



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA RURAL

**AVALIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE ESPACIAL E
TEMPORAL DO BIOGÁS PRODUZIDO NO ATERRO
SANITÁRIO DE ÉVORA**

Mafalda Sofia Marques Fernandes

Orientação: Professor Doutor José Rafael Marques da Silva

Mestrado em Engenharia de Biosistemas

Área de especialização: *Bioenergia*

Dissertação

Évora, 2013



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA RURAL

**AVALIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE ESPACIAL E
TEMPORAL DO BIOGÁS PRODUZIDO NO ATERRO
SANITÁRIO DE ÉVORA**

Mafalda Sofia Marques Fernandes

Orientação: Professor Doutor José Rafael Marques da Silva

Mestrado em Engenharia de Biosistemas

Área de especialização: *Bioenergia*

Dissertação

Évora, 2013

DEDICATÓRIA

*Ao Rex, o meu fiel companheiro de quatro patas que partiu enquanto eu escrevia
esta tese*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Doutor José Rafael Marques da Silva, por ter aceitado orientar-me neste trabalho, proporcionando a sua realização, e por toda a ajuda e motivação demonstrada ao longo das várias etapas de todo este trabalho.

À Engenheira Ana Silva da GESAMB, pela sua disponibilidade, essencial na obtenção dos dados e informações fundamentais para realização desta tese.

Ao Hachiko, Ana Rita Fernandes e à Margarida Gaspar, pelo enorme apoio e motivação ao longo de todo o tempo de realização da tese.

Ao meu namorado Eduardo Martins, pelo enorme apoio, motivação e companheirismo demonstrado ao longo de todo o mestrado e sobretudo durante a escrita da tese.

E por último à minha família, mãe, avô, avó e irmão, por todo o apoio, motivação, carinho e confiança ao longo de todos estes anos, pois sem eles, a concretização desta tese não teria sido possível.

AVALIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DO BIOGÁS PRODUZIDO NO ATERRO SANITÁRIO DE ÉVORA

RESUMO

Atualmente toneladas de resíduos são depositadas em aterros sanitários e esta deposição acarreta elevadas emissões de gases com efeito de estufa para a atmosfera. Um dos principais gases é o metano, o qual, se for captado, poderá ser utilizado na produção de energia. Neste sentido, muitos têm sido os modelos que têm surgido para estimar a produção de metano pelos aterros sanitários e conseqüentemente a energia que se poderia obter com a sua valorização. O Aterro Sanitário de Évora está em funcionamento desde 2002 e recebe anualmente cerca de 76.900 t de lixo, esta quantidade de resíduos poderá dar origem a cerca de 36.86 MWh de energia disponível. Para melhor perceber o potencial de produção de biogás deste aterro foram analisados os valores de metano, no espaço e no tempo (2003-2012), tendo-se constatado uma enorme variabilidade dos mesmos. Tal variabilidade esteve quase sempre associada a fenómenos de variação da temperatura média do ar e a fenómenos de precipitação persistente que alteravam a dinâmica de lixiviado do aterro bem como a atividade das bactérias metanogénicas.

Palavras-chave: Resíduos, Aterro Sanitário, Modelos, Metano, Biogás, Temperatura, Precipitação, Lixiviado

EVALUATION OF SPATIAL AND TEMPORAL PRODUCTIVITY OF BIOGAS PRODUCED IN THE LANDFILL ÉVORA

RESUME

Currently tons of wastes are deposited in landfills and this deposition entails high emissions of greenhouse gases into the atmosphere. One of the major gases is methane, which, if captured, may be used to produce energy. In this direction, many models have been emerged to estimate methane production from landfill and corresponding energy that could be obtained from recovery. The Évora landfill is operating since 2002 and receives each year about 76.900 t of garbage, his amount of waste could lead to about 36.86 MWh of energy available. To better understand the potential of producing biogas from the landfill were analyzed values of methane, in space and time (2003-2012), and it was found a great variability on the same. Such variability has almost always been associated with phenomena of variation of average air temperature and precipitation phenomena persistent which amended the dynamics of leachate from the landfill as well as the activity of methanogenic bacteria.

Key-words: Waste, Landfill, Models, Methane, Biogas, Temperature, Rainfall, Leachate

ÍNDICE

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	ii
Abstract	iii
Índice.....	iv
Índice de anexos	vi
Índice de figuras	vii
Índice de tabelas	ix
1. Introdução	1
1.1. Os aterros sanitários	6
1.2. A decomposição dos resíduos	7
1.3. Produção de biogás em aterros sanitários.....	10
1.4. Movimento dos gases de aterro	19
1.5. Modelos de produção de biogás	20
1.6. Potencial de utilização do biogás como fonte de energia.....	25
2. Metodologia	28
2.1. Caracterização do caso de estudo.....	28
2.2. Recolha dos dados.....	32
2.2.1. Estimativa da produção de metano e biogás	33
2.2.2. Estimativa da potência e energia disponível	35
2.2.3. Estudo da variabilidade temporal e espacial da produção de metano	36
3. Apresentação e discussão dos resultados	38
3.1. Produção de metano e de biogás	38
3.2. Potência disponível	43
3.3. Produção de energia térmica e elétrica disponível	46
3.4. Variação da produção de metano no tempo e espaço.....	47
4. Conclusão.....	61
5. Referências bibliográficas	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura nº1: Produção teórica de biogás (%) em função do tempo e consoante o grau de decomposição dos resíduos.....	12
Figura nº2: Evolução da degradação dos resíduos orgânicos	13
Figura nº3: Perfil de temperaturas verificadas num aterro sanitário na Suécia	16
Figura nº4: Variação no tempo das temperaturas verificadas num aterro sanitário e da produção de gases.....	17
Figura nº5: Relação entre o poder calorífico do biogás e a percentagem de metano em volume	26
Figura nº6: Sistema intermunicipal de resíduos sólidos urbanos do distrito de Évora	28
Figura nº7: Aterro Sanitário de Évora	29
Figura nº8: Localização das células que compõe o aterro sanitário	30
Figura nº9: Localização dos poços de recolha de biogás.....	31
Figura nº10: Organograma das estimativas	36
Figura nº11: Evolução da produção de metano (m ³ /m ²) consoante o potencial de produção (m ³ /t).....	41
Figura nº12: volução da produção de biogás (m ³ /m ²) consoante o potencial de produção (m ³ /t).....	42
Figura nº13: Potência disponível (MW)	43
Figura nº14: Energia térmica e Energia elétrica (MWh)	46
Figura nº15: Produção de metano em Março de 2005	48
Figura nº16: Produção de metano em Outubro de 2011	49
Figura nº17: Produção de metano em Março de 2012.....	49
Figura nº18: Produção de metano em Outubro de 2012.....	50
Figura nº19: Produção de metano em Outubro de 2005	51
Figura nº20: Produção de metano em Março de 2007.....	51
Figura nº21: Produção de metano (%) em Outubro de 2007	52
Figura nº22: Produção de metano (%) em Outubro de 2009	53
Figura nº23: Localização dos poços consoante a produtividade em metano	54
Figura nº24: Imagem representativa dos poços cuja produção de metano é sensível à temperatura	55
Figura nº25: Imagem representativa dos poços cuja produção de metano é sensível à precipitação.....	57
Figura nº26: Localização dos poços cuja produção de metano é sensível à temperatura e precipitação	58
Figura nº27: Imagem representativa da distribuição dos poços no aterro sanitário de Évora e respetiva variação da produção de metano com os valores de temperatura (°C) e precipitação (mm)	59

