



Treball Final de Grau

Aerobic pretreatment study for the degradation of lignocellulosic compounds involved in the anaerobic digestion of municipal solid wastes.

Estudi d'un pretractament aerobi per a la degradació de compostos lignocel·lulòsics involucrats en la digestió anaeròbica dels residus municipals.

Paula Ferré Aparicio

June 2014

Aquesta obra esta subjecta a la llicència de:
Reconeixement–NoComercial–SenseObraDerivada



<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/>

M'agradaria agrair al Dr. Joan Mata Álvarez, tutor d'aquest projecte, per donar-me la oportunitat de treballar al laboratori de Biotecnologia Ambiental, ajudar-me en la realització del present estudi i permetre'm assistir al congrés de Biometa.

També a Xavier Fonoll, qui m'ha guiat des del primer dia i ajudat en la realització tant de la part experimental com conceptual, per la paciència i tots els consells.

REPORT

CONTENTS

1. SUMMARY	3
2. RESUM	5
3. INTRODUCTION	7
3.1. Difficulties	7
3.2. Anaerobic digestion	8
3.2.1. Basics	8
3.2.2. Stages of AD process	9
3.2.3. Factors which influence AD process	10
3.3. Pre-treatments	11
3.4. Pre-composting	13
4. OBJECTIVES	15
5. MATERIALS I MÈTODES	15
5.1. Mètodes analítics	15
5.1.1. Caracterització de sòlids	15
5.1.2. Composició del biogàs	16
5.2. Disseny experimental	16
5.2.1. Test de biodegradabilitat	16
5.2.1.1. Dispositiu experimental	16
5.2.1.2. Preparació del batch test	17
5.2.1.3. Seguiment de la producció de biogàs	19
5.2.1.4. Interpretació dels resultants al batch test	21
6. DISCUSSIÓ I RESULTATS	22
6.1. Resultats menjar de gos	22

6.2. Resultats del residu municipal urbà	24
6.3. Resultats del bagàs	27
6.4. Estimació de la viabilitat econòmica del precompostatge	30
7. CONCLUSIONS	33
8. REFERENCES AND NOTES	35
9. ACRONYMS	37
APPENDICES	39
APPENDIX 1: STEPS OF ANAEROBIC DIGESTION PROCESSES	41
APPENDIX 2: STAGES IN ECOPARC III	43

1. SUMMARY

The introduction of anaerobic digestion (AD) for the treatment of the organic matter, such as the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW), nowadays is getting more interesting. The main difficulty in the treatment of this waste fraction is the hydrolysis step because of the complexity of organic matter. To avoid these problems, many pretreatments are used in order to increase the solubilization by breaking complex molecules into simple monomers, and to improve the efficiency of AD due to increase the hydrolysis, which is the rate-limiting step.

In this project, a biological pretreatment is used to increase the hydrolytic step by using mature compost. The compost fermentative bacteria may break the complex molecules and/or the lignocellulosic materials by means of a fast organic matter solubilization of OFMSW and of bagasse.

The results from precomposting the OFMSW indicate that the best conditions of organic matter solubilization were 10% compost and 1 day. Increments of biomethane production of approximately 30% can be achieved in these conditions. A preliminary study of the economic viability of the process shows that these results can be carried out the precomposting on an industrial scale.

In the case of bagasse, precomposting mean a decrease in the results so, for this kind of materials with a high soluble fraction composed by very degradable compounds, such as sugars, this pretreatment is not a good option.

2. RESUM

El procés de la digestió anaeròbica (DA) per al tractament de la matèria orgànica, com ara la fracció orgànica dels residus sòlids municipals (FORM), actualment té un gran interès. La principal dificultat en el tractament d'aquests residus és la seva biodegradació a causa de la complexitat de la matèria orgànica. Per evitar aquests problemes, molts tractaments previs s'utilitzen amb la finalitat d'augmentar la solubilització per trencar molècules complexes a monòmers simples, i per millorar l'eficiència de la DA gràcies a l'augment de l'etapa de hidròlisi, que és l'etapa limitant del procés.

En aquest projecte, s'utilitza un pretractament biològic per augmentar els processos d'hidròlisi utilitzant compost madur. Els bacteris fermentatius del compost poden trencar les molècules complexes i/o els materials lignocel·lulòsics tot aconseguint un increment en la solubilització de la FORM i del bagàs.

Els resultats de precompostar la FORM indiquen que les millors condicions de solubilització de matèria orgànica són utilitzant un 10% de compost durant 1 dia. Es pot aconseguir un increment de la producció de metà d'aproximadament el 30% en aquestes condicions. Un estudi previ de la viabilitat econòmica del procés mostra que, amb aquests resultats, es pot dur a terme el precompostatge a escala industrial.

En el cas del bagàs, fer un precompostatge significa obtenir una disminució en els resultats implicant que, per a aquest tipus de materials amb una alta fracció soluble amb una elevada quantitat de compostos molt degradables, com poden ser els sucres, aquest pretractament no és una bona opció.

3. INTRODUCTION

3.1. DIFICULTIES

According to a study carried out by L'Agència de Residus de Catalunya (ARC), every year 10 million tons of waste are generated (3.6 Mt of industry, 2.5 Mt of construction and 3.7 Mt of municipal waste). Each person generates approximately 1.5 kg/hab/day.

Dealing with waste, the easiest management is dumped them in a tank, which creates risks for both public health and pollution of water, air and soil. In order to prevent this risks, it was established a hierarchy with some strategies to avoid landfill. Initially, it is important to prevent the waste generation but if this is not possible, as almost usual, methods for reuse, recycling, other recovery (including energy) and elimination, as a last resort, are used.

Although the recycling of municipal solid waste (MSW) has increased in recent years, Spain has yet to work hard to achieve the goals set by the Directive 1999/31/EC, in which the European Union establishes strict technical requirements of spill waste in order to prevent or reduce the negative effects on the environment, especially on water surface, groundwater, soil, air and human health. Notice that the ultimate goal is to reach in 2016 with 35% by weight of biodegradable municipal solid waste generated and deposited in landfills in relation to the ones generated in 1995. This Directive makes special attention to organic matter as it can generate leachates and/or produce methane which more hazardous than CO₂.

In accordance with Article 3 of Decree 1/2009, of 21 July, approving the revised text of the law regulating waste, those wastes generated in private homes, businesses, offices and services are considered municipal waste, and those that are not considered hazardous waste and that by their nature or composition are similar to those that occur in these places or activities. They also considered municipal waste residues from the cleaning of public streets, parks, beaches and recreational areas; domestic animals killed; the furniture, utensils and abandoned vehicles; waste and debris from home repair.

Talking about agro-industrial waste, the concept of agricultural waste is applied, under designation of crop residues, to the fraction or fractions of a culture that are not the actual

harvest and that part of the crop that does not carry out with the minimum requirements to be marketed as such quality.

There are several technologies available for the treatment of the organic wastes mentioned above. The most important are anaerobic digestion and composting for recycling, and incineration to recover energy. But it seems that anaerobic digestion is the most attractive alternative [1] because the products of this process are biogas, which is a renewable source of energy, and a residue stable with characteristics of fertilizers. Just in Europe, there are 244 facilities that deal with the organic fraction of municipal solid waste by the DA. The cumulative capacity of these plants is around 7.75 million tons per year of organic products which are treated in digestion process [2].

