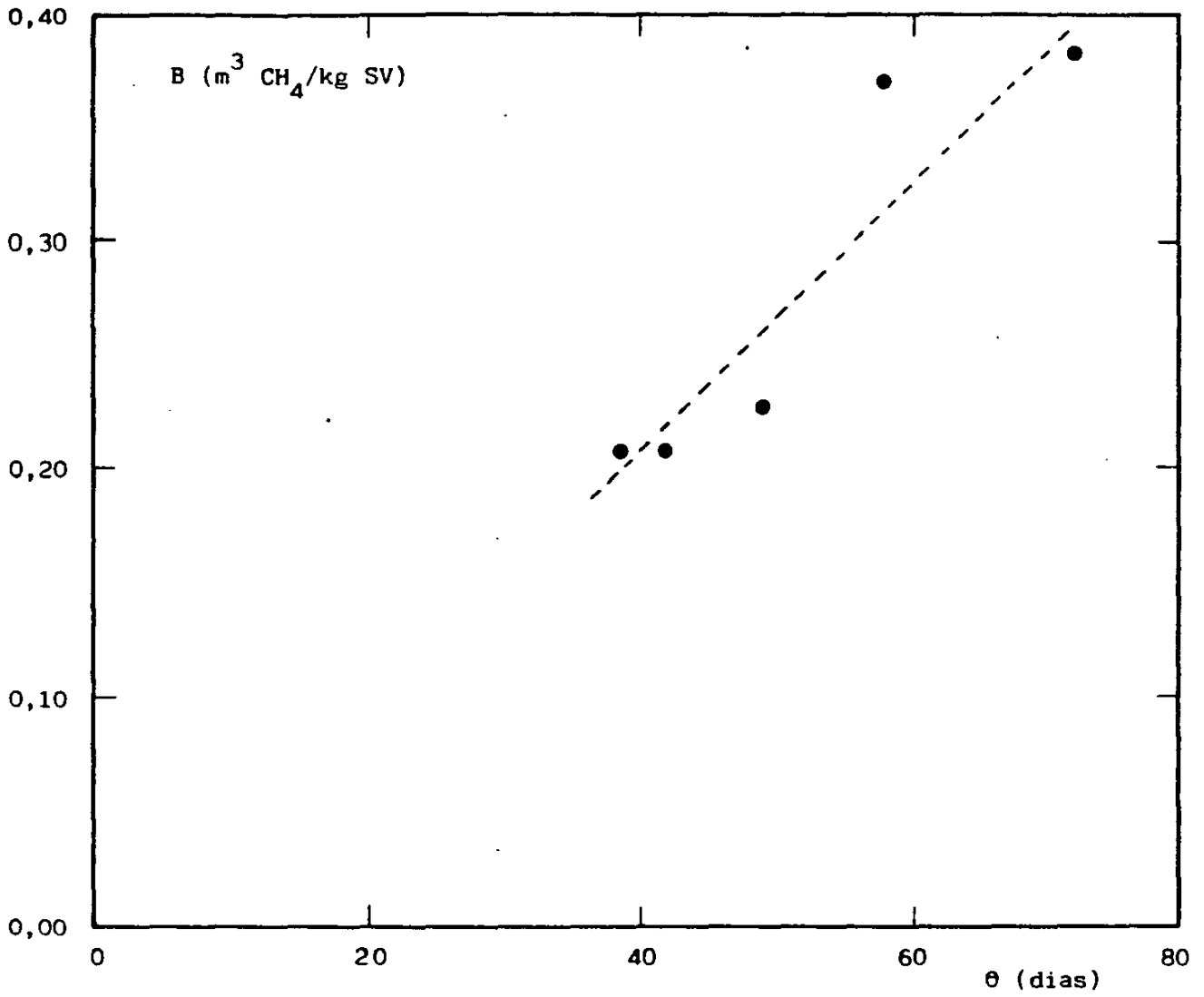


Figura 4.12

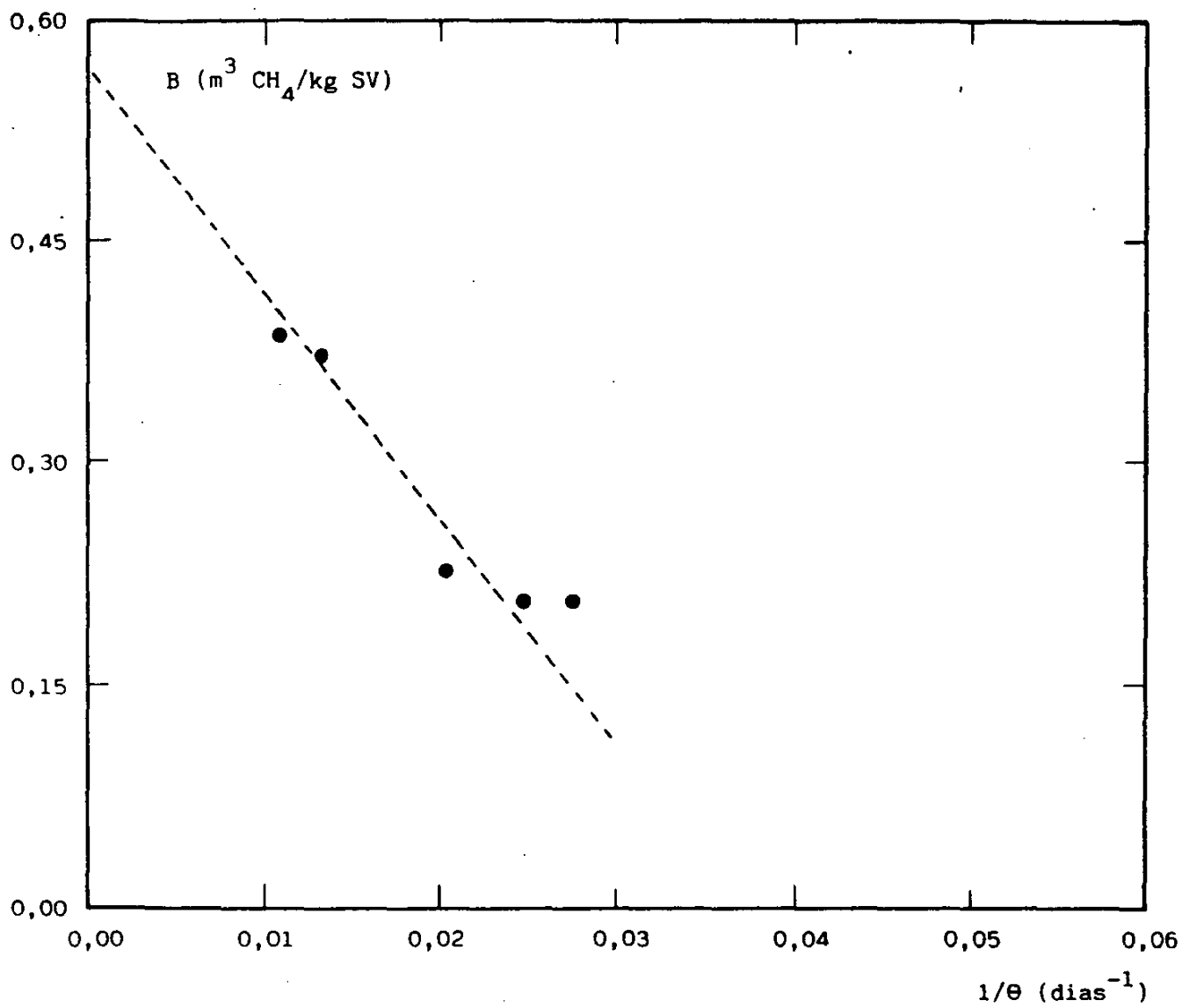


Figura 4.13

volátiles que se presenta en este sistema.

SISTEMAS MIXTOS (P1L1, P2L1, P3L1)

A partir de los resultados experimentales se pueden obtener los valores de estado estacionario de los tres sistemas mixtos rolo de platanera/lodos de depuradora estudiados, indicándose los resultados en la Tabla 4.3. Estos tres sistemas se caracterizan por tener diferentes relaciones de SV de cada uno de los sustratos, SV_P/SV_L , siendo estas relaciones 1:1, 2:1 y 3:1.