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela nº1: Composição do biogás e características do gás de aterro	11
Tabela nº2: Tempo de decomposição dos resíduos sólidos na natureza	12
Tabela nº3: Efeitos das variáveis que influenciam a geração de biogás em aterros.....	19
Tabela nº 4: Propriedades da combustão do Biogás.....	25
Tabela nº5: Equivalência energética de 1Nm ³ de biogás em relação a outros combustíveis	26
Tabela nº6: Média anual de entrada de lixo (t/ano).....	34
Tabela nº7: Valores dos parâmetros utilizados na estimativa da produção de metano (m ³ /ano) a partir do modelo de cinética de primeira ordem	39
Tabela nº8: Produção de metano (m ³ /ano)	40
Tabela nº9: Média anual da vazão de metano (m ³ /h) e respetiva potência (MW).....	43
Tabela nº10: Potência em 2012 dos aterros considerados.....	44
Tabela nº11: Energia disponível (MW)	47
Tabela nº 12: Média anual e dos 39 anos de atividade do aterro sanitário de Évora.....	47
Tabela nº 13: Variação da produção de metano com a temperatura.....	54
Tabela nº 14: Variação da produção de metano com a precipitação	56

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da sociedade e o aumento da preocupação com o ambiente tem levado a que os aterros sanitários se tenham generalizado levando ao fecho de inúmeras lixeiras a céu aberto (Scott, Beydoun, Amal, Low & Cattle, 2007).

Segundo a Diretiva Comunitária 1999/31/EC de 26 de Abril de 1999, os aterros sanitários são locais à superfície ou abaixo desta onde são depositados resíduos em camadas finas e compactadas com o objetivo de serem eliminados. A classificação do tipo de aterros sanitários tem-se alterado ao longo do tempo e quase que de país para país, no entanto, em Portugal, estes são classificados consoante o tipo de resíduos que recebem, nomeadamente: i) aterros de resíduos perigosos; ii) aterros de resíduos não-perigosos; e iii) aterros de resíduos inertes (Diretiva Comunitária 1999/31/EC).

No que concerne aos atuais aterros sanitários existe também preocupação no sentido de minimizar a eventual poluição de terrenos e águas subterrâneas, tendo estes evoluído de aterros superficiais a céu aberto, onde ocorria a degradação aeróbia dos resíduos, para aterros de grandes dimensões e profundos onde ocorre essencialmente a degradação anaeróbia dos resíduos. Para impedir a contaminação difusa do ar, solo e água os aterros sanitários são normalmente impermeabilizados para evitar todo o tipo de fugas, especialmente do lixiviado, sendo este último, normalmente enviado para o relector (Scott et al., 2007; Hughes & Heimlich, s.d.).

Num aterro sanitário a degradação natural dos resíduos orgânicos ocorre normalmente num espaço de décadas. Para acelerar a taxa de decomposição dos resíduos orgânicos podem ser criadas determinadas condições favoráveis aos microrganismos, nomeadamente a manutenção de um valor de humidade favorável à atividade das bactérias, funcionando o aterro como um reator biológico (U.S. EPA, 2012).

Os aterros sanitários podem funcionar como reatores aeróbios-anaeróbios, aeróbios, anaeróbios e facultativos. Nos reatores aeróbios-anaeróbios, o principal objetivo é combinar as vantagens de cada sistema de modo a maximizar a degradação dos

resíduos, nomeadamente a degradação rápida de resíduos facilmente biodegradáveis na fase aeróbia o que facilita a etapa de metanogénese que ocorre na fase anaeróbia. A degradação dos resíduos nos reatores aeróbios ocorre mais rapidamente pois os microrganismos aeróbios são mais eficientes na produção de energia através da respiração celular, esta atividade é promovida através da injeção de oxigénio na massa de resíduos e da recirculação do lixiviado com o objetivo de manter as condições ideais de humidade para os microrganismos aeróbios. Nos reatores anaeróbicos, os resíduos são degradados em ácidos orgânicos e posteriormente em metano e dióxido de carbono pelas bactérias metanogénicas. A etapa anaeróbia ocorre naturalmente num reator não sendo por isso muito exigente em termos das condições físicas e químicas que se devem verificar na massa de resíduos, no entanto deve-se manter a humidade entre 35 a 45%. Já os reatores facultativos funcionam de modo aeróbico e tem a particularidade de conter bactérias que transformam o amoníaco presente nos lixiviados em nitrato, ou seja, efetuam a nitrificação e as bactérias facultativas que transformam o nitrato em azoto, realizando assim um processo de desnitrificação do qual se obtém um biogás não prejudicial para o ambiente (U.S. EPA, 2012).

A decomposição dos resíduos orgânicos presentes em aterros sanitários leva à emissão de gases, nomeadamente o biogás composto essencialmente por metano e dióxido de carbono, dois gases com um impacto considerável no efeito de estufa, e também embora em menor produção por amoníaco; monóxido de carbono; hidrogénio; ácido sulfídrico; nitrogénio e oxigénio. O biogás produzido pelos aterros contém cerca de 90% de CH_4 e CO_2 , o que implica que os aterros sejam sujeitos a uma forte monitorização (Demirbas, 2006).

Relativamente ao modo como ocorre a decomposição dos resíduos orgânicos e a consequentemente produção de gases de aterro, de acordo com a literatura consultada há autores que consideram que esta se processa em quatro fases no entanto outros consideram que esta decorre em cinco fases (El Fadel, Findikakis & Leckie 1997; ATDR, 2001; Farquhar & Rovers, 1973).

O volume de biogás produzido depende normalmente: i) da idade e do tipo de resíduos, existindo resíduos de fácil degradação, que se decompõem num espaço de dias a cinco anos e resíduos que demoram entre cinco e cinquenta anos para serem

degradados; ii) da forma como os resíduos orgânicos se encontram distribuídos pelo aterro; iii) da quantidade de nutrientes existentes; iv) da humidade contida na massa de resíduos; v) da variação térmica; e vi) da profundidade das células e do grau de compactação dos resíduos (O'Leary & Tchobanoglous, 2002).

A possibilidade de utilização do biogás como fonte energética despertou o interesse da comunidade científica que rapidamente desenvolveu inúmeros modelos, que a partir do volume de metano produzido anualmente, conseguem prever a energia que se pode obter a partir da sua rentabilização. Os modelos desenvolvidos são normalmente classificados como de: i) ordem zero; ii) primeira ordem; ou iii) multi-fase, em função de como é quantificado o metano, ou seja, se esta quantificação é referente a um parâmetro genérico fixo ou se esta é baseada num parâmetro genérico que se altera, consoante os processos físico-químicos existentes no processo de degradação de resíduos (Kamalan, Sabour & Shariatmadari 2011).

No aterro sanitário de Évora em 2002 estavam depositados no aterro 100 498 T de RSU porém no espaço de tempo de dez anos houve um incremento da deposição de RSU para 917 569 T. No final de 2013 estarão depositados no aterro quase 1 milhão de T de RSU. De acordo com as características dos resíduos presentes no aterro sanitário, a decomposição destes origina cerca de 150 Nm^3 (unidade de massa de gases que equivale a 150 m^3 à pressão de 1 atmosfera e 20°C) de biogás por tonelada de resíduo, o que permite inferir que o biogás gerado possua um valor médio de 50 a 50% de metano (AMBIRUMO, 2012).