According to "El Anuario de Estadística del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de Madrid (2013)", nowadays, there are 22 sorting, biomethantion and compost plants in Spain.

3.2. ANAEROBIC DIGESTION

3.2.1. Basics

Anaerobic digestion (AD) is a biological process which, in oxygen absence, decomposes the organic matter (OM) biodegradable, by the action of microorganisms, and transformed it into a mixture of methane (60-70%) and carbon dioxide (30-40%) (biogas) and a digested solid.

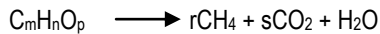
AD occurs in nature where OM is present and oxygen is negligible: the stomach of ruminants, lake sediments, etc.

The main advantages are: obtaining stabilized OM, reduction of greenhouse gases emissions: global warming, low sludge production, positive energy balance and lower operating costs.

The ability of anaerobic microorganisms to break down complex organic matter and produce biogas has been used for years in artificial systems (biogas reactors) for the energy production [3]. Methane produced is a more clean fuel that produces less air pollutants and carbon dioxide per unit of energy. Moreover, AD process offers the possibility of recycling nutrients (nitrogen and phosphorus), because the digested material can be used as biofertilizant for agriculture, replacing the artificial ones [4].

3.2.2. Stages of AD process

The anaerobic digestion process for converting organic material from a substrate to methane and carbon dioxide involve several stages (Appendix 1), in series or series-parallel, where a large number of bacterial species are involved [5]. The chemical process follows the next reaction:



Organic matter is converted into methane and carbon dioxide during anaerobic digestion by three bacterial groups, the first of which is a complex of fermentative bacteria that hydrolyses polymers and ferments products to acetic acid and other organic acids, hydrogen and carbon dioxide. The acetogenic bacteria are found in the second group, which converts propionate and higher fatty acids, produced by the first group, into acetate and hydrogen. Methane is generated from acetate and/or hydrogen and carbon dioxide, by methanogenic archaea [6].

a) Hydrolysis

This term is used to describe a wide range of solubilization processes by which complex polymeric organic compounds are broken into soluble monomers [3].

Carbohydrates, lipids, and proteins are the main substrates, which hydrolyze to monosaccharides, long-chain fatty acids plus glycerol, and aminoacids, respectively.

This stage is regarded as the rate-limiting step of degradation to particulate organic matter. This is because of, for example, the difficulty of biofibers degradation, which is a mixture of cellulose, hemicellulose and lignin that, in many cases, as in the case of paper, the material turns out to be impossible degrade.

b) Fermentation

During this stage, also called acidogenesis, acid-forming bacteria (acetogenic) hydrolyze organic compounds generated in the previous phase, such as soluble sugars and amino acids, to produce short chain volatile fatty acids (VFA) [5].

c) Acetogenesis

The acetogenesis is the process because of which occur the formation of acetate due to organic acids and the reduction of carbon dioxide. These organic acids, such as butyrate, and alcohols produced during the fermentation step are oxidized to acetate by hydrogen-producing acetogens [3].

d) Methanogenesis

Methanogenic archaea are responsible for the final step in AD process for the methane formation from acetate and/or from carbon dioxide and hydrogen, alcohols, formate and methylated compounds.

For poor waste cellulose, this stage may be the rate-limiting due to the inhibition by excess VFA [3].

3.2.3. Factors which influence AD process

The main parameters by which the methane content of the biogas, the production rate and the percentage of biodegraded matter from the AD of organic substances are affected, can be classified as physical or chemical [5].

a) Physic parameters

- **Hydraulic retention time (HRT):** is defined as the average time that a substrate remains in the reactor. It is measured by dividing the reactor volume and flow input.
- **Cellular retention time (CRT):** is the average time that the biomass remains inside the system. In continuous systems, the HRT is equal to CRT.
- **Organic loading rate:** is the amount of OM expressed in units of COD (chemical organic demand) or volatile solids (VS) per unit reactor and time.
- **Substrate characteristics:** solubility, particle size and moisture, biodegradability, substrate concentration at the entrance of the digester and its structure and chemical composition.
- **Agitation:** the main goal is ensure the contact between substrate and bacterial mass by homogenized the mixture, allowing to keep a uniform temperature throughout the digester.
- **Temperature:** is a fundamental parameter in any biological process regarding reaction kinetics, the solubility of gases and salts and chemical equilibrium. The anaerobic process occurs in nature in a very wide range of temperatures (0 to 97 ° C), the efficiency of this process depends on which is this temperature. Exist three different operating ranges, each with its own characteristics: psicrolitic, thermophilic and mesophilic temperature.

b) Chemical parameters

- **pH:** methanogenic archaea need a pH around neutrality for its correct development. Also it's the enzymatic activity can be affected.
- **Alkalinity:** is a measure of the buffering capacity of the medium to maintain the optimum pH (between 6 and 8).
- **Volatile fatty acids (VFA):** which are intermediate compounds that, also with the long chain ones, are the most important in the process of AD. VFA are important inhibitors of the methane formation if they are in excess.
- **Nutrients:** compared to aerobic process, the anaerobic process is characterized for low requirement of nutrients, basically due to the low rate of biomass production.
- **Toxics and inhibitors:** toxicity is the decrease of total microbial activity, whereas inhibition is the sudden decrease of this activity. Inhibition is reversible and toxicity, irreversible.

3.3. PRE-TREATMENTS

The municipal solid waste is very heterogeneous. Approximately, according to other studies performed in the group had demonstrated that a 30% of the MSW is paper and cardboard, so, lignocellulose is a significant component. Therefore, the solubilisation of cellulose is the rate-limiting step during the anaerobic digestion of MSW [7].

Also, the bagasse contains an 80% of humidity and it is a very lignocellulosic material [8]. The crystal structure and particle size of the lignin with little accessibility of ligands to the enzymes of glycoside making biogas production is affected negatively.

As a result, a number of studies have examined the use of different pretreatment methods, in an effort to maximize MSW and bagasse digestion.

Pre-treatments can be considered as fundamental steps that act on the substrate characteristics in order to increase the anaerobic digestion efficiency. The aim of pre-treatments applied to matter to be digested is to increase the hydrolysis capacity, so, improve the biodegradability and assist accessibility for microorganisms [5].

The additives addition can be considered as a pretreatment [9]. Although not affect directly to the composition of the substrate or to its degradation, the presence of these into reactors

helps to maintain optimum environmental conditions to promote hydrolysis, mainly by adsorption of inhibitors generated during the degradation organic matter.

a) Chemical pre-treatment

- **Ozonation:** ozone reacts with polysaccharides, proteins, and lipids, transforming them into smaller molecular-weight compounds, so that the cellular membrane is ruptured, spilling the cell cytoplasm. However, if the ozone is sufficiently high, mineralization can also occur [9]. It is important the dose of ozone to be used because, if correct, it can get an increase in biogas production; but if it is too high, despite improved solubilization, it can form new compounds with lower biodegradability which implies a decrease in the amount of biogas.
- **Alkali and acid addition:** sludge solubilisation and anaerobic biodegradability increase with alkali dose and temperature, with an upper limit [10]. Acids can be effective for the AD of protein-rich substrates, which could bring ammonia inhibition phenomena [9].

b) Physical pre-treatment

- **Mechanical:** are used to reduce both the particle size and crystallinity of lignocellulosic materials, in order to increase the specific surface area and reduce the degree of polymerization. It can be done by chipping, grinding or milling. Several studies [11,12] have shown that a small particle size, since it implies a greater surface area for microorganisms, increases the availability of food for bacteria and as a result, improves anaerobic biodegradability. However, it can accelerate the process of hydrolysis and acidogenesis, with a consequent increase in soluble organic compounds (such as VFA), causing a decrease in solubility and thus a decrease in the production of biogas.
- **Thermal:** heat treatments alter the structure of insoluble fraction to make it more biodegradable. It may also accelerate the hydrolysis of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). Not only thermal pretreatment not improve methane recovery but also accelerate the hydrolysis of the organic matter, reducing the HRT for solubilization and reducing the total volume of the reactors. The best results are between 55 and 65°C. This may be due to some problems such as the possibility of producing compounds which can inhibit subsequent anaerobic digestion processes,

solubilisation of molecules characterized by a structure which is difficult to degrade and the use of chemicals, that can lead to toxicity problems [9].