Los tres sistemas estudiados han sido sometidos a digestión anaerobia entre 22 y 50 días de TRH. El límite inferior lo proporcionó el proceso en sí, ya que a TRH más bajos los tres sistemas se volvían inestables, siguiendo un comportamiento análogo al ya citado para el sistema formado sólo por rolo de platanera.

La evolución del pH en el intervalo de TRH estudiado fue similar para los tres sistemas: ninguno de ellos presentaba una clara relación con el TRH, sino que el valor de aquella variable oscilaba, con pequeñas diferencias, alrededor de un valor medio, que en todos los casos era 7,31, superior al obtenido para el rolo de platanera.

Obsérvese asimismo que el TRH mínimo para el que se produce la estabilidad de este sistema se encuentra a TRH intermedios a los de los dos sistemas puros: mientras que P0L1 permite la operación a cualquier TRH, P1L0 sólo funciona de forma estable a $TRH > 37$ días; el límite inferior de estabilidad de los tres sistemas mixtos es, como ya se ha indicado, de $TRH = 22$ días.

El porcentaje de metano en el gas para los tres sistemas mixtos no parece depender directamente del TRH, aunque sí de la composición del sustrato. En efecto, para el sistema P1L1, esta variable presenta valores que oscilan ligeramente alrededor del 51 % en metano; para P2L1 la oscilación es alrededor de un valor medio del 48 % y para el sustrato P3L1 se producen pequeñas variaciones en torno al 47 % de metano.

El hecho de que el porcentaje de metano no dependa del TRH, como en el caso de los lodos de depuradora, parece indicar que el comportamiento de estos sistemas mixtos se asemeja más al del sistema de rolo de platanera, comprobándose además que los SV procedentes del

TABLA 4.3

Resultados en estado estacionario

Sustrato: Sistemas mixtos

Experimento	TRH (días)	G (l gas/l dig.día)	B (l CH ₄ g SV)	% CH ₄	pH
P1L1-1	49,8	0,358	0,325	50,15	7,28
P1L1-2	37,6	0,340	0,230	51,21	7,37
P1L1-3	27,7	0,359	0,166	50,56	7,30
P1L1-4	27,6	0,356	0,170	50,79	7,34
P1L1-5	21,7	0,434	0,168	50,14	7,25
P2L1-1	49,8	0,330	0,237	48,91	7,32
P2L1-2	49,7	0,393	0,250	46,60	7,33
P2L1-3	37,6	0,346	0,179	49,61	7,37
P2L1-4	37,5	0,342	0,179	49,03	7,35
P2L1-5	27,7	0,390	0,143	46,59	7,30
P2L1-6	27,6	0,403	0,156	49,85	7,32
P2L1-7	21,7	0,466	0,131	47,06	7,25
P3L1-1	50,2	0,297	0,197	46,56	7,31
P3L1-2	37,6	0,265	0,127	48,42	7,36
P3L1-3	27,7	0,442	0,148	46,81	7,30
P3L1-4	21,6	0,381	0,100	48,49	7,27

rolo de platanera influyen negativamente en la composición del gas, como ya se ha constatado al analizar los valores que toma esta variable en la digestión de los dos sistemas puros.

La representación de la productividad de metano en función del TRH (Figura 4.14) para los tres sistemas mixtos muestra que los puntos correspondientes a cada uno de ellos se alinean sobre sendas rectas de diferentes pendientes, lo que implica una velocidad de degradación de sustrato constante en cada caso. Este hecho vuelve a indicar la semejanza de estos sistemas con el de rolo de platanera.

Por su parte, la pendiente aumenta al hacerlo el contenido en lodos del sistema, lo que indica que la velocidad de degradación del sustrato es tanto mayor cuanto más SV procedentes de los lodos contenga el sistema. Asimismo, la productividad máxima de cada sistema disminuye al aumentar el contenido relativo de rolo de platanera en el sustrato. Así, para el sistema P1L1, $B_m = 0,412$ (m^3CH_4/kg SV), para P2L1, $B_m = 0,314$ (m^3CH_4/kg SV), y utilizando como sustrato P3L1, se obtiene que $B_m = 0,238$ ($m^3CH_4/kgSV$), según se deduce de las respectivas ordenadas en el origen de la representación gráfica que se muestra en la Figura 4.15.

Respecto a la velocidad de producción de metano, los tres sistemas presentan variaciones similares, tal como muestra la Figura 4.16. A medida que aumenta el contenido en rolo de platanera, la velocidad de producción es menor, permaneciendo aproximadamente constante a TRH superiores a 38 días. Por debajo de este TRH, P1L1 y P2L1 evolucionan hacia máximos situados en el límite inferior de estabilidad del intervalo, mientras que para P3L1 el máximo se encuentra a un TRH superior. En cualquier caso, el valor máximo está comprendido entre 0,207 y 0,219 (m^3CH_4/m^3 digestor.día), intermedio entre los obtenidos para los sistemas puros y a unos TRH también intermedios.

ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS UTILIZADOS

Con objeto de estudiar la influencia del contenido en lodos de las mezclas utilizadas sobre las velocidades de degradación de sustrato, se calcularon las productividades de metano con referencia a los SV procedentes de los lodos y a los SV aportados por el rolo de