É visível a grande potencialidade de produção de biogás neste aterro e respetiva utilização na produção de eletricidade, o que levará não só a uma diminuição de custos mas também à rentabilização de um componente cuja emissão para o ambiente é prejudicial. Assim o objetivo geral desta dissertação será fazer um estudo a partir do qual se compreenda a variabilidade espacial e temporal existente na produção de metano no aterro sanitário de Évora, para que se maximize o potencial energético deste aterro. A hipótese de estudo baseia-se no facto de a temperatura e a precipitação serem os fatores com maior influência na produção de metano. Para compreender a influência da temperatura na produção de metano no aterro sanitário de Évora serão analisados os dados de produção de metano dos meses em que as temperaturas médias anuais

começam a diminuir (fim do Outono) e de quando estas voltam a aumentar (início da Primavera) entre 2003 e 2012. Sendo que os valores de precipitação também têm grande influência na produção do metano em aterro, os dados das precipitações ocorridas no período supracitado também serão analisadas. Este estudo permitirá estudar quais os fatores que mais afetam a produção temporal e espacial de metano, os quais devem ser constantemente monitorizados para que a produção do mesmo se mantenha constante e elevada e conseqüentemente também a produtividade dos sistemas de aproveitamento energéticos, conseguindo-se deste modo rentabilizar o potencial energético do biogás e sobretudo minimizar as oscilações na produção de energia. Além de se compreender que fatores que estão na base da variação espacial e temporal da produção de metano, este estudo também tem como objetivos específicos perceber qual o potencial de produção de metano por hora e ano, assim como o potencial de produção de metano do aterro por m^2 também por hora e ano. A potência disponível e o potencial de produção de energia térmica e elétrica por hora e por ano são também objetivos específicos desta tese.

No primeiro capítulo desta tese é feita uma revisão bibliográfica sobre o tema em estudo. A revisão começa por abordar o surgimento dos aterros sanitários, sendo depois exposto o que são aterros sanitários, quais as suas formas e as principais componentes indispensáveis à sua atividade. A decomposição dos resíduos é o principal processo que ocorre nos aterros sanitários e por isso na revisão é abordada a forma como esta se processa. Da decomposição resulta a emissão de gases que compõem o Biogás, neste ponto explora-se sobre como se forma o metano, qual a sua composição e quais os fatores que afetam a sua produção, sobretudo fatores como a temperatura e precipitação, os quais serão depois discutidos em pormenor nesta tese. É importante na instalação de sistemas de recolha de gases conhecer-se como se movimenta o gás de aterro e os fatores que influenciam a deslocação e por isso este ponto é também abordado. Desde que ficou conhecido o potencial energético do biogás foram produzidos inúmeros modelos que tentam estimar a produção de metano em aterros e conseqüentemente o seu potencial energético. Os modelos de produção de gases são abordados nesta revisão pois são importantes para a discussão dos objetivos específicos desta tese. O potencial de utilização do biogás como fonte de energia é também um dos objetivos específicos desta tese e por isso este também é um dos temas abordados na revisão.

No segundo capítulo é descrita a metodologia que foi utilizada na consecução dos objetivos desta tese.

No terceiro capítulo são apresentados os resultados obtidos no estudo efetuado, estes são também discutidos neste ponto.

No quarto e último capítulo desta tese são apresentadas as principais conclusões da presente tese e sugestões para estudos futuros.

1. Os aterros sanitários

Ao longo do tempo a sociedade tem assistido a uma melhoria da sua qualidade de vida o que tem conduzido ao incremento do consumo pelas pessoas, este tem como principal consequência o aumento da produção de resíduos sólidos urbanos (RSU). Anteriormente os resíduos eram depositados em lixeiras a céu aberto, as quais provocavam graves problemas não só ambientais mas também na saúde pública devido à emissão descontrolada dos gases resultantes da decomposição dos resíduos. Todavia a preocupação com o ambiente levou a que os resíduos começassem a ser depositados em aterros sanitários (O'Leary & Tchobanoglous, 2002).

Em Portugal, em 1995 cerca de 75% da deposição dos RSU era feita em lixeiras, porém em 2005 o principal destino passaram a ser em 63% os aterros sanitários, sendo os restantes RSU incinerados ou sujeitos a valorização orgânica (MAOTDR, 2007)

Os aterros sanitários são locais onde os RSU são depositados, estes são projetados com o objetivo de minimizar o impacto no ambiente causado pela deposição de resíduos. Os aterros são impermeabilizados na superfície com camadas de argila ou material geossintético como o polietileno de alta densidade (PEAD) para evitar a contaminação de solos e águas subterrâneas, após o encerramento das células, estas também devem ser impermeabilizadas com os materiais supramencionados. No final de cada dia de atividade, os resíduos são cobertos com solo ou composto de modo a evitar emissão de gases para o ambiente; o arrastamento dos resíduos pelo vento; a entrada de água e também para fomentar a degradação dos resíduos (O'Leary & Tchobanoglous, 2002).

De acordo com Sarsby (2000), todos os aterros sanitários devem possuir: i) sistema de revestimento de baixa permeabilidade, evitando-se deste modo a contaminação de solos e aquíferos; ii) sistema de deteção de lixiviados, para que seja detetada qualquer fuga de lixiviados para o solo; iii) sistema de drenagem de lixiviados sobre o sistema de revestimento, para que haja uma melhor circulação do efluente; iv) camada de cobertura do aterro com baixa permeabilidade, para evitar a infiltração de água e, conseqüentemente, aumentar o volume de lixiviado; v) sistema de ventilação do biogás,

para melhor controlar o seu movimento e produção no aterro e um vi) sistema de monitorização de lixiviados e biogás.

Os aterros sanitários não têm todos a mesma estrutura, geralmente a construção é adaptada à geomorfologia dos terrenos. Estes podem ser construídos em forma de: i) trincheira; ii) rampa ou iii) à superfície, este modelo também denominado por área. Os aterros em forma de trincheira são normalmente construídos em locais profundos, nestes as trincheiras mais pequenas tem cerca de 8 a 10m de profundidade, já as maiores cerca de 30 a 40m e 200 a 300m de comprimento. Existem três tipos de trincheiras cuja escavação é feita de uma só vez ou de forma progressiva segundo o espaço necessário em cada dia de atividade e as trincheiras duplas nas quais o material de escavação de uma é utilizado na cobertura da outra trincheira. Os aterros em forma de rampa são construídos em locais com grandes ravinas, como por exemplo em antigas pedreiras. Os resíduos vão sendo depositados de modo escalonado, contudo o método de deposição varia consoante a geometria dos locais. Já os aterros à superfície são construídos onde não é possível fazer escavações, por exemplo nos casos em que existem águas subterrâneas. Estes locais devem ser corretamente impermeabilizados e devendo também existir um sistema de recolha dos lixiviados (Government Engineering, 2006; O'Leary & Tchobanoglous, 2002).

Os resíduos podem ser sólidos, líquidos ou gasosos, por sua vez os resíduos sólidos são classificados de acordo com a sua origem: i) resíduos sólidos urbanos; ii) resíduos industriais; iii) resíduos agrícolas; iv) hospitalares e v) outros como pilhas, acumuladores, lamas e óleos ou então de acordo com a sua perigosidade, nomeadamente: i) resíduos perigosos; ii) resíduos inertes e iii) não perigosos. De acordo com a Diretiva Comunitária 1999/31/EC em Portugal os resíduos são colocados em aterros consoante a sua perigosidade.