- **Microwave irradiation:** when this is used to pre-treat lignocelluloses, it selectively heats the more polar part and this unique heating feature results in an improved disruption of the recalcitrant structures of lignocelluloses. In addition, the electromagnetic field helps to accelerate the destruction of crystalline structures.
- **Ultrasound:** the advantages of ultrasonication are the solubilisation of the particulate organics, removal of the dissolved gaseous, improvement of mass transfer and increase of the microbial growth rate. The main limits are the relatively high energy consumption and the need for carefully maintenance operation.

c) Biological pre-treatment

Hydrolysis step can also be improved through the increase in the microbial activity per unit of surface area. This effect can be achieved not only by substrate inoculation, but also by the use of enzymes.

Both the pre-composting and pre-aeration processes are considered aerobic biological pretreatment.

It is also common to use specific biological agent to degrade more slowly biodegradable organic matter.

Biological processes using specific microbial species offer advantages such as low capital cost, low energy, no chemicals requirement, mild environmental conditions, and no inhibitory compounds formation. The main drawback to develop biological methods is the low hydrolysis rate in comparison with other technologies.

3.4. PRE-COMPOSTING

Composting is a biological transformation of MSW in aerobic conditions. It takes place in two phases: first, there is a decomposition where complex molecules are degraded to other more simple. The next stage is the maturation or stabilization where new macromolecules are built from simpler one. During the process, it is important a good balance between air and water (humidity and ventilation) and gets the pH (about 7), the balance of nutrients, and microbial population optimums. It is need an appropriate level of oxygen (15-21%) that enables the activity of aerobic organisms. It is also important that the humidity is between 40 and 60%,

depending on the waste, as a lack of water reduced microbial activity and, a lot of moisture, not allow the entrance of oxygen into molecules, transforming it in an anaerobic process [8, 13-15].

The idea of precomposting is to use mature compost, rich in hydrolytic bacteria, to hydrolyze waste, so that an increase in the production of biogas in anaerobic digestion is achieved and also is get the digested more stable. So, despite working in the same conditions, the time is shorter because the aim is to accelerate and/or increase the biodegradability instead of obtaining compost.

Fdez.-Güelzo et al. [16-19] examined the addition of mature compost in industrial OFMSW to enhance organic matter solubilization and, hence, the biogas and methane production and the organic matter removal during the anaerobic digestion. They carried out these study by using both a semi continue and a discontinue reactor.

With discontinue reactor, they proved that mature compost, in comparison to *A. awamori* and waste activated sludge, showed the maximum hydrolytic activity with an increase of COD of 51% for the lower inoculation percentage (2.5% v/v). Studying the kinetics, they found that an increase of the microorganisms maximum specific growth rate between 160 and 205%, with respect to non-pretreated OFMSW, can be achieved by doing a precomposting.

Semicontinue reactor showed that the organic removal, measured in terms of eliminated DOC and VS, was improved up to 61.2% and 35.3% over the control and, as a consequence, the biogas and methane production increased up to 60.0% and 73.3%, respectively.

They also compared thermochemical and biological pretreatments and concluded that biological ones perform better in enhancing the anaerobic biodegradation rate.

4. OBJECTIVES

The following project aim is to increase the hydrolytic stage of substrates with complex organic compounds which are difficult to degrade such as lignin. So, it increases the biomethane potential in the anaerobic digestion process.

The next study will focus on making a biological pretreatment to this process, specifically a precomposting, for different substrates: municipal solid waste and bagasse.

So, the main objectives are:

- Check the efficiency of this precomposting respect the waste without being pretreated.
- Knowing what are the conditions for precomposting that give the best result.
- If positive results are obtained, check whether the process is economically viable.

5. MATERIALS I MÈTODES

5.1. MÈTODES ANALÍTICS

5.1.1. Caracterització de sòlids

L'anàlisi de sòlids és important pel control de processos de tractament biològic ja que s'utilitzen per a conèixer quanta matèria orgànica contenen els residus a estudiar.

Tal com es mostra a la Figura 1, els sòlids totals (ST) o matèria seca (MS) de la mostra a analitzar són la suma dels sòlids totals suspesos i els sòlids dissolts o filtrables, cada un dels quals correspon a la suma dels respectius sòlids volàtils i sòlids fixos. És important conèixer la quantitat de sòlids volàtils (SV) que té una determinada mostra perquè és una mesura aproximada de la quantitat de matèria orgànica present al substrat corresponent.

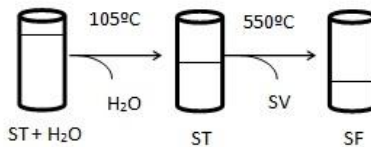


Figura 1. Caracterització de sòlids

Els ST s'analitzen posant la mostra a un gresol, de pes conegut amb i sense la mostra, a una estufa de model Afora PM-9952, a 105°C durant aproximadament 24 hores, que és quan s'aconsegueix un pes constant. Aleshores, es deixa refredar el gresol a un dessecador i es pesa. La diferència de pes que s'obté en aquest procés d'evaporació de l'aigua determinarà els grams de sòlid total per quilogram de mostra mitjançant la següent equació:

$$ST \left[\frac{g}{kg} \right] = \frac{Pes_{105^{\circ}C} - Pes_{gressol}}{Pes_{gressol+mostra\ inicial} - Pes_{gressol}} \quad \text{Eq. 1}$$

Un cop fet això, per tal de conèixer els SV, es porta la mostra a ignició a una mufla, de model Hobersal HD-230, a 550°C durant 2 hores. A continuació, es deixa refredar a un dessecador i es pesa. Els sòlids que hi queden són els fixos (SF) i els volàtils s'hauran evaporat durant el procés, per tant,

$$SV \left[\frac{g}{kg} \right] = \frac{Pes_{105^{\circ}C} - Pes_{550^{\circ}C}}{Pes_{gressol+mostra\ inicial} - Pes_{gressol}} \quad \text{Eq. 2}$$

5.1.2. Composició del biogàs

La composició del biogàs és un paràmetre important per a determinar el potencial de metanització d'un substrat. Es determina mitjançant un cromatògraf de gasos Shimadzu DC-2010 Plus. El gas portador utilitzat és l'heli, amb un cabal constant de 47 mL/min. La quantitat de biogàs injectada és de 0,2 mL. El cromatograma resultant permet conèixer els tant per cent dels components del biogàs, és a dir, del metà i el diòxid de carboni.