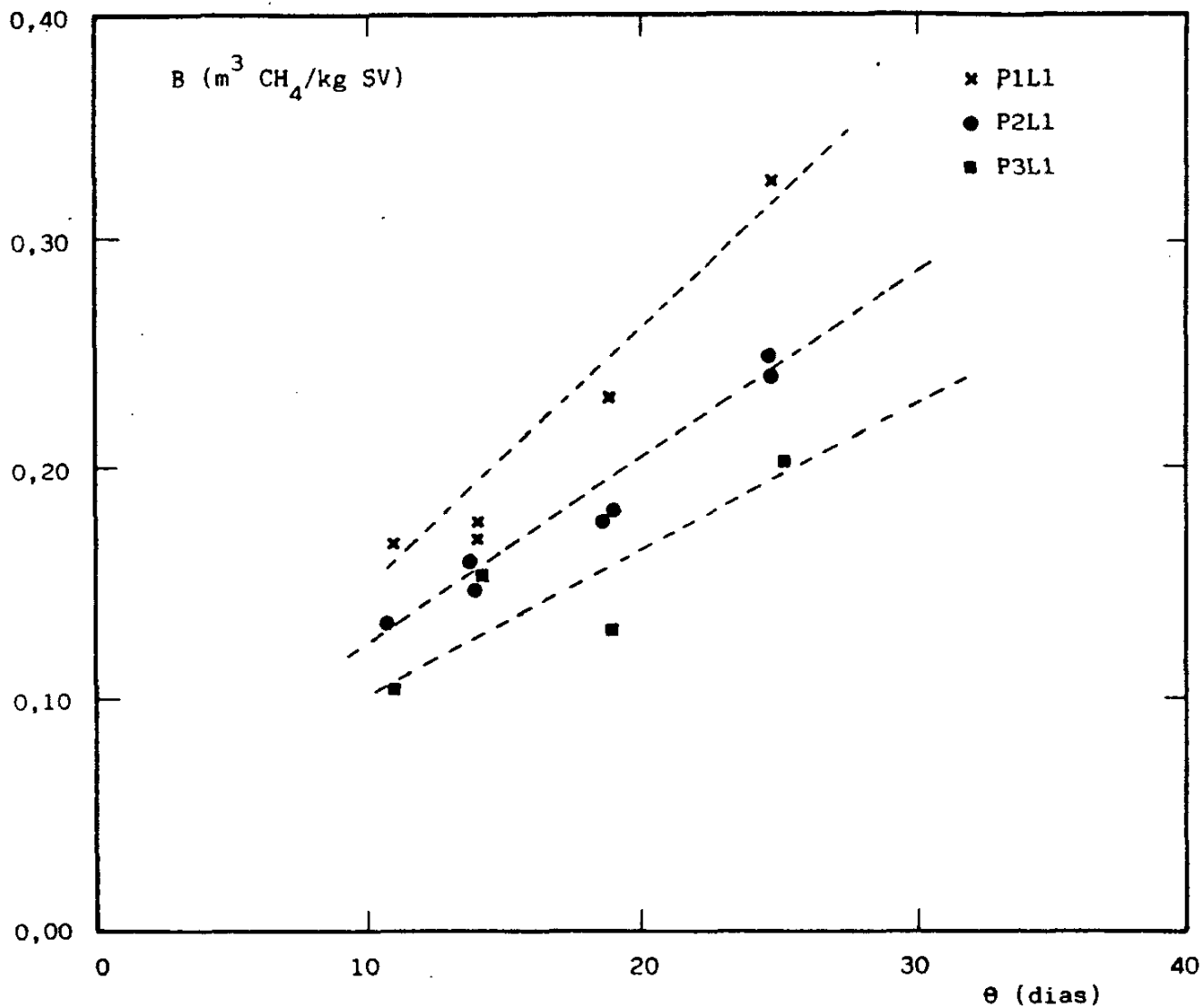


Figura 4.14

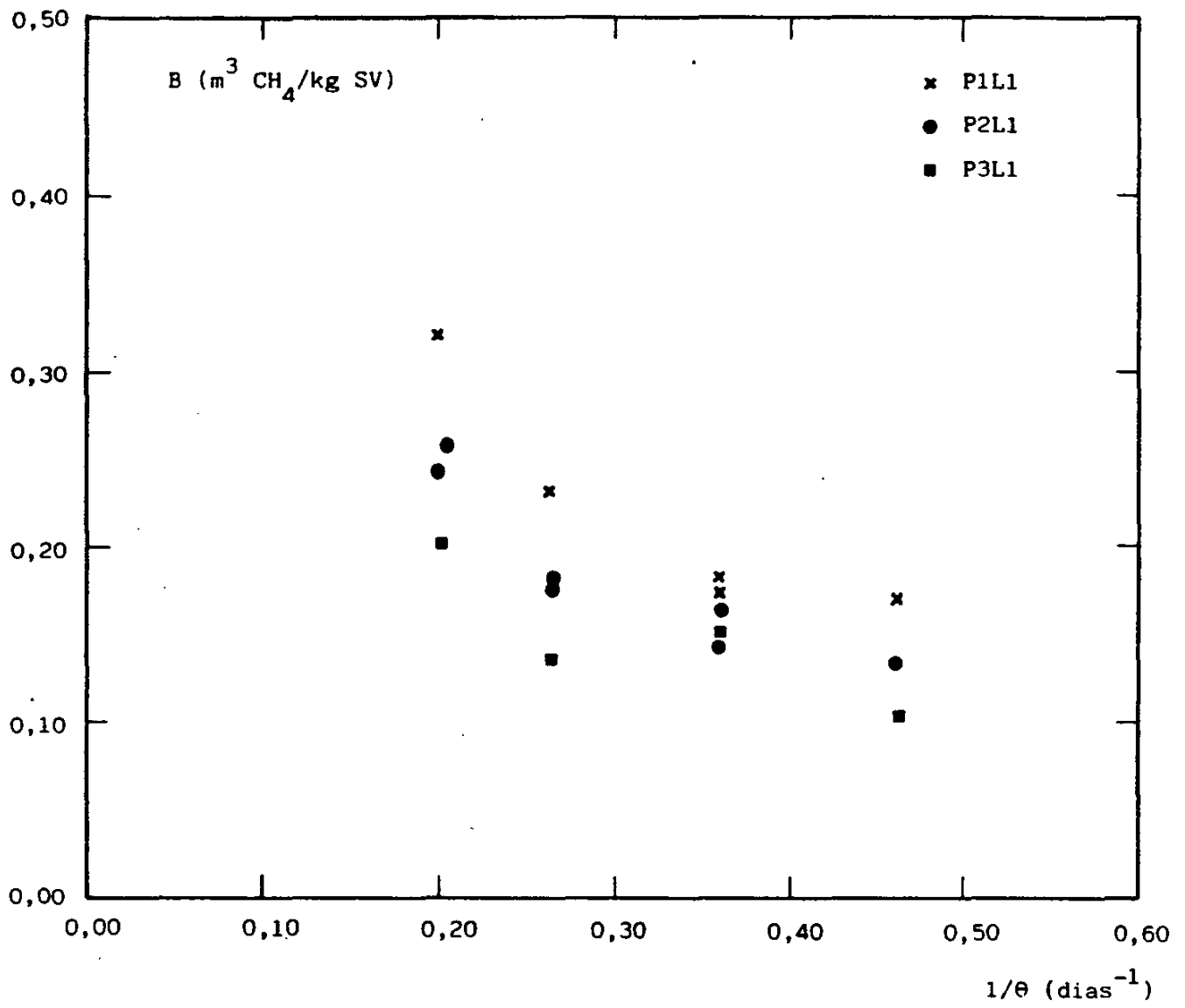


Figura 4.15

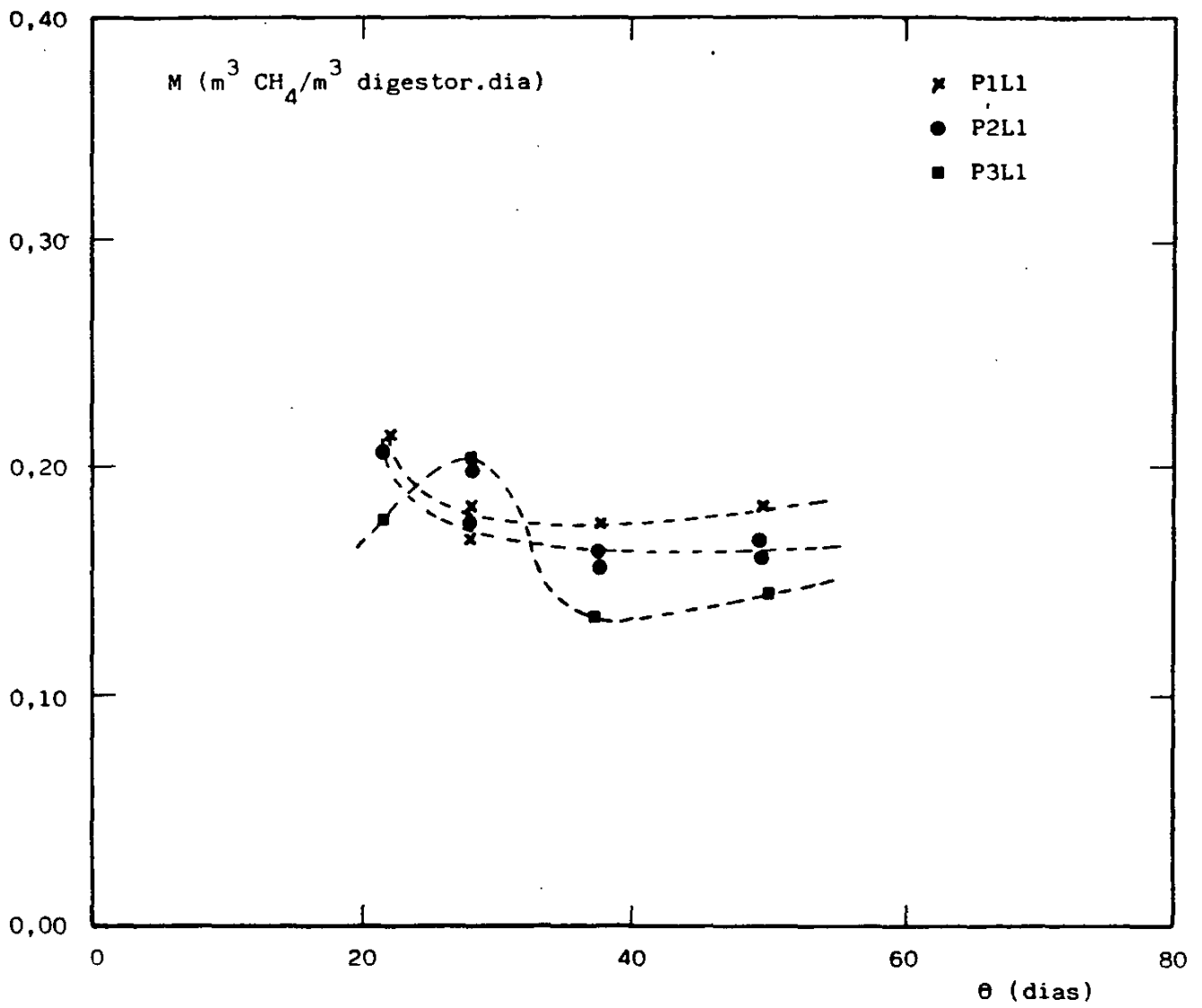


Figura 4.16

platanera. Se obtuvieron así los valores B_L ($m^3CH_4/kg [SV]_L$) y B_P ($m^3CH_4/kg [SV]_P$) y se representaron los resultados obtenidos frente al TRH.