1.2. A decomposição dos resíduos

O tipo de resíduos sólidos presentes nos aterros depende essencialmente das condições socioeconómicas das populações onde estes são produzidos. Contudo

também os métodos de colheita e eliminação de resíduos; a estação do ano e a localização do aterro influenciam a sua composição (Warith, Li & Jin, 2005; El-Fadel et al., 1997).

A decomposição dos compostos orgânicos dos resíduos é feita por microorganismos aeróbios e anaeróbios. As principais bactérias responsáveis pelo processo de decomposição dos resíduos são as i) hidrolíticas; ii) fermentativas; iii) acetogénicas; iv) metanogénicas e v) redutoras de sulfatos (Warith et al., 2005).

Em sistemas anaeróbios a capacidade de produção de biogás depende sobretudo das características físico-químicas dos resíduos; temperatura; pH; humidade; carga orgânica; razão carbono/azoto; nutrientes e microorganismos existentes no interior dos aterros. Além destes fatores a ausência de oxigénio, metais e sulfatos afetam a quantidade e também a qualidade de biogás produzido na fase anaeróbia (Verma, 2002; El-Fadel et al., 1997).

A decomposição dos resíduos orgânicos para alguns autores decorre em três ou quatro fases, no entanto, outros autores consideram que esta se processa em cinco fases, todavia a duração de cada fase depende das características dos aterros (Farquhar & Rovers, 1973; Scott et al., 2007; ATDR, 2001).

Farquhar e Rovers (1973) consideram que a decomposição dos resíduos orgânicos em aterros se processa em quatro fases. A primeira fase começa com um processo de hidrólise em que partículas complexas são decompostas em partículas mais simples, nomeadamente polímeros como as proteínas, carboidratos e lípidos. Estes polímeros sofrem também um processo de hidrólise dando origem a biomoléculas, como os aminoácidos, açúcares e ácidos gordos. A primeira fase de decomposição da matéria é essencialmente aeróbia, na qual as bactérias aeróbias consomem o oxigénio disponível ao mesmo tempo que fragmentam as longas cadeias moleculares dos carboidratos, proteínas e lípidos em cadeias mais simples. O principal subproduto desta fase é o dióxido de carbono. Consoante a disponibilidade de oxigénio, esta fase pode demorar desde dias a meses. A disponibilidade de oxigénio por sua vez depende da existência de espaços vazios criados pela deposição dos resíduos.

A segunda fase de decomposição inicia-se quando quase todo o oxigénio disponível foi consumido. Nesta fase começam a dominar os processos anaeróbios, durante os quais as bactérias anaeróbias convertem os compostos simples decompostos pelas bactérias aeróbias em ácidos acético, láctico e fórmico e em álcoois, nomeadamente, o metanol e o etanol. As bactérias através do ácido acético produzem metano e dióxido de carbono, esta fase é chamada de acetofílica. Nesta altura o aterro possui um ambiente muito ácido, o qual causa a dissolução de nutrientes e conseqüentemente aumenta a disponibilidade de fósforo e azoto. Se ocorrer uma entrada de oxigénio nesta fase, os processos microbianos voltam à primeira fase de decomposição (El-Fadel et al., 1997 e ATDR, 2001).

A terceira fase processa-se quando as bactérias anaeróbias consomem os ácidos orgânicos gerados na segunda fase de decomposição. Este processo dá origem à formação de acetato, o que faz com que o ambiente no aterro seja neutro e conseqüentemente que as bactérias metanogénicas se comecem a estabelecer. As bactérias produtoras de ácido e as metanogénicas possuem uma relação de mútuo benefício, na qual as produtoras de ácido produzem compostos que as metanogénicas consomem e por sua vez estas consomem compostos que são prejudiciais para as produtoras de ácidos (El-Fadel et al., 1997 e ATDR, 2001).

A última fase de decomposição começa quando a composição e a taxa de produção de biogás estabiliza. Na fase hidrogenofílica as bactérias utilizam o dióxido de carbono recentemente formado e o hidrogénio disponível dando origem a mais metano e vapor de água. Nesta fase o aterro possui 45 a 60% de metano; 40 a 60% de dióxido de carbono e 2 a 9% de outros gases como os sulfuretos (El-Fadel et al., 1997 e ATDR, 2001).

De acordo com Scott et al. (2007), a decomposição dos resíduos orgânicos decorre em cinco fases: i) a Fase Inicial, na qual ocorre essencialmente uma degradação aeróbia dos resíduos; ii) a Fase de Transição, onde se começam a verificar condições anaeróbias; iii) a Fase Ácida, na qual os constituintes com maior massa molar sofrem uma transformação enzimática por hidrólise destes, passando de seguida por um processo de acidogénese microbiológica dos constituintes resultantes, nesta fase o dióxido de carbono é o principal biogás produzido; iv) a Fase Metanogénica, onde os

produtos resultantes da fase anterior são convertidos em metano e dióxido de carbono devido à ocorrência de fermentações metanogénicas; e por fim v) a Fase de Maturação, em que a produção de biogás diminui ao longo do tempo por decréscimo dos constituintes já degradados até ao momento. A duração de cada fase depende da forma como os resíduos estão distribuídos; composição dos nutrientes; grau de humidade dos resíduos e sua compactação.

Existem várias técnicas para acelerar a taxa de decomposição dos resíduos orgânicos entre as quais: i) a recirculação de lixiviados; ii) manutenção de um volume de recirculação constante; iii) o fracionamento dos resíduos; iv) a compactação de resíduos; v) controlo do teor de humidade e temperatura; vi) o ajuste do pH e viii) a adição de lodo, nutrientes e inóculos (Warith et al., 2005; Kelly, 2002).

1.3. Produção de biogás em aterros sanitários

De acordo com Ham et al. (1979) cada kg de resíduo depositado em aterro dá origem a 0.06 m³ de biogás. O biogás é produzido sobretudo a partir da decomposição dos resíduos orgânicos mas também através do processo de volatilização dos compostos orgânicos, o qual se amplifica quando a temperatura se eleva, e a partir das reações químicas que ocorrem entre os produtos químicos presentes no aterro pois o aumento da temperatura incrementa a velocidade das reações químicas, as quais consequentemente libertam gases (Tchobanoglous, Theisen & Vinil, 1993; ATDR, 2001).

Se o conteúdo de sólidos totais voláteis presentes nos resíduos for elevado, significa que estes são recentes e por isso ainda possuem um baixo grau de decomposição (Tchobanoglous et al., 1993).

Os parâmetros que afetam a composição do biogás de aterro possuem maior ou menor influência na produção de biogás consoante o número e dimensão dos espaços vazios gerados pela decomposição do lixo; presença de lixiviados; grau de compactação dos resíduos e compressão efetuada pelo peso do lixo (El-Fadel et al. 1997). A Tabela 1

representa a composição geral do biogás e suas características (O’Leary & Tchobanoglous, 2002).

Tabela 1. Composição do biogás e características do gás de aterro (Adaptado de Ham et al., 1979; Lang et al., 1987; Parker, 1983 citados em O’Leary & Tchobanoglous, 2002)

Componentes	Porcentagem (por base de volume seco)
Metano (CH ₄)	45-60
Dióxido de Carbono (CO ₂)	40-60
Azoto (N ₂)	2-5
Oxigênio (O ₂)	0.1-1.0
Amônia (NH ₃)	0.1-1.0
Sulfuretos (S)	0-1.0
Hidrogênio (H ₂)	0-0.2
Monóxido de Carbono (CO)	0-0.2
Outros componentes	0.01-0.6
Caraterísticas	Valor
Teor de humidade	Saturado
Densidade	1.02-1.06
Temperatura (K)	310.9 - 344.2
Elevado poder calorífico (kJ/m ³)	17697 - 20492

A hidrólise é o processo que mais afeta a produção de biogás a partir de resíduos, seguido dos parâmetros biocinéticos (El-Fadel et al., 1997).