5.2. DISSENY EXPERIMENTAL

5.2.1. Test de biodegradabilitat

El principal objectiu del test de biodegradabilitat és conèixer la quantitat màxima de biogàs que es produeix durant el procés de digestió anaeròbica per a qualsevol substrat [20]. L'estudi dels sòlids a l'inici i al final de la digestió permetrà conèixer quina quantitat de sòlid volàtil s'ha consumit.

5.2.1.1. Dispositiu experimental

El dispositiu experimental està compost per varis digestors de 265 mL amb un septum cada un i tancats hermèticament, col·locats a una nevera en condicions mesofíliques (37°C). Per tal de determinar la producció de biogàs s'ha de mesurar la sobrepressió generada, coneguda gràcies a un sistema equipat amb una vàlvula de tres vies on hi estan connectats una agulla per punxar els digestors, un manòmetre per a conèixer-ne la pressió i una ampolla amb aigua on alliberar els gasos.

5.2.1.2. Preparació del 'batch test'

Cada digestor consta d'unes quantitats d'inòcul i substrat prèviament calculades, tenint en compte que el rati $SV_{\text{mostra}}/SV_{\text{inòcul}}$ ha de ser 0,5 per tal d'evitar inhibició per substrat. El batch test es farà seguint el model d'Angelidaki et al. 2009 [20].

- **Inòcul:** procedent del reactor anaeròbic de la depuradora de Granollers, té una població bacteriana adient per a les condicions de treball. S'ha de desgassificar a la mateixa temperatura del procés del qual prové, és a dir, 37°C i de 2 a 5 dies [20]. Així, s'assegura que tota la matèria orgànica (MO) present és biodegradada, cosa que evitarà una alteració dels resultats finals.
- **Substrats:**
 - **Menjar de gos (MG):** escollit per la seva homogeneïtat i similitud amb les característiques del residu municipal urbà (RSU). S'hi afegirà el 30% de paper corresponent segons un estudi de la caracterització de la matèria orgànica residual (MOR) fet de l'Ecoparc III pel laboratori de Biotecnologia Ambiental, que és la quantitat necessària de material lignocel·lulòsic per a considerar el MG com a RSU real.
 - **RSU:** material molt heterogeni. Prové de l'Ecoparc III, és la fracció que entra al digestor, és a dir, la matèria orgànica residual. La MOR és la MO que s'obté del contenidor gris després de fer la criba corresponent, separant els plàstics, el vidre i el paper i el cartró. Donat que la humitat de la mostra és del 90% aproximadament, s'ha d'assecar fins a un 60%, valor considerat òptim.
 - **Bagàs:** material molt lignocel·lulòsic. És el residu del procés de fabricació de la cervesa. Donada la seva elevada humitat (80%), s'assecarà, també, fins a un 60%.

S'han realitzat dos batch test. En el cas del MG més el paper, s'afegirà un 15% de compost i la quantitat necessària d'aigua per a arribar a l'òptim d'humitat al compostatge (Apartat 3.4), aproximadament un 45%. Els pretractaments seran:

Taula I. Condicions del precompostatge al MG

Experiment	Temps [h]	Temperatura [°C]	Aireació
1	24	37	si
2	48	37	si
3	24	ambiental	si
4	48	ambiental	si
5	24	37	no
6	48	37	no
7	24	ambiental	no
8	48	ambiental	no

Pel que fa al RSU i al bagàs, la humitat dels processos serà del 60%, donades les característiques a les quals es troben els substrats i la humitat necessària per a poder tenir el compostatge [15]. Els experiments a realitzar seran:

Taula II. Condicions del precompostatge al RSU

Experiment	Compost [%]	Temps [dies]
1	10	1
2	10	3
3	10	5
4	20	1
5	20	3
6	20	5

Taula III. Condicions del precompostatge al bagàs

Experiment	Compost [%]	Temps [dies]
1	10	1
2	10	3
3	10	5
4	20	1
5	20	3
6	20	5

- **Blanc:** sense substrat i només amb aigua, s'estudia la producció de metà produïda per l'inòcul i es resta de la producció de metà obtinguda als assaigs dels diferents substrats [20].
- **Control:** es farà la DA amb els substrats sense pretractar per a tenir una idea de quin ha sigut l'efecte del precompostatge.

Finalment, s'enrasa amb aigua fins a obtenir un volum final de 200 mL al primer cas i de 150 mL en els altres dos casos, tenint en compte que s'han utilitzat 150 mL i 100 mL d'inòcul, respectivament. S'aireja amb nitrogen durant aproximadament un minut i es tanquen les ampolles per assegurar el procés anaeròbic. Normalment, el test de biodegradabilitat dura entre 20 i 30 dies, quan la sobrepressió de les ampolles, o digestors, es manté pràcticament constant durant 3 o 5 dies.

5.2.1.3. Seguiment de la producció de biogàs

El potencial màxim de metanització correspon a la suma diària de la producció de biogàs, que es controla seguint el model de la taula IV:

Taula IV. Model de seguiment de la producció del biogàs

Control de les ampolles							
Mesura	Inicial						
Dia							
Hora							
P ambiental (mbar)							
Ampolla	Mostra	Sobrepresió (mbar)					
X1							
X2							
...							
X3							

La sobrepresió generada es pot relacionar amb l'equació dels gasos ideals tal que:

$$n_i = \frac{(P - P_{atm})V}{RT} \quad \text{Eq. 3}$$

On,

n_i és el volum de gas generat expressat en [% CH₄]

V és el "headspace"

P és la sobrepresió generada

R és la constant universal dels gasos

T és la temperatura d'operació

El volum generat serà, doncs,

$$V_i [mL] = \frac{n_i RT}{P} \quad \text{Eq. 4}$$

El volum de biogàs s'ha d'expressar en condicions normals (CN), així,

$$V_{CN} [mL] = \frac{V_i P_{atm} T_0}{P_0 T} \quad \text{Eq. 5}$$

On,

P_0 és la pressió de metà en CN (1013,25 mbar)

T_0 és la temperatura del metà en CN (273,15 K)

Per acabar, s'expressa la producció específica de biogàs relacionada amb els sòlids volàtils inicials, així doncs es té que:

$$V_s [mL] = \frac{\sum V_{CN}}{SV_0} \quad \text{Eq. 6}$$

On,

V_s és el volum específic de biogàs produït

$\sum V_{CN}$ és el volum acumulat de biogàs en CN

SV_0 és la quantitat de sòlids volàtils inicials de substrat expressats en [g].

5.2.1.4. Interpretació dels resultants obtinguts al batch test

Amb el test de biodegradabilitat s'estudia el potencial de metanització i la biodegradabilitat del substrat corresponent. El resultat que s'obté d'aquest assaig és una corba que representa la producció de metà respecte el temps. Per tal de comparar els resultats obtinguts, a més a més de fixar-se en la forma que adopta aquest gràfic, és important comparar altres paràmetres:

- **Volum de gas acumulat (V_N [ml]):** és una mesura del potencial de producció de metà. Permet comprar els valors obtinguts a tots els experiments. Aquest volum es trobarà restant el volum acumulat del blanc als volums acumulats de cadascun dels substrats.
- **Volum de gas respecte la massa inicial de substrat [mL/g]:** serà el V_N dividit pels grams de mostra inicials tant en ST com en SV. Així doncs, aquest paràmetre permetrà conèixer quina quantitat de metà es produeix per unitat de mostra inicial afegida al reactor i, donat que els SV es poden assimilar a la matèria orgànica, la quantitat de metà per unitat de MO. Aquest últim és un dels paràmetres més utilitzats a l'hora de determinar els resultats obtinguts pel test de biodegradabilitat.
- **Quantitat de matèria orgànica eliminada [%]:** permetrà conèixer quin és el percentatge de matèria orgànica eliminada. Serà:

$$SV_{el} [\%] = \frac{SV_0 SV_f}{SV_0} \quad \text{Eq. 7}$$

- **Volum de gas respecte els SV eliminats [mL/gSV_{el}]:** dóna una idea de quina ha estat la matèria orgànica degradada en funció del volum de metà produït.
- **Increment del gas produït als diferents experiments respecte el control [%]:** indicarà si hi ha hagut, o no, una millora en el control (MG, RSU i bagàs) respecte dels experiments realitzats, és a dir, fent-hi el pretractament de precompostatge.