En la Figura 4.17 se muestra la variación de los valores de B_L con el TRH, para las tres mezclas, además de los resultados del sistema POL1, en el cual $B_L = B$; evidentemente, el sistema P1L0, al no contener lodos en la alimentación, no es utilizable en esta comparación. Como se puede observar, los datos correspondientes a las mezclas se alinean sobre sendas rectas, aproximadamente paralelas, mientras que los datos del sistema POL1, como ya se ha visto en la Figura 4.6, se sitúan sobre una curva cuya asíntota es la máxima productividad de metano del sistema, B_m . Sin embargo, en una pequeña zona de dicha curva, situada entre TRH = 6-16, la pendiente toma valores muy próximos a los de las tres rectas citadas para los sistemas mixtos.

Ello parece indicar que la velocidad de degradación de los SV de los lodos, representada por la pendiente de la recta $B_L - \theta$ y expresada como ($m^3CH_4/kg [SV]_L.día$), es prácticamente constante en todos los casos. Sin embargo, las producciones son sensiblemente superiores para los sistemas mixtos, al disponer en ellos los microorganismos de una fuente de alimentación adicional: los SV aportados por el rolo de platanera. Efectivamente, para el sistema POL1 la velocidad de degradación del sustrato disminuye considerablemente por encima del intervalo de TRH indicado, al agotarse el alimento de los microorganismos. Asimismo, y considerando sólo las mezclas, la productividad es tanto menor cuanto mayor es la disponibilidad de rolo de platanera.

Por su parte, en la Figura 4.18 se han representado los valores de B_P frente al TRH de las mezclas junto al sistema P1L0, para el cual $B_P = B$; en este caso no se puede considerar el sistema POL1. Se puede observar ahora que el comportamiento de esta variable es completamente diferente al de B_L . Los puntos correspondientes a los sistemas mixtos se alinean sobre sendas rectas, cuyas ordenadas en el origen son muy próximas a cero. Asimismo se puede observar que el sistema P1L0 prácticamente se confunde en su comportamiento con el P3L1. Todo ello indica que la velocidad de degradación de los SV aportados con el rolo