A produção de gases é maior em aterros que possuem resíduos orgânicos rapidamente biodegradáveis, como se pode ver na Figura 1, contudo são os resíduos orgânicos moderadamente biodegradáveis que permitem que haja produção de biogás durante um período de pouco mais de 35 anos (Ham et al., 1979). O tempo de decomposição dos resíduos depende do tipo de resíduos, na Tabela 2 estão exemplificados alguns tempos de decomposição.

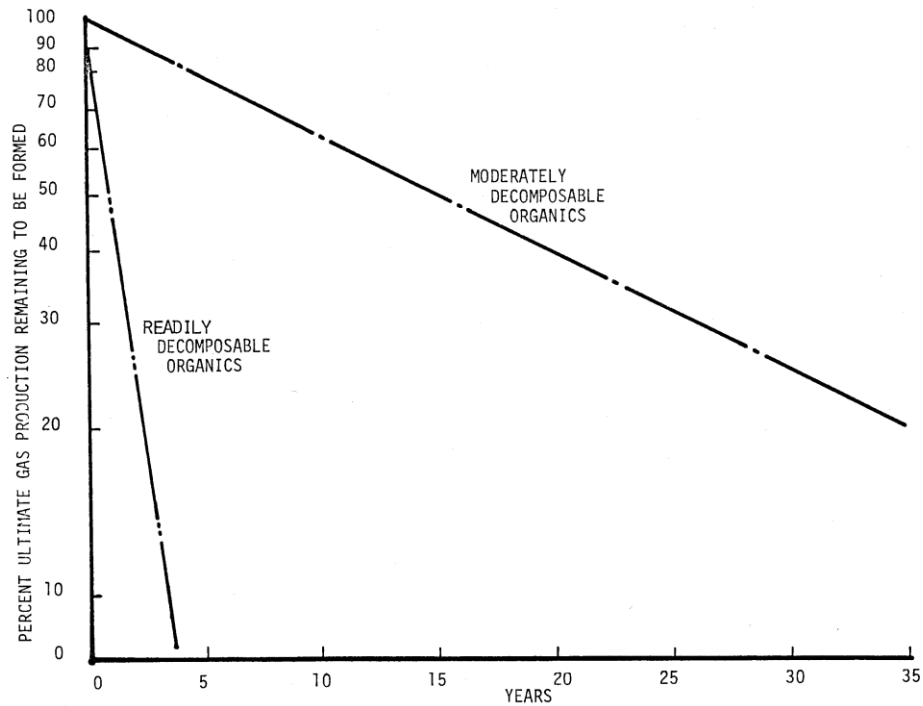


Figura 1. Produção teórica de biogás (%) em função do tempo e consoante o grau de decomposição dos resíduos (Ham et al., 1979)

Tabela 2. Tempo de decomposição dos resíduos sólidos na natureza (Fonte: Grippi, 2001 citado em Filho, 2005)

Resíduos	Tempo de decomposição
Jornais	2 a 6 semanas
Embalagens de papel	1 a 4 meses
Casca de fruta	3 meses
Guardanapos	3 meses
Pontas de cigarro	2 anos
Palitos de fósforos	2 anos
Pastilhas elásticas	5 anos
Nylon	30 a 40 anos
Pilhas e baterias	100 a 500 anos
Latas de alumínio	100 a 500 anos
Tampas de garrafa	100 a 500 anos
Copos de plástico	200 a 450 anos
Garrafas de vidro e plástico	Mais de 500 anos

Num aterro sanitário, na Fase I os gases existentes correspondem a cerca de 80% de azoto e 20% de oxigénio, contudo à medida que a produção de oxigénio diminui, devido ao seu consumo pelas bactérias aeróbias, a produção de dióxido de carbono aumenta. O dióxido de carbono é o gás dominante nas fases II e III, devido aos processos acidogênicos e acetogênicos que se geram no aterro, estes processos dão também origem à formação de hidrogénio. No final da fase III, a produção de oxigénio é diminuta e nesta começa a aumentar a atividade das bactérias metanogénicas que produzem o metano. Durante a fase IV a produção de metano e dióxido de carbono é dominante, cerca de 45 a 60% e 35 a 50% respetivamente. Além do metano e dióxido de carbono, que representam mais de 90% da composição do biogás de aterro no final da fase V também existem pequenas quantidades de azoto e oxigénio. A presença destes componentes minoritários resulta sobretudo do aprisionamento do ar que ocorre durante a deposição de resíduos mas também da difusão de ar nas camadas junto à superfície ou então devido à entrada de ar que ocorre quando o biogás de aterro é extraído (Scott et al., 2007) A Figura 2 representa a evolução da degradação dos resíduos orgânicos

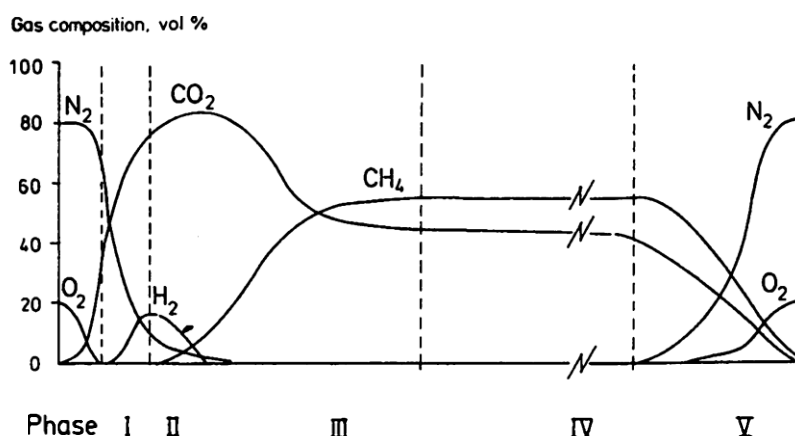


Figura 2. Evolução da degradação dos resíduos orgânicos (Scott et al., 2007)

De acordo com a literatura consultada, a fase I pode durar entre algumas horas a uma semana; a fase II entre um a seis meses; a fase III entre três meses a três anos; a fase IV entre oito a quarenta anos e a fase V entre dez a oitenta anos (El-Fadel et al., 1997).

A exploração económica do biogás é viável a partir do primeiro ano de vida do aterro (Dermibas, 2006). A sua produção é constante durante cerca de 20 anos, contudo

pode haver produção até 50 anos depois ou mais após o encerramento do aterro. Esta longa produção de biogás ocorre em aterros que tenham recebido grandes quantidade de resíduos orgânicos e de resíduos de animais domésticos (El-Fadel et al., 1997 e ATDR, 2001).

A produção de gases num aterro sanitário é influenciada por vários fatores, os quais podem ser organizados em quatro classes, nomeadamente: i) geometria e exploração do aterro; ii) características dos resíduos; iii) características internas do aterro e iv) características externas do aterro (Alves, 2008).

A geometria e exploração do aterro sanitário influenciam a taxa de produção de gases pois para que ocorram os processos de degradação anaeróbia é necessário que a altura do lixo seja maior que a sua profundidade; a impermeabilização do aterro permite que a massa de resíduos esteja resguardada das condições atmosféricas e a compactação do lixo provocada ou não pela exploração do aterro diminui o volume dos resíduos e os espaços vazios entre estes e por isso facilita a ocorrência da fase de degradação anaeróbia (Alves, 2008).