6. DISCUSSIÓ I RESULTATS

6.1. RESULTATS MENJAR DE GOS

Els diferents experiments realitzats al menjar de gos (veure Taula I) no han resultat satisfactoris. Tal com es pot veure a la Figura 2, donada la similitud de la forma de les corbes, es pot concloure que la cinètica ha estat la mateixa. A més a més, ja que les barres d'error es sobreposen les unes amb les altres es pot concloure que tots els experiments s'han comportat com el control, és a dir, no s'ha millorat ni empitjorat el procés. Això pot ser degut a varies coses:

- Donada la dificultat de controlar els sortidors d'aire dels quals es disposa el laboratori, aquest ha estat molt més elevat que l'òptim, cosa que pot haver assecant la mostra tot perdent les condicions òptimes d'humitat del compostatge, és a dir, 40-60% [15]. Això podria haver provocat que no s'hi donés el precompostatge.
- Com hi ha una manca de bibliografia referent a aquest tipus de pretractament, és possible que la quantitat escollida de compost no hagi estat la adient.
- Per últim, cal dir que el menjar de gos es caracteritza per ser un material molt homogeni i molt degradable, és a dir, molt hidrolitzable. Per tant, segurament ja no es pugui millorar aquesta etapa tot i que s'hi afegeixi paper per fer-ho més semblant al RSU.

Gràcies a aquestes conclusions s'han decidit les condicions dels experiments realitzats tant amb RSU com amb bagàs per a no cometre els mateixos errors.

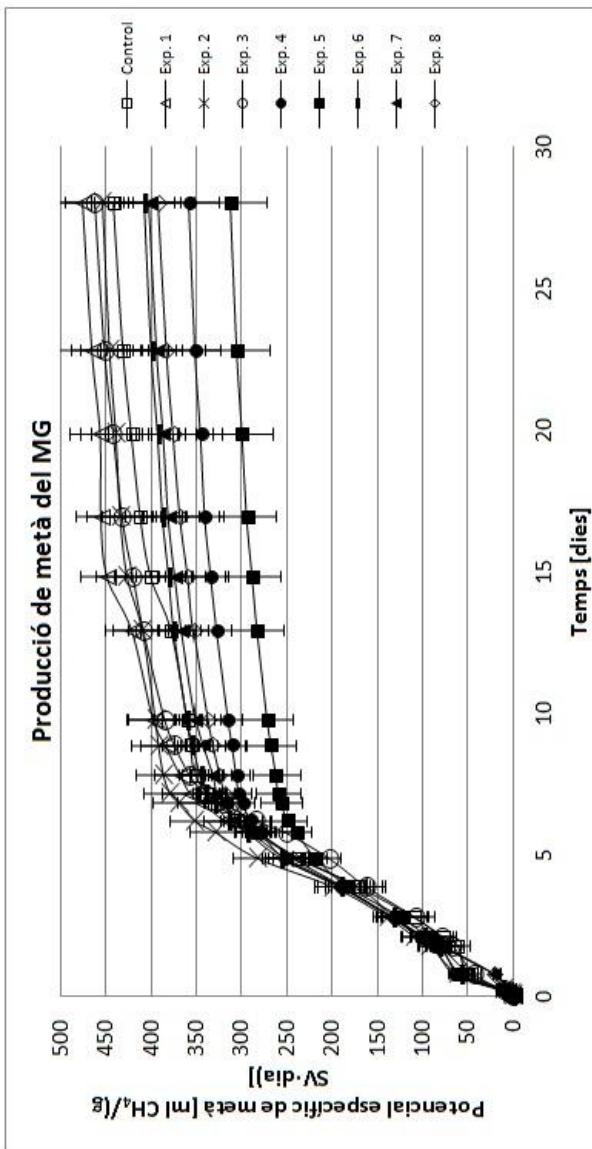


Figura 2. Metà produït pel menjar de gos

6.2. RESULTATS DEL RESIDU MUNICIPAL URBÀ

Tot i que el potencial de metanització a l'experiment previ no ha estat l'esperat, s'ha decidit continuar amb l'experiment amb residus reals ja que l'etapa hidrolítica dels RSU és lenta i donats els bons resultats dels estudis fets per Fdez.-Güelfo et al [16-19]. En els seus estudis realitzats en batch [16,18], tal com ja s'ha esmentat a l'apartat 3.4, van trobar un augment en l'activitat hidrolítica, és a dir, un increment en la cinètica del procés. El major resultat el van tenir amb un 2,5% de compost i 24h de pretractament [16]. Posteriorment, van realitzar un estudi en semicontinu aprofitant aquests valors de màxima producció de biogàs. Van obtenir un increment del 35,3% en termes de SV respecte del control [17]. Les condicions del present experiment no són les mateixes i, per tant, no es poden comparar el valors obtinguts. Tot i així, el fet que amb els dos procediments s'experimentin millores en el potencial de metanització, al seu estudi en la cinètica i en el present en un augment de la producció de metà, pot implicar que el precompostatge sigui una bona solució per al tractament de RSU.

A la Figura 3 es pot veure com la cinètica de les corbes és la mateixa. Pot semblar que l'experiment 1 i el 4 siguin més ràpids ja que es veu una variació en el pendent inicial de la corba, però això segurament sigui degut a que s'hauria d'haver estudiat un punt intermedi entre 4 i 7 dies. Si s'hagués avaluat aquest punt, és molt possible que la corba d'aquests dos experiments seguis la tendència de les altres.

Un cop eliminada la matèria fàcilment biodegradable, s'observa un decreixement en el pendent de les corbes, comportament que indica que s'ha esgotat la matèria orgànica fàcilment biodegradable i que s'estan degradant els compostos orgànics més complexos. Observant aquest gràfic i fent referència a les condicions dels experiments citats a la Taula II, sembla ser que amb l'experiment 1 és amb el que millors resultats s'aconsegueixen.

L'experiment 2 segueix una tendència semblant a l'experiment 1 però amb la Taula V es veu que s'obté un increment menor respecte del RSU sense precompostar: es té, aproximadament, un augment del 29% per a l'experiment 1 i del 31% pel 2. Per tant, donada la similitud de les dues corbes durant tot el procés, es pot considerar que s'obté un increment aproximat del 30%.

Seguidament, els millor resultats s'obtidrien per a l'experiment 4. Finalment, cal destacar que, donades les barres d'error, es pot comprovar com els experiments 3, 5 i 6 segueixen la mateixa tendència entre ells i amb la corba del control.