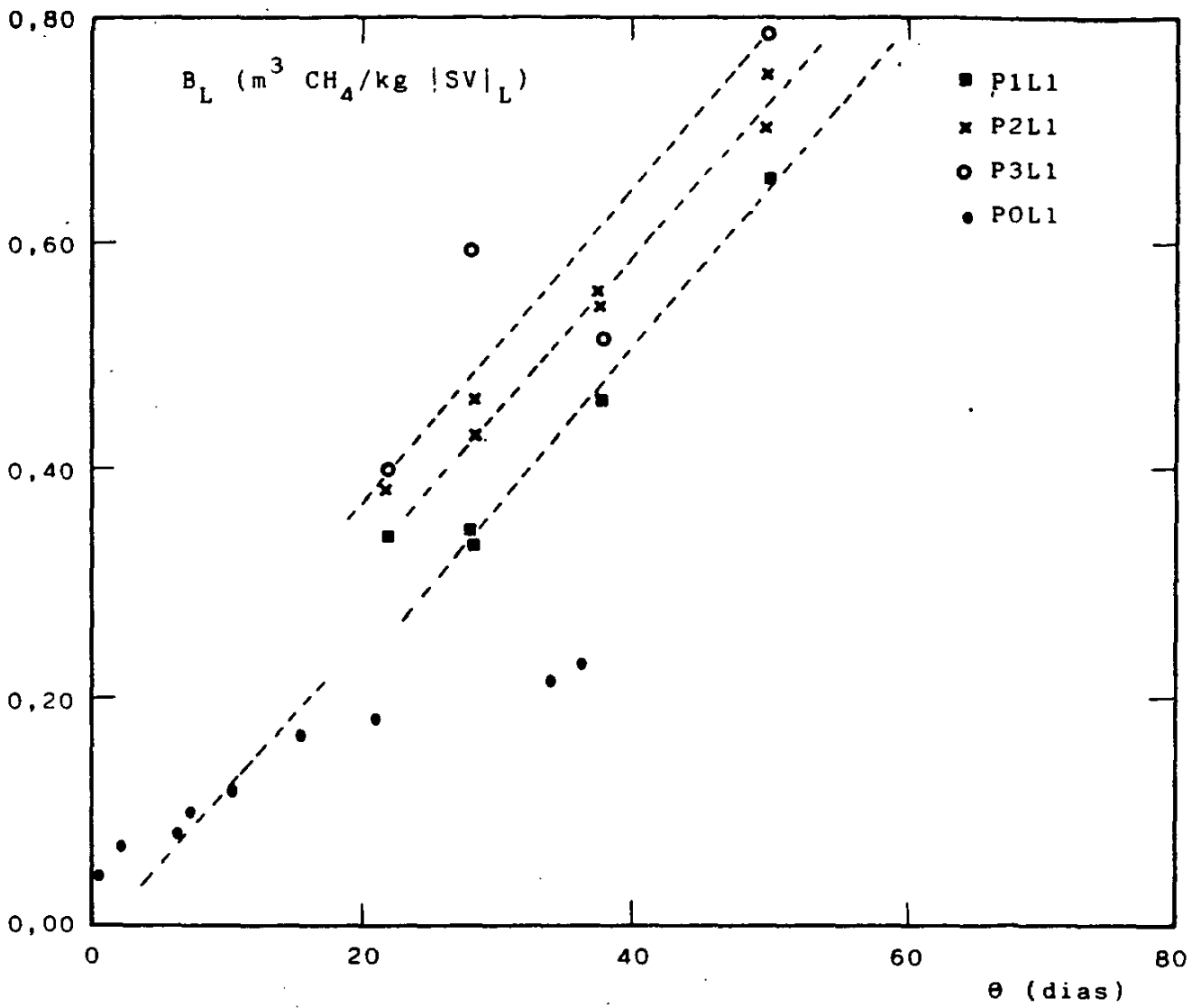


Figura 4.17

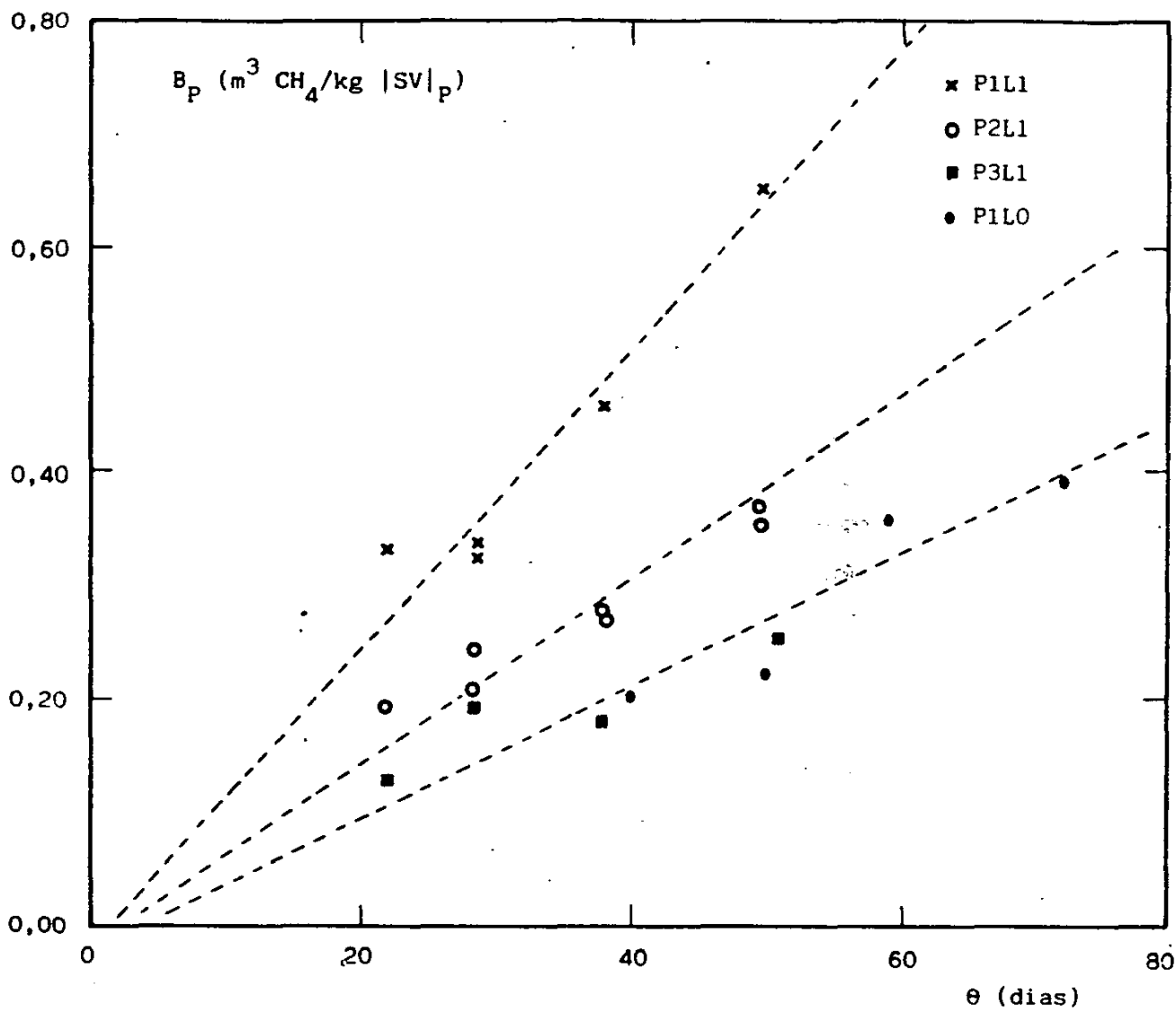


Figura 4.18

de platanera varía con la concentración, o lo que es lo mismo, ésta influye sobre la pendiente de las rectas $B_p - \theta$.

Un análisis de regresión lineal simple de estas pendientes con los SV del sistema muestra un coeficiente de regresión máximo de 0,992 para SV_L, lo que permite deducir que la velocidad de degradación de los SV del rolo es tanto mayor, cuanto mayor sea el contenido en lodos del sistema. Este hecho explica, además, la coincidencia de los sistemas P3L1 y P1L0: el primero posee una concentración de lodos tan baja que ésta prácticamente no influye en la producción de metano y, por tanto, el sistema se comporta de forma casi equivalente al formado sólo por rolo de platanera.

Todo ello parece indicar que los SV de los lodos están asociados fundamentalmente a la concentración de microorganismos metanogénicos del sistema, mientras que los SV del rolo representan primordialmente una fuente de carbono para la alimentación de dichos microorganismos. Así, los lodos puros producen cantidades de metano relativamente bajas, agotándose el sustrato a TRH superiores a 20 días. El rolo de platanera produce cantidades de metano algo superiores, pero a TRH muy altos; incluso este sistema no es operativo por debajo de TRH = 37 días, ya que en estas condiciones se produce el lavado de los microorganismos metanogénicos con la consiguiente acidificación del sistema, y como la alimentación no contiene una cantidad suficiente, no se alcanza el equilibrio adecuado en el interior del digestor.

Ahora bien, al mezclar ambos sustratos, se logra favorecer el equilibrio microorganismos/sustrato, obteniéndose las mayores productividades de metano operando con suficiente cantidad de lodos, que aportan microorganismos metanogénicos y suficiente cantidad de rolo de platanera, que aporta el alimento para dichos microorganismos. Se explica así la mayor pendiente para el sistema P1L1 en la Figura 4.14, dependiendo las velocidades de degradación del sustrato principalmente del contenido en SV de los lodos, o lo que es lo mismo, del contenido en microorganismos del sustrato.

Por su parte, la velocidad de producción de metano también se ve afectada por el contenido en SV, como se ha mostrado en la Figura 4.16 y, por tanto, debe existir una cierta influencia sobre aquélla de la concentración de microorganismos. Así, representando las velocidades

máximas de producción de metano para los tres sistemas mixtos frente al porcentaje de SV de lodos contenido en la mezcla, i_L , definido como $(100 \cdot [SV]_L / [SV]_T)$, se puede deducir que existe una relación lineal entre ambas variables, como muestra la Figura 4.19.

Si se extrapola esta relación para los sistemas puros se obtiene que, para P1L0 ($i_L = 0$), $M_{max} = 0,183$ (m^3CH_4/m^3 digestor.día), prácticamente idéntico al valor experimental, lo que confirma la relación existente entre los sistemas P3L1 y P1L0 enunciada anteriormente. Sin embargo, considerando el otro extremo de concentración, para P0L1 se obtiene a partir de la Figura 4.19 un valor $M_{max} = 0,254$ (m^3CH_4/m^3 digestor.día), mientras que el valor experimental asciende a 0,720 para $TRH \rightarrow 0$.

Ello puede ser debido a los diferentes TRH a los cuáles se producen estos máximos. Para los sistemas conteniendo rolo de platanera, los máximos de velocidad de producción ocurren a TRH mucho más altos y además muy cerca del límite inferior de estabilidad del sistema. En efecto, si se calcula el valor de M para el sistema P0L1 a un TRH de 20,7 días, que es el valor experimental más próximo al límite inferior de estabilidad de los sistemas mixtos, se obtiene un valor de 0,221 (m^3CH_4/m^3 digestor.día).

Por lo que respecta a la máxima productividad específica de metano, B_m (m^3CH_4/kg SV), los valores obtenidos para los tres sistemas mixtos asimismo siguen una relación lineal con el porcentaje de SV aportado por los lodos al sistema, como muestra la Figura 4.20. En este caso, la discrepancia entre los valores extrapolados para los sistemas básicos y los respectivos resultados experimentales es total, ya que los valores extrapolados son:

$$- \text{P1L0: } B_m = 0,077 \text{ (} m^3CH_4/kg \text{ SV)}$$

$$- \text{P0L1: } B_m = 0,754 \text{ (} m^3CH_4/kg \text{ SV)}$$

mientras que los experimentales resultan ser:

$$- \text{P1L0: } B_m = 0,587 \text{ (} m^3CH_4/kg \text{ SV)}$$

$$- \text{P0L1: } B_m = 0,260 \text{ (} m^3CH_4/kg \text{ SV)}$$

Para el caso de los lodos de depuradora, esta discrepancia se puede explicar si se tiene en cuenta lo indicado al comentar la Figura 4.17: aunque la velocidad de degradación de sustrato es constante para los lodos en el intervalo de $TRH = 6-16$ días, por encima del mismo