Já as principais características dos resíduos que afetam a produção de gases são sobretudo o teor de humidade e a composição dos resíduos. É necessário que os resíduos possuam algum teor de humidade para que se inicie o processo de degradação, pois esta é fundamental para a mobilidade e difusão das bactérias e nutrientes, contudo teores elevados de humidade são limitantes ao processo de degradação pois nesses casos pode haver a diluição das bactérias o que afeta a sua ação sobre o substrato sólido. A composição dos resíduos é também um fator muito importante pois quanto maior for a fração biodegradável mais elevada é a produção de gases, sobretudo se houver grande quantidade de celuloses e hemiceluloses (Alves, 2008; Barlaz, Eleazer, Odle, Qian & Wang, 2004). De acordo com Barlaz et al. (2004), o conteúdo dos resíduos em celulose e hemicelulose corresponde a 91% do potencial de produção de metano, sendo que o restante potencial depende do conteúdo em azoto orgânico e açúcares.

Entre os fatores do ambiente interno e externo que maior influência tem na produção de gases estão a temperatura; pH; teor de humidade; disponibilidade de nutrientes e a presença de inibidores (Warith, 2002; Gerardi, 2003).

Para que haja produção de metano é necessário que a temperatura seja mantida dentro de uma gama ótima, nomeadamente entre 30°C a 35°C para as bactérias mesofílicas e entre 50°C a 60°C para as bactérias termofílicas, todavia temperaturas entre os 40°C e os 50°C são inibidoras do processo de produção de metano. Em aterros sanitários, são as bactérias mesofílicas as principais responsáveis pela produção de biogás e por isso as temperaturas de 35°C são as ideais para a produção de metano, porém a temperatura não deve descer abaixo dos 32°C para que a produção não desacelere. A produção de metano e a temperatura estão intimamente relacionadas pois à medida que aumenta a temperatura, maior é a taxa de destruição de sólidos voláteis. A temperatura é também diretamente proporcional à atividade enzimática das bactérias (Gerardi, 2003). As temperaturas que se verificam dentro de um aterro sanitário, as quais normalmente são mais elevadas do que as registadas à superfície do solo, resultam da ocorrência dos processos bacterianos, contudo as temperaturas que se registam nos aterros podem variar consoante o tipo de resíduos existentes; teor de humidade; condições atmosféricas e profundidade (Scott et al., 2007). Maurice e Lagerkvist (2002) verificaram que a temperatura existente dentro de um aterro sanitário na Suécia à superfície variava consoante as condições climáticas todavia a partir dos 4m de profundidade esta era constante independentemente da época do ano, como se pode ver na Figura 3. Dentro de um aterro sanitário as temperaturas registadas devido ao processo de degradação dos resíduos podem ser muito elevadas, podendo chegar até aos 87°C (Klein, Baumann, Kahapka & Niessner, 2001) ou até mesmo aos 100°C (Komilis et al., 1999 citados em Scott et al., 2007). As elevadas temperaturas verificadas dentro de um aterro juntamente com o calor libertado durante o processo de oxidação do metano provocam a diminuição do teor de humidade do solo, o que pode comprometer o processo de produção de metano. Quando esta situação se verifica as taxas de produção de metano mais elevadas verificam-se durante o inverno (Maurice & Lagerkvist, 2002).

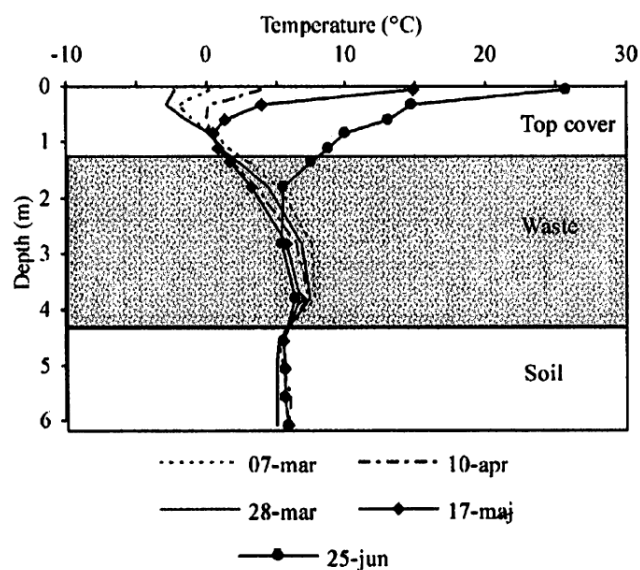


Figura 3. Perfil de temperaturas verificadas num aterro sanitário na Suécia (Maurice & Lagerkvist, 2002)

A temperatura verificada dentro do aterro altera-se com a produção de calor resultante da produção de biogás, como se verifica na Figura 4. Na fase anaeróbia a subida da temperatura é mais notória do que na fase aeróbia (Klein et al., 2001; Hanson, Yeşiller, & Oettle, 2008). A colocação de resíduos altera a temperatura verificada no interior do aterro, Hanson et al. (2008) verificaram que num período de oito anos as temperaturas aumentaram 1,5°C a 2,5°C contudo no Alasca num período de dois a quatro anos o aumento foi 5°C a 9°C. Este autor verificou que em locais com elevada densidade de resíduos e elevados teores de humidade, resultantes sobretudo de precipitação, estas condições provocavam um aumento rápido das temperaturas, porém em locais com climas secos e baixa densidade de resíduos as temperaturas eram relativamente constantes. Também as propriedades térmicas do solo têm influência nas temperaturas registadas dentro de um aterro sanitário. A utilização de materiais isolantes impede que haja uma grande variação das temperaturas dentro do aterro o que permite que a taxa de produção de biogás seja constante (Hanson et al., 2008).

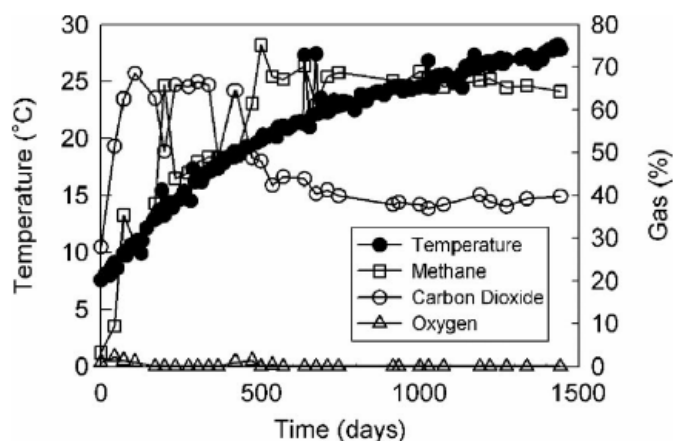


Figura 4. Variação no tempo das temperaturas verificadas num aterro sanitário e da produção de gases (Hanson et al., 2008)

Num aterro sanitário as temperaturas mais elevadas verificam-se nos locais mais centrais, enquanto que as temperaturas mais baixas, as quais apresentam variações semelhantes às ocorridas à superfície do solo de acordo com a estação do ano, registam-se nas partes superiores e laterais dos aterros. Nas zonas mais profundas dos aterros a temperatura é relativamente constante independentemente da estação do ano e dos processos de degradação dos resíduos (Hanson et al., 2008).