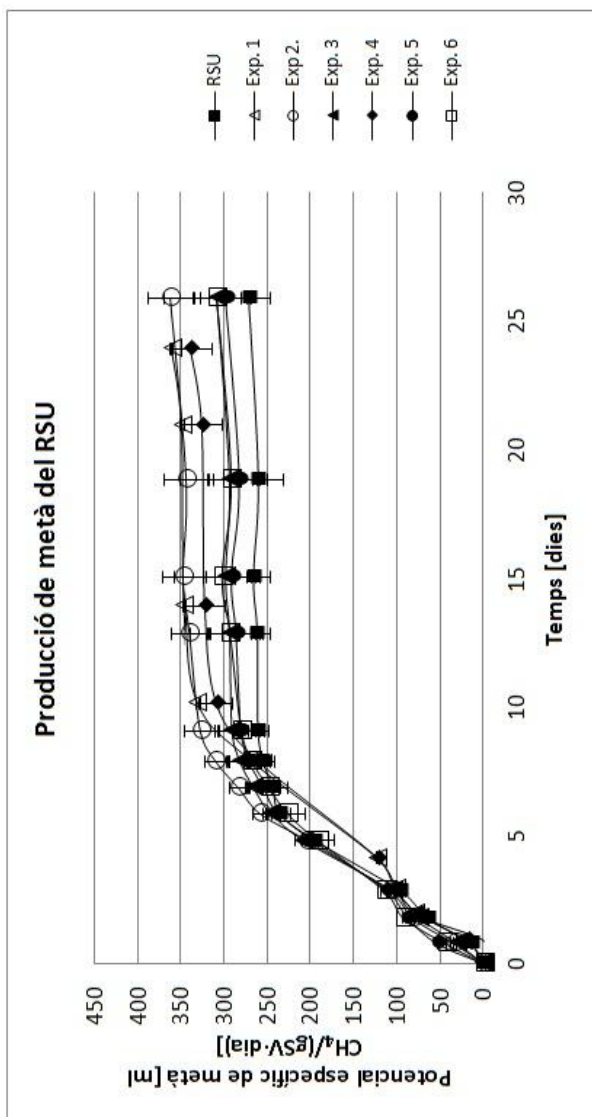


Figura 3. Producció de metà al RSU

Taula V. Resultats del test de biodegradabilitat del RSU

	% ST eliminats	% SV eliminats	V _N metà (mL)	metà (mL/g ST)	metà (mL/g SV)	metà (mL/g SVel)	% increment al.	% increment el.
RSU	77,51	80,65	78,64	170,23	278,10	344,80		
Exp.1	44,83	54,15	101,46	235,76	358,38	661,83	28,87	91,94
Exp.2	48,11	57,27	103,51	240,48	365,08	637,43	31,28	84,87
Exp.3	54,55	64,45	86,48	206,20	305,65	474,22	9,91	37,53
Exp.4	46,70	54,15	95,94	221,50	339,33	626,68	22,02	81,75
Exp.5	58,94	72,20	85,24	198,51	302,02	418,33	8,60	21,33
Exp.6	54,69	66,53	87,88	202,56	309,56	465,30	11,31	34,95

Aquests resultats fan pensar que per als experiments 1, 2 i 4 les bacteries fermentatives del compost utilitzat al pretractament han provocat un augment en la hidròlisi, cosa que ha permès el trencament de materials lignocel·lulòsics i/o de compostos complexos difícils de degradar. Això es pot concloure per l'increment en la producció de metà generat pel biogàs produït, és a dir, en la matèria orgànica biodegradada.

Un altre fet a destacar és que com més compost s'utilitzi i com més dies es tingui el pretractament, pitjors resultats s'obtenen. Això indica que, possiblement, amb 1 dia i un 10% de compost no s'ha degradat matèria orgànica sinó que només s'han trencat les cadenes dels complexos difícils de degradar, que és el que s'esperava. Per contra, amb 5 dies i 20% de compost, així com amb els experiments amb resultats semblants, es deu haver degradat MO durant el procés de precompostatge, cosa que esdevé en una disminució de l'eficiència d'aquest pretractament pel que fa a la generació de biogàs.

6.3. RESULTATS DEL BAGÀS

A la Figura 4 es pot comprovar que el potencial de biodegradabilitat del bagàs, 424,38 ml CH₄/g SV, tal com es veu a la Taula VI, és més elevat que els dels diferents experiments amb precompostatge (Taula III). Per tant, per a aquest tipus de material no s'han obtingut millores.

També cal senyalar que si es comparen els resultats de la Figura 4 i de la Taula VI, es pot deduir que hi ha hagut un error en l'estudi de sòlids a l'experiment 3. Segons la corba obtinguda, l'increment s'hauria de trobar entre els valors de l'experiment 4 i l'experiment 5, cosa que segons els valors de la taula hauria de ser la millor corba, és a dir, dona una eliminació de sòlids massa alta.

El bagàs és molt lignocel·lulòsic. Per tant, el que s'esperava és que el pretractament de precompostatge trenqués part d'aquesta lignina tot accelerant el procés d'hidròlisi i/o augmentant la biodegradabilitat. El fet que no hagi sigut així es pot explicar si es té en compte que el bagàs té una part d'aigua composta per molts sucres i carbohidrats, que són molt biodegradables. Aquesta fracció conté un 44% dels SV del bagàs, segons un estudi de sòlids (veure secció 5.1.1). Durant el precompostatge, les bacteries fermentatives deuen haver degradat la MO present en aquest líquid fent disminuir la producció de biogàs d'aquests experiments respecte del bagàs sense pretractar.