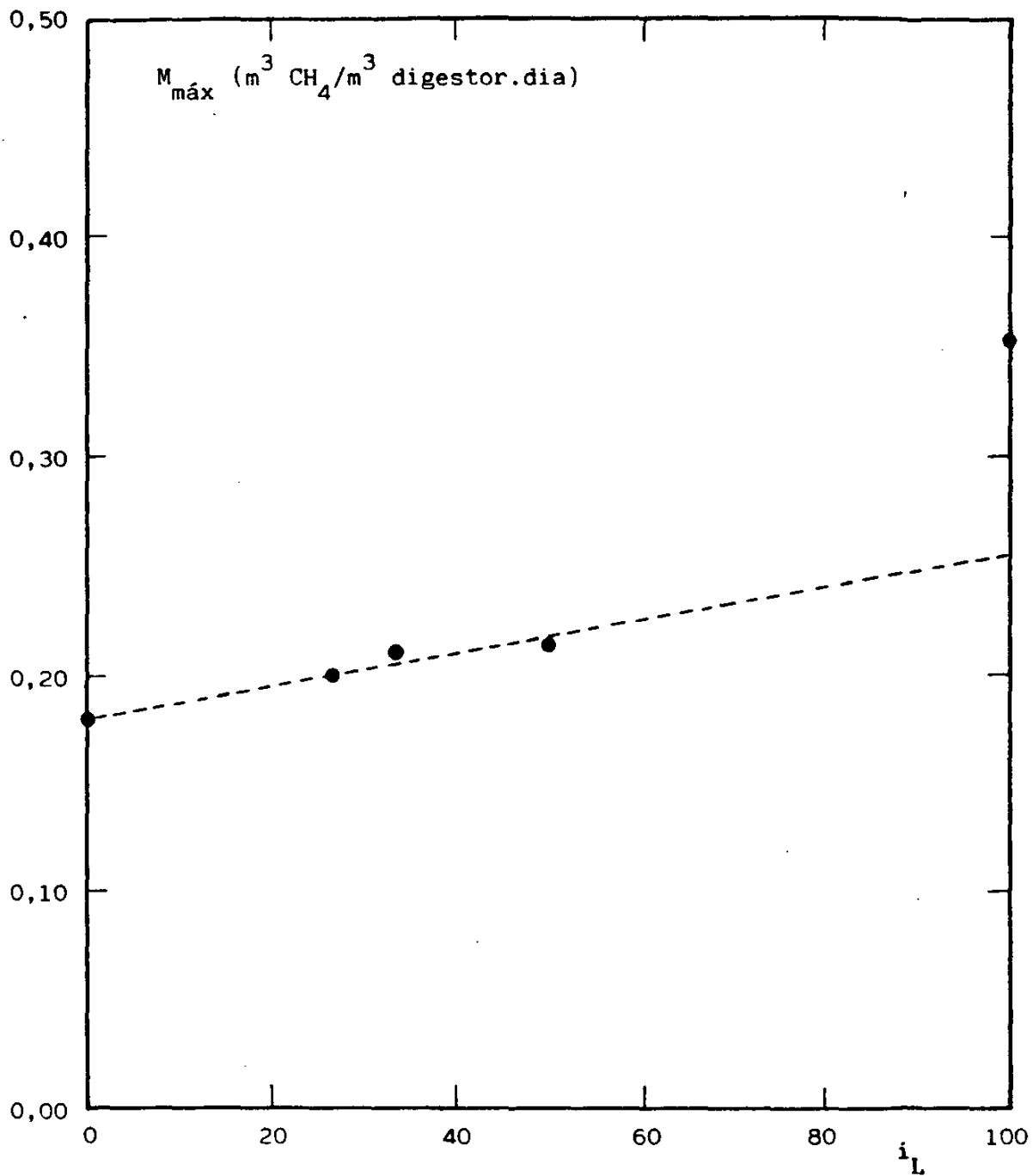


Figura 4.19

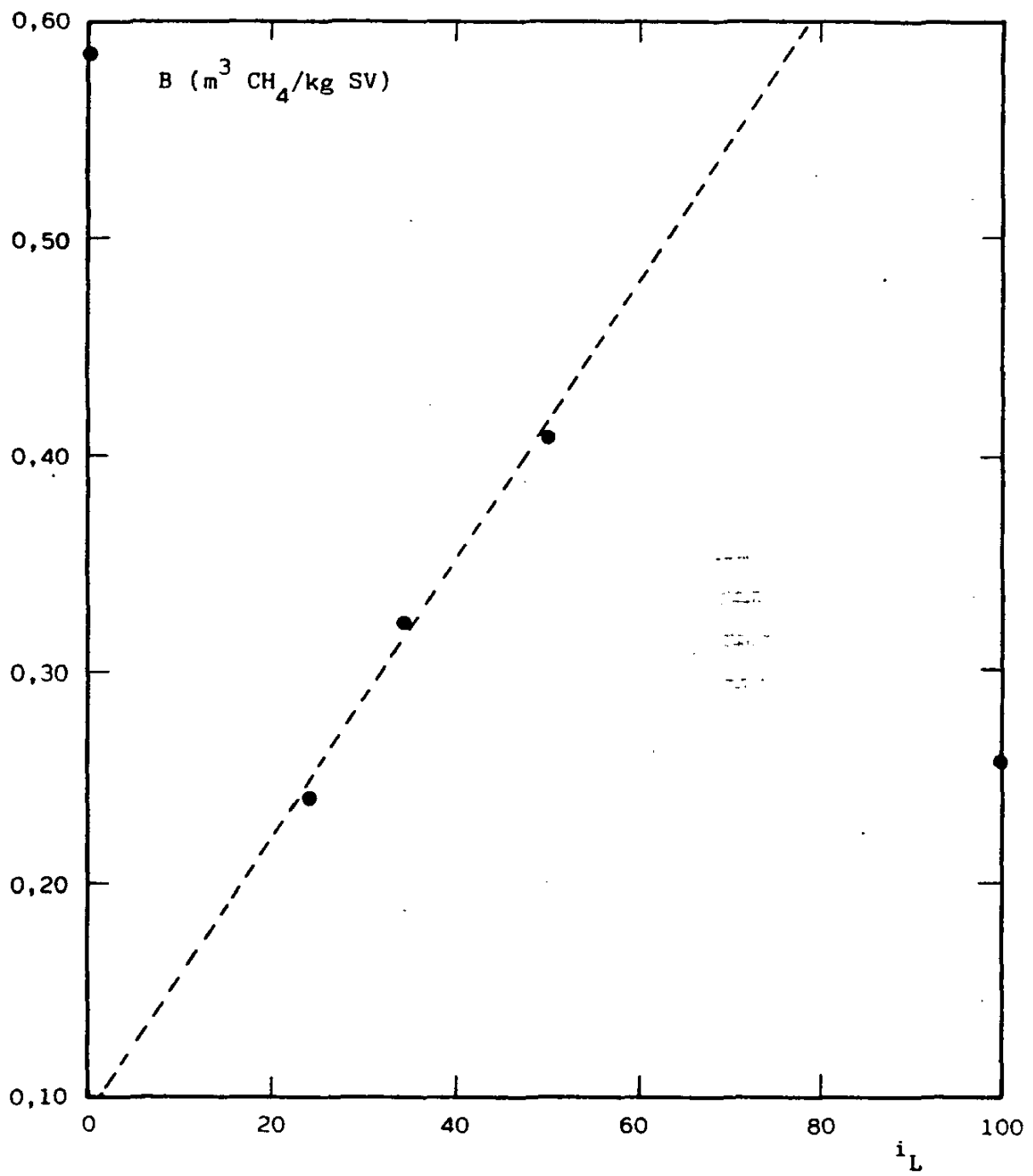


Figura 4.20

aquella decrece rápidamente, lo que debe producir un valor de B_0 inferior al obtenido por extrapolación de los sistemas mixtos, que tienen una velocidad de degradación constante.

Por su parte, para el sistema P1L0 sucede el fenómeno contrario: el valor experimental de B_0 es más de siete veces superior al obtenido extrapolando el comportamiento de los sistemas mixtos. Aunque este hecho no parece tener, en principio, una explicación clara, podría quizá deberse al mayor contenido en sólidos del sistema P1L0.

Finalmente, el análisis de los contenidos medios de metano en el gas producido sí parece tener un comportamiento lineal para todos los sistemas, tal como muestra la Figura 4.21 e indica un hecho ya ampliamente establecido en la bibliografía: los sistemas vegetales, a pesar de que producen siempre mayores cantidades de gas en el proceso de digestión anaerobia, proporcionan un contenido en metano en el gas siempre inferior al que se da para los residuos de carácter animal. Ello parece confirmar que el contenido en microorganismos metanogénicos en los residuos vegetales es considerablemente inferior al de los residuos animales, por lo que, para someter a digestión anaerobia a aquéllos, no sólo será conveniente la inoculación previa del digestor, sino que puede tener importancia la incorporación a la propia alimentación de un residuo conteniendo una población microbiana equilibrada, tanto en lo que respecta a obtener mayores cantidades de metano como a la posibilidad de operar a TRH más bajos.

Como ya se indicó anteriormente, la estabilidad del sistema P0L1 es muy elevada, al mantenerse el pH del digestor dentro de los valores normales de esta variable, consecuencia de la existencia de una equilibrada población de microorganismos en el sistema. Ello permite operar a TRH muy bajos con altas velocidades de producción de gas. Por su parte, el sistema P1L0 evoluciona alrededor de pH bastante más ácidos, lo que parece indicar que la población de microorganismos está descompensada por exceso de microorganismos acidogénicos. Ello trae como consecuencia que la estabilidad del sistema sólo es posible a TRH superiores.