O pH possui também uma grande influência sobre a atividade bacteriana, pois esta diminui em situações de pH mais baixo. Os valores ideais de pH para a produção de metano situam-se entre os 6,8 e 7,4 (Warith et al., 2005). Nas fases iniciais de produção de biogás, os valores de pH são baixos e nesta situação há produção de ácidos voláteis, contudo à medida que as bactérias consomem os ácidos voláteis o pH aumenta (Gerardi, 2003).

O teor de humidade é um fator fundamental para a produção de metano pois este é essencial para o transporte de microorganismos, substrato, nutrientes e oxigénio e na dissolução de inibidores (Warith et al., 2005). Consoante a precipitação média anual registada num local, um aterro sanitário pode ser classificado de seco ou molhado/húmido. De acordo com o Banco Mundial (2004) dependendo da quantidade de precipitação registada os aterros podem ser: i) aterros secos - <500 mm/ano; ii) aterros relativamente secos - entre 500 mm e 1000 mm/ano e iii) aterros relativamente molhados - >1000 mm/ano. O facto de um aterro ser considerado seco ou molhado

influencia a quantidade de biogás produzido devido à velocidade de decomposição dos resíduos (Banco Mundial, 2004). Os valores de humidade favoráveis ao processo de decomposição dos resíduos rondam entre os 20% e os 40% (Alves, 2008). As principais fontes de humidade são a precipitação; temperatura; tipo de cobertura do aterro; sistema de recolha do biogás; recirculação de lixiviado; escoamento superficial e subterrâneo (Scott et al., 2007; Banco Mundial, 2004)

Para que o processo de degradação dos resíduos decorra, é necessário que as bactérias tenham acesso a nutrientes, sobretudo ao azoto e fósforo. Também micronutrientes como o enxofre; cálcio; magnésio; potássio; ferro; zinco; cobre; cobalto e selénio são importantes para a degradação dos resíduos (Warith, 2005). A conversão do acetato em metano só ocorre quando estão presentes os macronutrientes azoto e fósforo e os micronutrientes cobalto, ferro, níquel e sulfúrico (Gerardi, 2003).

Além de ser importante que todos os fatores supracitados estejam presentes para que se produza biogás, é necessário que sobretudo durante a fase anaeróbia, a qual é mais sensível, se evite a presença de inibidores como o oxigénio; dióxido de carbono; hidrogénio; iões de sais; metais pesados e a atividade de protões, entre outros compostos orgânicos. Além destes inibidores existem outros fatores que em determinadas condições se podem tornar inibidores como por exemplo o sódio, o potássio, o cálcio, o magnésio e o amónio em baixas concentrações são favoráveis à degradação dos resíduos mas que em altas concentrações se tornam inibidores (Warith, 2005).

Nem sempre é fácil detetar qual o fator que mais influencia a formação de biogás pois geralmente estes interagem entre si e por isso é difícil individualizar os seus efeitos. Contudo para El- Fadel et al., (1997) os fatores que mais influenciam a produção de biogás são sobretudo o grau de mistura dos resíduos e também a composição, temperatura e pH dos resíduos. A temperatura e o pH também podem funcionar como inibidores no processo de degradação, juntamente com a presença de oxigénio durante a fase anaeróbia, como se pode ver na tabela 3.

Tabela 3. Efeitos das variáveis que influenciam a produção de biogás em aterros (Fonte: El-Fadel et al., 1997)

Variable	Gas enhancement potential			Gas inhibition potential		
	Low	Medium	High	Low	Medium	High
Composition		+			-	
Density	+					
Particle size	+					
Temperature		+				-
pH		+				-
Nutrients	+			-		
Microbes	+				-	
Moisture			+			
Oxygen						-
Hydrogen	+				-	
Sulfate					-	
Toxics					-	
Metals					-	

1.4. Movimento dos gases de aterro

Compreender a forma como os gases de aterro migram e quais os fatores que afetam o seu movimento é fundamental na instalação dos sistemas de recolha de gases. Os principais fatores que influenciam a migração dos gases de aterro são a i) difusão/produção; ii) a pressão e a iii) permeabilidade (O’Leary & Walsh, 2002; El-Fadel et al., 1997; ATDR, 2001).

O biogás de aterro movimenta-se através dos caminhos de menor resistência, nomeadamente, solos constituídos por areia e cascalho. A pressão barométrica é um dos fatores que mais influencia a taxa de migração dos gases, à medida que aumenta a pressão, o biogás é forçado a sair do aterro (O’Leary & Walsh, 2002).

O biogás produzido em aterros sanitários move-se através de mecanismos de advecção e de difusão. Estes movimentos ocorrem porque no aterro tal como na natureza existe a procura do equilíbrio e por isso o biogás de aterro desloca-se das zonas de maior pressão ou de maior produção de biogás para as zonas de menor pressão ou produção (El-Fadel et al., 1997).

A direção, velocidade e distância de migração do gás de aterro são afetadas por vários fatores. O gás migra verticalmente se a cobertura do aterro for essencialmente constituída por material permeável como, cascalho ou areia, porém este migra horizontalmente se a cobertura for impermeável, ou seja, constituída por sedimentos e

argilas. A existência de túneis, rede de esgotos, fracturas nas rochas ou de um solo poroso facilita a migração do gás de aterro. O gás de aterro é transportado pelo vento, a sua velocidade e direção influencia a produção do gás. A humidade impede a migração do gás de aterro, contudo um teor elevado de humidade pode fazer com que o gás seja forçado a migrar. As variações no lençol freático também influenciam a migração dos gases pois à medida que o lençol sobe o gás é forçado a movimentar-se verticalmente. O aumento da temperatura estimula a migração e a difusão do gás de aterro. E finalmente a diferença entre a pressão do gás e a pressão barométrica do solo fazem com que o gás migre para fora do aterro quando a pressão atmosférica diminui, contudo quando esta aumenta o gás fica dentro do aterro (ATDR, 2001).

1.5. Modelos de produção de biogás

São vários modelos matemáticos que permitem prever o padrão de distribuição temporal e espacial em que o biogás de aterro é produzido. Existem modelos que só preveem a produção de biogás; modelos dedicados ao movimento de transporte do biogás; modelos que permitem perceber como se gera o biogás e como este é transportado e modelos que além destes processos permitem também compreender o mecanismo de formação de calor dentro do aterro (El-Fadel et al., 1997).

Os resíduos têm taxas de degradação diferentes, pois os compostos de açúcar e amidos decompõem-se mais facilmente do que por exemplo celulose e por isso é difícil que uma equação preveja com exatidão a velocidade de biodegradação e a taxa de produção de gases em aterro (El-Fadel et al., 1997).

A taxa de produção de gases que se verifica num aterro com um comportamento de reator descontínuo pode ser prevista através do modelo de crescimento microbiano de *Monod* (Equação 1). Para a aplicação da equação de *Monod* é necessário identificar-se a população microbiana, no caso de processos anaeróbios são sobretudo as bactérias produtoras de ácido e de metano, o respetivo substrato e escolher valores para as constantes biocinéticas de crescimento das bactérias, para as quais existem diversos valores na literatura (El-Fadel et al., 1997).

$$\frac{dX}{dt} = \mu_m \frac{SX}{K_s + S} - K_d X$$

$$\frac{dX}{dt} = Y \frac{dS}{dt}$$
(1)

Onde:

X – Produção de população microbiana (mg/l);

μ_m – Taxa específica de crescimento máxima (d^{-1});

S – Produção de substrato limitante (mg/l);

K_s – Constante de saturação (mg/l);

K_d – Taxa de decaimento (d^{-1});

Y- Coeficiente de rendimento celular (mg de células sintetizadas/mg de substrato utilizado) e

t – Tempo (d).