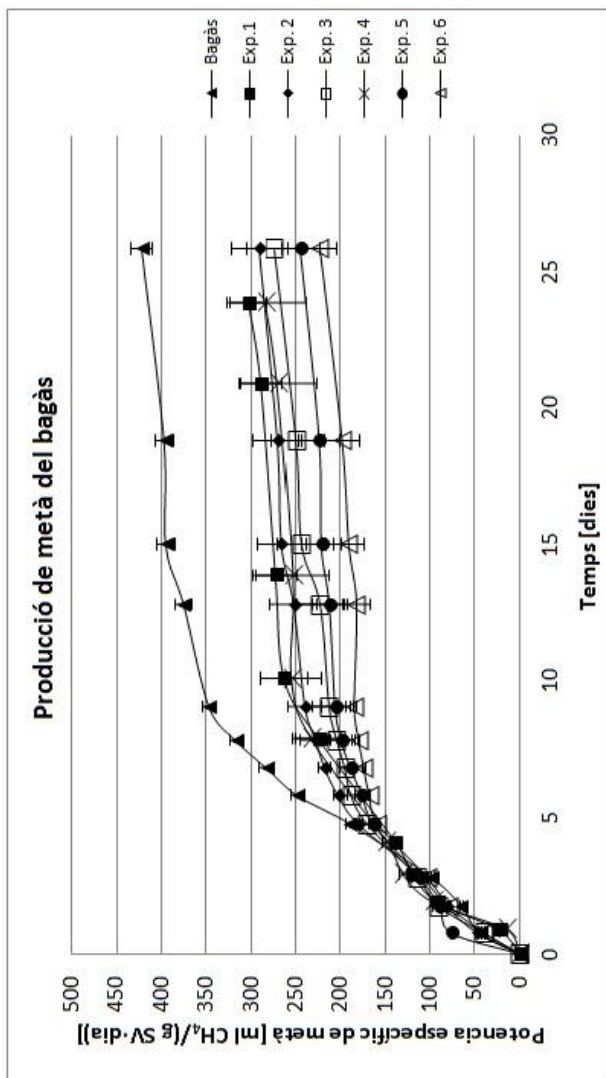


Figura 4. Producció de metà al bagàs

Taula VI. Resultats del test de biodegradabilitat del bagàs

	% ST eliminats	% SV eliminats	V _N metà (mL)	metà (mL/g ST)	metà (mL/g SV)	metà (mL/g SVel)	% increment al.	% increment el.
Bagàs	72,91	66,60	120,41	343,85	424,38	637,21		
Exp. 1	63,61	65,53	87,96	280,62	311,15	474,79	-26,68	-25,49
Exp. 2	65,10	67,15	85,59	272,04	304,21	453,05	-28,32	-28,90
Exp. 3	46,77	49,00	77,86	242,93	275,13	561,47	-35,17	-11,89
Exp. 4	67,56	70,64	80,04	234,92	283,27	401,03	-33,25	-37,06
Exp. 5	68,66	78,10	72,27	219,05	256,06	327,88	-39,66	-48,54
Exp. 6	78,38	83,48	63,59	189,87	224,97	269,47	-46,99	-57,71

Tot i no donar bons resultats, amb la Figura 4 també es comprova que quanta més quantitat de compost i com més temps de pretractament, pitjors són els resultats.

6.4. ESTIMACIÓ DE LA VIABILITAT ECONÒMICA DEL PRECOMPOSTATGE

En aquest apartat s'avalua la viabilitat econòmica del procés de cara a escala industrial. Per a poder dur a terme el procediment anteriorment esmentat es tindrà en compte que es realitzarà el precompostatge en un tanc proveït d'un agitador per a homogeneïtzar la mescla i de tres cargols d'Arquímedes per a buidar-lo un cop acabat el pretractament, procediment que durarà 24h. És per això que és necessari tenir aquest equip per duplicat.

Per a realitzar aquests càlculs s'han tingut en compte els valors trobats per un estudi per a l'Ecoparc III realitzat pel Laboratori de Biotecnologia Ambiental (Taula VII i Appendix 2). El preu del biogàs no queda clar ja que encara no han publicat els preus definitius al Decret d'Energies renovables, per tant, s'utilitzarà un rang per estimar-ne el valor.

Taula VII. Dades extretes de l'Ecoparc III	
Cabal [t/a]	35500
Potència [MWh]	3456
Preu biogàs [€/MWh]	6,2-16

El preu del tanc s'ha estimat seguint l'article de Fdez. Caña 1998 [21]. S'ha utilitzat el cabal de la Taula VII, una densitat del RSU de 650 kg/m³ [18] i temps de 1 dia de pretractament, que és l'òptim trobat als experiments. Així, s'ha trobat el volum i el preu del tanc (Taula VIII).

Taula VIII. Dades tanc	
V tanc [m³]	200
Preu tanc [€]	31853,64

Per a conèixer un preu estimat de l'agitador necessari es va contactar amb l'empresa Vakkimsa i per al del cargol d'Arquímedes, que se'n necessitaran tres per a cada tanc, amb l'empresa Countex (Taula IX).

Taula IX. Dades agitador i cargol d'Arquímedes	
Preu agitador [€]	52000
Potència agitador [kW]	54
Preu cargol Arquímedes [€]	6000
Potència cargol Arquímedes [kW]	4

El resultat que es busca són els anys de recuperació per a la inversió inicial donats els beneficis i les despeses tals que:

$$Inversió \text{ [€]} = 2 * \text{cost tanc} + 2 * \text{cost agitador} + 6 * \text{cargol Arquímedes} + \text{Accessoris} + \text{Muntatge} \quad \text{Eq. 8}$$

$$\text{Benefici [€]} = ((\text{Potencia biogàs} * \Delta\%)) * \text{Preu biogàs} \quad \text{Eq. 9}$$

$$\text{Despesa [€]} = \text{Manteniment} + \text{Electricitat} \quad \text{Eq. 10}$$

$$\text{Inversió} / (\text{Beneficis} + \text{Despeses}) = \text{Anys de recuperació}$$

Tenint en compte els valors als quals equivalen totes les variables anteriors (Taula VII, VIII, IX i X) i sabent que l'òptim trobat de l'increment de millora és del 30%, es tenen els resultats obtinguts a la Taula XI.

Taula X. Altres costos [22]	
Accessoris	0,2*P
Muntatge	0,4*P
Manteniment	0,06*P
Electricitat	0,15*P

* P = preu dels equipaments comprats

Taula XI. Resultats finals		
Preu equipaments [€]	203707,28	
Accessoris [€]	40741,46	
Muntatge [€]	81482,91	
Manteniment [€]	12222,44	
Electricitat [€]	30556,09	
Preu biogàs [€/MWh]	6,2	12
Inversió [€]	325931,65	
Benefici [€]	6428,16	12441,60
Despesa [€]	42778,53	
Anys recuperació [€]	5,78	5,90

Per tant, el capital invertit es recuperarà en aproximadament 6 anys, depenen del preu del biogàs que s'estipuli. És a dir, es pot considerar com un procés viable ja que tot i que es troba fora del límit del que les empreses consideren viable (3-5 anys de recuperació), no s'allunya exageradament del rang de valors i, a més a més, aquest càlcul només és una estimació preliminar que segurament conté molts errors. Per a més exactitud, s'haurien d'afinar més tant els valors com els càlculs.

7. CONCLUSIONS

The experimental results obtained in this study have established the following conclusions:

- Precomposting not work for homogeneous compounds in which the rate-limiting step is not the hydrolysis.
- The pre-treated municipal solid waste gives an increase in methane production of the 30% compared to the control if precomposting conditions are the less amount of mature compost (10%) and less time (1 day).
- The bagasse contains a soluble part with a lot of sugars, which are very biodegradables. During precomposting, these are degraded and released into the atmosphere, which implies a loss of organic matter and, therefore, a decrease in biomethane potential in relation to the control.
- An estimation of the economic viability of the process can confirm that this project would be viable on an industrial scale.

An interesting recommendation is to comment that it would be interesting to carry out more batch tests to ensure both optimal conditions and the best results. These tests should be make during at least one year due to the heterogeneity of the substrate.