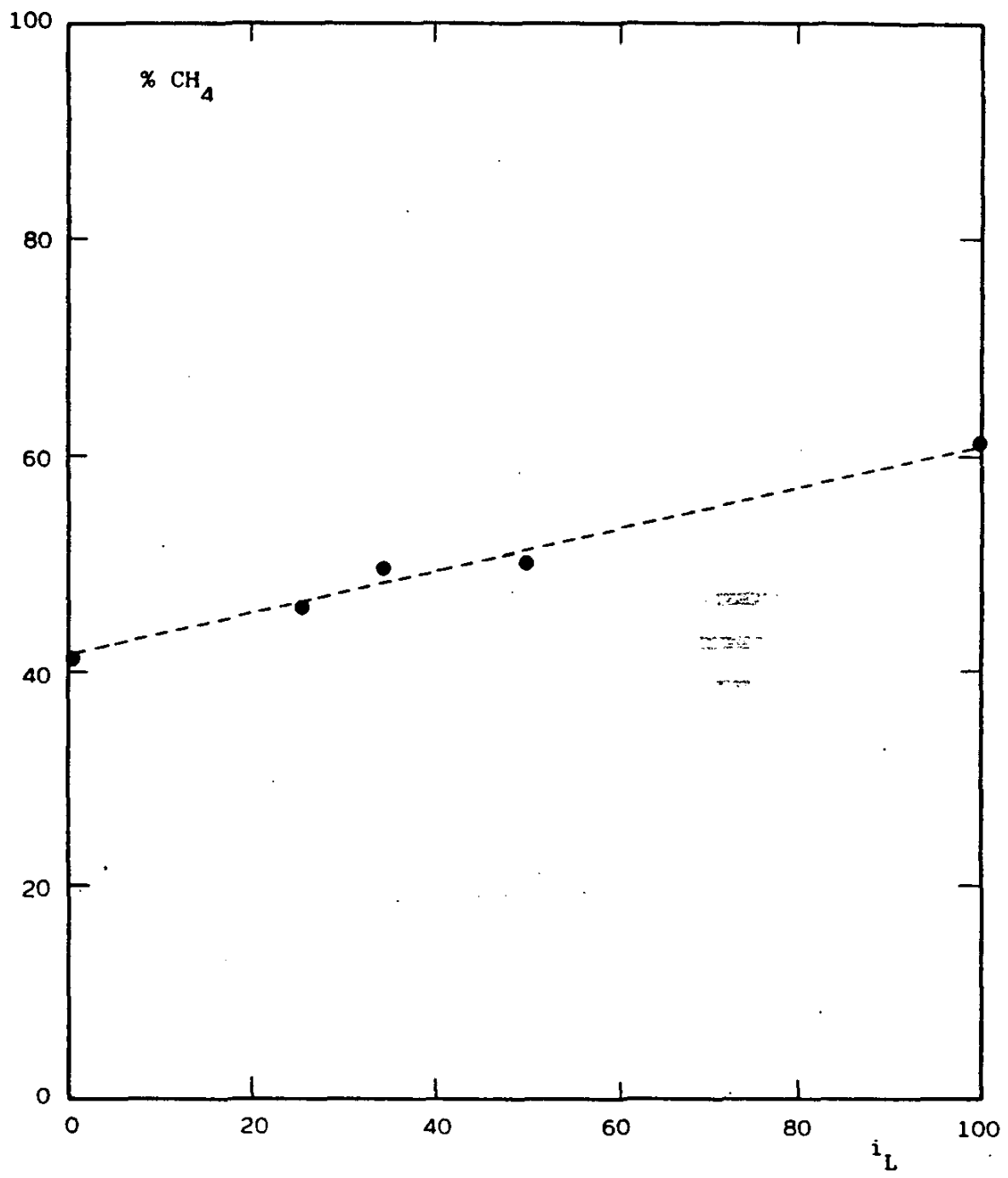


Figura 4.21

5.- CONCLUSIONES

Como resultado del trabajo de que se da cuenta en esta memoria se ha llegado a las siguientes conclusiones:

1.- Se ha considerado el posible aprovechamiento energético del rolo de platanera, debido a que su volumen de producción en Canarias es del orden de 750.000 Tm/año, equivalente al 45 % del total de la producción de residuos agrícolas.

2.- Los altos contenidos en agua (superior al 90 %) y celulosa (cerca del 60 % de los sólidos totales) del rolo de platanera han indicado como técnica más adecuada para su conversión energética la digestión anaerobia, por ser un procedimiento simple para obtener un gas combustible y un efluente susceptible de ser utilizado como acondicionador de suelos y fertilizante.

3.- Las dificultades observadas durante el proceso de digestión anaerobia del rolo de platanera en trabajos previos han aconsejado utilizar como iniciador bacteriano lodos de depuradora, susceptibles de proporcionar los microorganismos necesarios para un satisfactorio desarrollo del proceso.

4.- Se ha diseñado, montado y puesto a punto un modelo de digestor anaerobio termostatzado de laboratorio, que permite llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia de los residuos utilizados mediante su alimentación diaria, para operar en estado estacionario. La recogida de los gases desprendidos y la toma de muestras y alimentación a lo largo del proceso no plantea problemas en la estanqueidad del sistema. Asimismo se ha puesto a punto un método de análisis de los gases producidos, altamente fiable.

5.- Los lodos de depuradora han resultado ser un sustrato de comportamiento muy estable a todos los TRH estudiados, manteniéndose los valores de pH del sistema entre 6,80 y 7,40, considerados como óptimos en la bibliografía.

6.- La composición del gas producido en la digestión de los lodos contiene en todos los casos más del 50 % en metano, habiéndose establecido una relación lineal entre esta variable y el pH del sistema.

7.- La productividad máxima de los lodos de depuradora es de 0,260 ($\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kg SV}$), obteniéndose una velocidad de producción máxima de gas de 1,441 ($\text{m}^3\text{CH}_4/\text{m}^3\text{digestor.día}$) a TRH = 2 días, con un contenido en metano del 50 %.

8.- El rolo de platanera utilizado como sustrato resulta ser un sistema muy inestable, no pudiéndose operar con el mismo a TRH inferiores a 30 días, ya que en estas condiciones se produce una caída del pH que hace que el proceso de digestión llegue a detenerse completamente después de un cierto tiempo.

9.- En el intervalo de funcionamiento estable del rolo de platanera, el gas producido contiene sólo un 42 % de metano, sensiblemente inferior al valor obtenido para los lodos de depuradora, operando el sistema a valores medios del pH de 7,10.

10.- El rolo de platanera es capaz de producir hasta 0,587 ($\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kg SV}$), valor que duplica el obtenido para los lodos, lo que indica una mayor degradabilidad de aquél, hecho en consonancia con su mayor contenido en carbono susceptible de ser degradado. Sin embargo, la máxima velocidad de producción de metano sólo alcanza 0,184 ($\text{m}^3\text{CH}_4/\text{m}^3\text{ digestor.día}$) a TRH = 37 días, muy inferior al valor obtenido para los lodos de depuradora y probablemente debido a la menor actividad de los microorganismos metanogénicos presentes por la alta producción de ácidos volátiles que se presenta en este sistema.

11.- El TRH mínimo para el cual los sistemas mixtos logran la estabilidad es de 22 días, valor intermedios a los de los sustratos puros, operando los sistemas mixtos a un pH medio de 7,31, comprendido entre los límites considerados como óptimos.

12.- El porcentaje de metano en el gas para los tres sistemas mixtos estudiados no depende directamente del TRH, aunque sí de la composición del sustrato, siendo tanto más alto cuanto mayor es el contenido en lodos. El porcentaje más favorable, 51 %, lo da la mezcla de relación de sólidos volátiles 1:1.

13.- Los tres sistemas mixtos presentan una velocidad de degradación de sustrato constante en cada caso, tanto mayor, cuanto mayor es el contenido en lodos. un hecho análogo sucede con la máxima productividad de metano, que resulta ser de 0,412 ($\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kg SV}$) para la mezcla 1:1, y con la velocidad de producción de metano, cuyo valor está comprendido para las tres mezclas entre 0,207 y 0,219 ($\text{m}^3\text{CH}_4/\text{m}^3\text{digestor.día}$), intermedio entre los valores obtenidos para los sustratos puros y a unos TRH también intermedios.

14.- El análisis comparativo de todos los sistemas estudiados muestra que los sólidos volátiles de los lodos están asociados fundamentalmente a la concentración de microorganismos metanogénicos del sustrato, mientras que los sólidos volátiles del rolo de platanera representan primordialmente una fuente de carbono para la alimentación de dichos microorganismos. Al mezclar ambos sustratos, se logra favorecer el equilibrio microorganismos-sustrato, obteniéndose las mayores productividades de metano operando con la mezcla 1:1. Asimismo dicha mezcla permite obtener un gas con una concentración de metano favorable y con unas velocidades de producción aceptables en este tipo de procesos, operando con digestores de mezcla completa.

6.- BIBLIOGRAFIA

ALBAGNAC, G., TOUZEL, J.P. y MORFAUX, J.N.; "Epuración por fermentación méthanique des effluents de conserverie de légumes, étude en laboratoire", Trib. Cebedeau, 455(34), 411 (1981).

ALVAREZ, F.J.; "Cultivo de la platanera", Ministerio de Agricultura, Madrid (1981).

ARCE, A.; "Metanización de residuos celulósicos: sarmientos de vid", Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid (1987).

BORIES, A.; *"Fermentation méthanique avec séparation des phases acidogène et méthanogène appliqué au traitement des effluents à forte charge polluante (distilleries)"*, Ann. Technol. Agric., 29(3), 509 (1980).

CHEREMIRINOFF, P.N. y MORRESI, A.C.; *"Energy from solid wastes"*, Marcel Dekker, New York (1976).

COLBERG, P.J. y YOUNG, L.Y.; *"Anaerobic degradation of soluble fraction of lignocellulose"*, Appl. and Environ. Microb., 49(2), 345 (1985).

COLLERAN, E.; *"Methane from agricultural wastes and from energy crops"*, N.T.I.S., 170 (1981).

DEGREMONT; *"Tratamiento de aguas residuales de la industria agroalimentaria mediante procesos de digestión anaerobia"*, S.A.E. de Depuración de Aguas Degrémont, Bilbao (1984).

DELGADO, S., DIAZ, F., ELORTEGUI, N. y JARABO, F.; *"Fermentación anaerobia de rolo de platanera. Caracterización del sistema"*, An. Fac. Ciencias 10(1-2), 171 (1984).

DEMEYER, A., JACOB, F., JAY, M., MENGUY, G. y PERRIER, J.; *"La conversión bioenergética de la radiación solar y las biotecnologías"*, Alhambra, Madrid (1985).

DUGAN, P.R.; *"Biochemical ecology of water pollution"*, Plenum Press, New York (1972).

ELORTEGUI, N., JARABO, F., PEREZ, C. y DIAZ, F.; *"Kinetics of banana stem anaerobic digestion"*, Int. Agrophysics, 2(2), 127 (1986).

FIESTAS, J.A., NAVARRO, R., LEON, R., GARCIA, A.G. y MASTROJUAN, G.M.; *"Depuración anaerobia del alpechín como fuente de energía"*, Grasas y Aceites, 33(5), 265 (1982).

FINCK, J.D. y GOMA, G.; *"Anaerobic degradation of lignocellulosic materials: description of a new continuous process"*, in *"Energy from Biomass"*, Strub, A. et al. (eds.), Applied Science Publishers, Amsterdam (1983).

GOBIERNO DE CANARIAS; *"Resumen de datos estadísticos agrícolas, ganaderos y forestales, 1985"*, Consejería de Agricultura, Ganadería y Pesca, Comunidad Autónoma de Canarias (1987).

HASHIMOTO, A.G.; *"Conversion of straw-manure mixtures to methane at mesophilic and thermophilic temperatures"*, Biotechnol. and Bioeng.,

25, 185 (1983).

HASHIMOTO, A.G. y ROBINSON, S.A.; "Pilot-scale conversion of manure-straw mixtures to methane", *Resources and Conservation*, 8, 19 (1982).

HAUG, A.T.; "Sludge processing to optimize digestibility and energy production", *J. Water Poll. Control Fed.*, 49(7), 1 (1977).

HILLS, D.; "Biogas from a high solids combination of dairy manure and barley straw", *Transactions of the A.S.A.E.*, 1500 (1980).

HILTON, B.L., OLESZKIEWICZ, J.A. y SPARLING, A.B.; "Agricultural wastes", *J. Water Poll. Control Fed.*, 56(6), 637 (1984).

HILTON, B.L., OLESZKIEWICZ, J.A. y SPARLING, A.B.; "Agricultural wastes", *J. Water Poll. Control Fed.*, 57(6), 578 (1985).

HILTON, B.L., OLESZKIEWICZ, J.A. y SPARLING, A.B.; "Agricultural wastes", *J. Water Poll. Control Fed.*, 58(6), 557 (1986).

JARABO, F. y FERNANDEZ, J.; "Potencial energético de la biomasa en la Región Canaria", *Jornadas de Política Energética*, Las Palmas de Gran Canaria (1984).

LANE, A.G.; "Anaerobic digestion of orange peel", *Food Technol. in Australia*, 36(3), 125 (1984).

LANE, A.G.; "Laboratory scale anaerobic digestion of fruit and vegetable solid waste", *Biomass*, 5, 245 (1984).

LEQUERICA, J.L., VALLES, S. y FLORS, A.; "Kinetics of rice straw methane fermentation", *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 19, 70 (1984).

MCCARTY, P.L.; "Anaerobic waste treatment fundamentals. Part 1: Chemistry and microbiology", *Public Works*, 95, 107 (1964).

MCCARTY, P.L.; "Anaerobic waste treatment fundamentals. Part 2: Environmental requirements and control", *Public Works*, 95, 123 (1964).

MCCARTY, P.L.; "Anaerobic waste treatment fundamentals. Part 3: Toxic materials and their control", *Public Works*, 95, 191 (1964).

MCCARTY, P.L.; "The methane fermentation", in "Principles and Application in Aquatic Microbiology", Henkelekian, H, and Dondero, N.C. (eds.), John Wiley and Sons, New York, 314 (1964).

MORFAUX, J.N., ALBAGNAC, G. y TOUZEL, J.P.; "Epuración por fermentación metánica de los efluentes de blanqueo de trigo", *Sciences des Aliments*, 1(2), 293 (1981).

MORRELL, R.A. y SCHMIDT, H.E.; "Fruit, vegetable and grain

processing", J. Water Poll. Control Fed., 56(6), 631 (1984).

MORRELL, R.A. y SCHMIDT, H.E.; *"Fruit, vegetable and grain processing"*, J. Water Poll. Control Fed., 57(6), 573 (1985).

MORRELL, R.A. y SCHMIDT, H.E.; *"Fruit, vegetable and grain processing"*, J. Water Poll. Control Fed., 58(6), 552 (1986).

PATEL, J.H.; *"Biogas plant for banana stems"*, National Solar Energy Convention, Baroda, India (1983).

PFEFFER, J.T. y QUINDREY, G.E.; *"Biological conversion of biomass to methane: corn stover studies"*, in *"Fuel Gas Production from Biomass"*, Vol. 2, Wise, D.L. (ed.), CRC Press, Boca Ratón, FLA, 177 (1981).

SAMSON, R. y LE DUY, A.; *"Biogas production from anaerobic digestion of Spirulina maxima algal biomass"*, Biotechnol. and Bioeng., 24, 1919 (1982).

SIMMONDS, H.V.; *"Bananas"*, 2nd. ed., Longman, London (1966).

SWEETEN, J.M., RUSSEL, R.G., CUSTER, M.H. y HILER, E.A.; *"Methane production from sweet sorghum"*, ASAE Paper nº 85-3084, St. Joseph, MI (1985).

TRUJILLO, D., PEREZ, C. y JARABO, F.; *"Evaluación del potencial energético de biomasa residual en la provincia de Santa Cruz de Tenerife"*, Era Solar, 4(17), 52 (1986).

VAN ASCHE, P., POELS, J. y VERSTRAETE, W.; *"Anaerobic digestion of pig manure with cellulose as co-substrate"*, Biotechnol. Letters, 5(11), 749 (1983).

WENTWORTH, R.L.; *"Anaerobic digestion in North America"*, Proc. of the E.E.C. Symp., Luxembourg (1984).

WHITTAKER, R.H.; *"Communities and ecosystems"*, 2nd. ed., McMillan Inc., New York (1975).