8. REFERENCES AND NOTES

1. Edelmann, W., Shleiss, K., Joss, A., (2000). Ecological, energetical and economical comparison of anaerobic digestion with competing technologies to treat biogenic wastes. *Water Science & Technology*, 41(3), 263-273
2. De Baere L. , Mattheeuws B. (2010) Anaerobic Digestion Of MSW In Europe. BioCycle February 2010, Vol. 51, No. 2, p. 24
3. Angelidaki, I., Karakashev, D., Batstone, D. J., Plugge, C. M., & Stams, A. J. M. (2011). *Biomethanation and its potential. Methods in enzymology* (1st ed., Vol. 494, pp. 327–51). Elsevier Inc. doi:10.1016/B978-0-12-385112-3.00016-0
4. Alonso, C. V., Lahoz, C. G., Herruzo, F. G., Maroto, J. M. R., Química, D. D. I., & Málaga, U. De. (n.d.). Producción de biogás a partir de residuos vegetales (I) Características , etapas y limitaciones, (I). *Ingeniería Química*, 114-122
5. Baraza, X., Galimany, F., Torres, R. (2003). Digestión anaeróbica en tratamiento de lodos residuales.pdf. (n.d.). *Tecnología del agua* 233
6. Mshandete, A., Björnsson, L., Kivaisi, A. K., Rubindamayugi, S. T., & Mattiasson, B. (2005). Enhancement of anaerobic batch digestion of sisal pulp waste by mesophilic aerobic pre-treatment. *Water Research*, 39(8), 1569–75. doi:10.1016/j.watres.2004.11.037
7. Yuan, X., Wen, B., Ma, X., Zhu, W., Wang, X., Chen, S., & Cui, Z. (2014). Enhancing the anaerobic digestion of lignocellulose of municipal solid waste using a microbial pretreatment method. *Bioresource Technology*, 154, 1–9. doi:10.1016/j.biortech.2013.11.090
8. Rodriguez, R., Jiménez, J.F., Real, J.I., Salcedo, E., Zamora, J.F., Íñiguez, G. (2013). Utilización de subproductos de la industria tequilera. Parte 11. Compostaje de bagazo de agave crudo y biosólidos provenientes de una planta de tratamiento de vinazas tequileras. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 29(4), 303-313
9. Cesaro, A., & Belgiorno, V. (2014). Pretreatment methods to improve anaerobic biodegradability of organic municipal solid waste fractions. *Chemical Engineering Journal*, 240, 24–37. doi:10.1016/j.cej.2013.11.055
10. Carrère, H., Dumas, C., Battimelli, a, Batstone, D. J., Delgenès, J. P., Steyer, J. P., & Ferrer, I. (2010). Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: a review. *Journal of Hazardous Materials*, 183(1-3), 1–15. doi:10.1016/j.jhazmat.2010.06.129
11. Izumi, K., Okishio, Y., Nagao, N., Niwa, C., Yamamoto, S., Toda, T., (2010). Effects of particle size on anaerobic digestion of food waste, *Int. Biodeterior. Biodegr.* 64 601–608.
12. Bernstad, A., Malmquist, L., Truedsson, C., La Cour Jansen, J., (2013). Need for improvements in physical pretreatment of source-separated household food waste, *Waste Manage.* 33, 746–754.
13. Hsu, J.-H., & Lo, S.-L. (1999). Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformations during composting of pig manure. *Environmental Pollution*, 104(2), 189–196. doi:10.1016/S0269-7491(98)00193-6
14. Norbu, T., Visvanathan, C., & Basnayake, B. (2005). Pretreatment of municipal solid waste prior to landfilling. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 25(10), 997–1003. doi:10.1016/j.wasman.2005.06.006
15. Ruggieri, L., Gea, T., Mompeó, M., Sayara, T., & Sánchez, A. (2008). Performance of different systems for the composting of the source-selected organic fraction of municipal solid waste. *Biosystems Engineering*, 101(1), 78–86. doi:10.1016/j.biosystemseng.2008.05.014

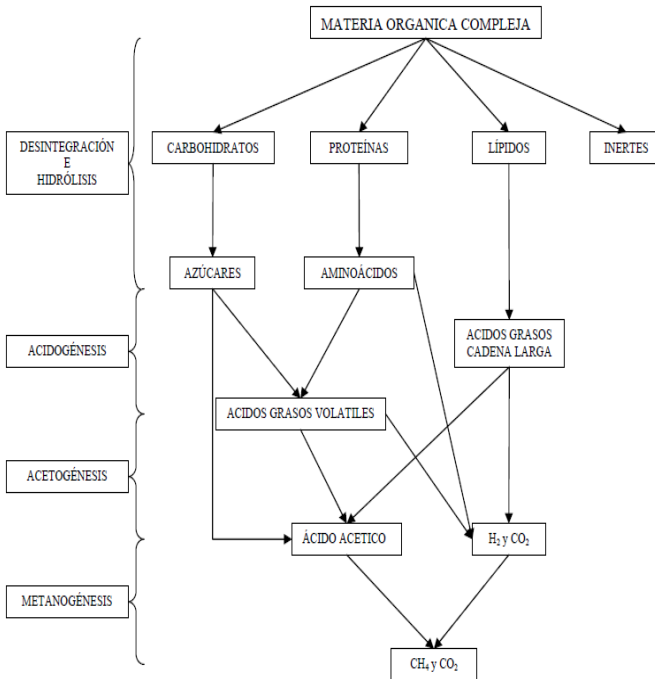
16. Fdez.-Güelfo, L. a., Álvarez-Gallego, C., Sales, D., & Romero, L. I. (2011). The use of thermochemical and biological pretreatments to enhance organic matter hydrolysis and solubilization from organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). *Chemical Engineering Journal*, 168(1), 249–254. doi:10.1016/j.cej.2010.12.074
17. Fdez.-Güelfo, L. a., Álvarez-Gallego, C., Sales Márquez, D., & Romero García, L. I. (2011a). Biological pretreatment applied to industrial organic fraction of municipal solid wastes (OFMSW): Effect on anaerobic digestion. *Chemical Engineering Journal*, 172(1), 321–325. doi:10.1016/j.cej.2011.06.010
18. Fdez.-Güelfo, L. a., Álvarez-Gallego, C., Sales Márquez, D., & Romero García, L. I. (2011b). The effect of different pretreatments on biomethanation kinetics of industrial Organic Fraction of Municipal Solid Wastes (OFMSW). *Chemical Engineering Journal*, 171(2), 411–417. doi:10.1016/j.cej.2011.03.095
19. Fdez.-Güelfo, L. a., Álvarez-Gallego, C., Sales Márquez, D., & Romero García, L. I. (2012). New parameters to determine the optimum pretreatment for improving the biomethanization performance. *Chemical Engineering Journal*, 198-199, 81–86. doi:10.1016/j.cej.2012.05.077
20. Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, a. J., ... van Lier, J. B. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science & Technology*, 59(5), 927. doi:10.2166/wst.2009.040
21. Cañas, F. F. (1998). Estimacion rapida del precio de un tanque de almacenamiento. *Ingeniería química*, 91-93.
22. Max S. Peters & Klaus D. Timmerhaus. Plant design and economics for chemical engineers. McGRAW-HILL international editions. Chemical I and Petroleum Engineering Series. Fourth edition
23. Mata Álvarez, J. (2002) Digestió anaeròbica de residus sòlids urbans. Estudis monografies 22, Àrea de Medi Ambient (Barcelona). ISBN 84-7794-865-8.

9. ACRONYMS

AD	Anaerobic digestion
ARC	Agència de residus de Catalunya
CN	Condicions normals
COD	Chemical organic demand
CRT	Cellular retention time
DA	Digestió anaeròbica
FORM	Fracció orgànica dels residus municipals
HRT	Hydraulic retention time
MG	Menjar de gos
MO	Matèria orgànica
MOR	Matèria orgànica residual
MS	Matèria seca
MSW	Municipal solid waste
OFMSW	Organic fraction of municipal solid waste
OM	Organic matter
RSU	Residu sòlid urbà
SF	Sòlids fixos
ST	Sòlids totals
SV	Sòlids volàtils
V _N	Volum de gas acumulat
VFA	Volatile fatty acids
VS	Volatile solids

APPENDICES

APPENDIX 1: STEPS OF ANAEROBIC DIGESTION PROCESSES [23]



APPENDIX 2: STAGES IN ECOPARC III