Os modelos de produção de gases de aterro são normalmente classificados como de: i) ordem zero; ii) primeira ordem; ou iii) multi-fase, em função de como é quantificado o biogás, ou seja, se esta quantificação é referente a um parâmetro genérico fixo ou se esta é baseada num parâmetro genérico que se altera, consoante os processos físico-químicos presentes no processo de degradação de resíduos (Kamalan et al., 2011).

Nos modelos de ordem zero considera-se que a produção é constante ao longo do tempo, sendo que esta não difere consoante a idade do aterro nem com o facto de serem depositados diferentes tipos de resíduos, o que torna este modelo um pouco incompleto (Kamalan et al., 2011).

Para Ham e Barlaz (1989 citados em El-Fadel et al., 1997) a produção de biogás em aterro, sobretudo em períodos de maior produção, decorre segundo um modelo de ordem 0 (Equação 2), no qual a velocidade de reação não depende da quantidade de substrato que é decomposto, tendo a produção de biogás um valor constante e independente do tempo da reação. Contudo esta situação só é válida quando não existem condições desfavoráveis como a falta de nutrientes, a presença de substâncias tóxicas ou

um baixo teor de humidade que dificultam a decomposição dos resíduos e em que a produção de substrato se torna um fator primordial à ocorrência da decomposição

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{Y}(\mu_m - K_d)X; \quad S \gg K_s \quad (2)$$

Um outro exemplo de modelo de ordem zero (Equação 3) foi o desenvolvido pela Solid Waste Association of North América (SWANA, 1997):

$$Q_{CH_4} = \frac{r * L_0}{(t_0 - t_f)} \quad (3)$$

Onde:

Q_{CH_4} - Taxa de produção de metano (m^3 /ano);

r- Quantidade de resíduo depositado (t);

L_0 - Potencial de produção de metano (m^3 /t);

t_0 - Tempo entre a deposição do resíduo e início das emissões de biogás (dias) e

t_f - Momento em que cessam as emissões (dias).

Os modelos de primeira ordem consideram que existe emissão de biogás a partir do momento em que um resíduo é depositado, por esta razão quando se inicia a decomposição existe uma produção exponencial de biogás, a qual decresce ao longo do tempo em que ocorre a decomposição total dos resíduos (Kamalan et al., 2011). Ao contrário dos modelos de ordem 0, nos modelos de 1ª ordem a atividade biológica é dependente da disponibilidade de substrato (El-Fadel et al., 1997). Como exemplo de modelo de cinética de primeira ordem pode realçar-se o modelo desenvolvido pela U.S. EPA (Equação 4) (Souza, Serra, Junior & Santos, 2009). Neste modelo os valores da taxa de produção de metano (k) e potencial de produção de metano (L_0) estão pré-estabelecidos a partir de valores obtidos em relatórios da U.S. EPA sobre aterros, os quais devem ser utilizados quando não existem valores reais referentes à produção de metano. A taxa de produção de metano corresponde à taxa de decomposição biológica de primeira ordem existente após a deposição do resíduo e durante a qual se produz metano. Já o potencial de produção de metano varia consoante a composição do resíduo

e sobretudo de acordo com a fração de matéria orgânica existente. Esta taxa depende do teor de humidade; disponibilidade de nutrientes; pH e temperatura. Os valores de k variam entre 0.2 e 0.4 consoante os valores de precipitação média anual de cada local, enquanto que o valor de L_0 é um valor fixo - 100 m³ /t- porque foi com este valor que se verificou que havia correspondência entre as emissões medidas e as emissões previstas (U.S. EPA, 2008).

$$Q_{CH_4} = L_0 \times R \times (e^{-k.c} - e^{-k.t}) \quad (4)$$

Onde:

Q_{CH_4} – Quantidade de metano produzido no ano t (m³/ano);

L_0 - Potencial de Produção de metano (m³/t);

R – Média anual de entrada de lixo (t/ano);

k – Taxa de produção de metano (ano⁻¹);

c – Anos desde o encerramento do aterro e

t – Anos desde o início da atividade.

Nos modelos multi-fase são utilizadas diferentes equações para cada fração de resíduo porque a taxa de decomposição não é constante, pois esta difere de resíduo para resíduo. Um modelo multi-fase de primeira ordem é o de Afvalzorg (Equação 5), no qual se distinguem oito categorias de resíduos e três frações, esta divisão tem em conta a degradação lenta, moderada e rápida dos resíduos (Kamalan et al., 2011).

$$\alpha_t = \zeta \sum_{i=1}^3 c A C_{0,i} k_{1,i} e^{-k_{1,i}t} \quad (5)$$

Onde:

α_t - Produção de biogás por ano (m³/ano);

ζ - Fator de fracionamento;

i - Fração do resíduo com uma taxa de degradação (kg_{*i*} / kg resíduo);

c - Fator de conversão (com valor mínimo e máximo entre 0,7 e 0,74 (m³ biogás / kg M.O. degradada);

A - quantidade de resíduo depositado (t);

C_0 - Quantidade de matéria orgânica presente no resíduo (kg M.O. / t resíduo);

$k_{1,i}$ - Taxa de degradação constante da fração i (ano) e

t - Tempo após a deposição (ano).

Findikakis e Leckie (1979) desenvolveram o primeiro modelo que combinava a produção de gás de aterro e os processos de transporte associados. O modelo foi aplicado a dois aterros os quais apresentavam uma estrutura horizontal homogênea, neste modelo a produção de metano e dióxido de carbono era dependente do tempo decorrido. O objetivo deste modelo era estudar a distribuição e produção de gás e correspondente pressão em aterros cobertos. A construção do modelo foi baseada na cinética de Monod, contudo Findkakis, Papelis, Halvadakis & Leckie (1988) introduziram alterações que aproximam o modelo da forma real em que decorre a metanogênese, nomeadamente, um ramo hiperbólico e um ramo que representa o declínio exponencial.

São vários os fatores que influenciam os processos que ocorrem num aterro sanitário, contudo apenas para a temperatura, pH e teor de humidade existem dados quantitativos e por isso são a partir destes que se podem formular modelos de previsão de produção de gás de aterro (El-Fadel et al., 1997).

Os modelos de produção de gases em aterro apenas se focam sobretudo na fase gasosa, contudo um aterro é um meio multifásico onde há interação entre a fase gasosa, líquida e sólida. A fase líquida corresponde essencialmente ao meio aquoso formado pela infiltração de água proveniente da precipitação e o qual é essencial para o transporte dos microorganismos, o que consequentemente aumenta o potencial de produção de gás. Já a fase sólida corresponde ao lixo, cuja composição e estrutura está em constante mudança devido à biodegradação dos materiais orgânicos. Um aterro é um meio muito complexo e não existe nenhum aterro que seja igual a outro e por isso é difícil desenvolver um modelo que abarque toda a complexidade de um aterro (El-Fadel et al., 1997).

1.6. Potencial de utilização do biogás como fonte de energia

O biogás de aterro é uma poderosa fonte energética, contudo a instalação de um sistema de recolha do biogás depende do tipo de gases gerados e sobretudo da quantidade de metano produzida (Willumsen, 2001). As taxas anuais de produção de biogás podem ir dos 0.06 m³ aos 0.09 m³ (Bogner & Spokas, 1993).

A extração do gás de aterro pode ser feita através de tubos horizontais colocados aquando da construção do aterro e/ou através de tubos verticais colocados durante a ocorrência de atividade do aterro. O sistema de recolha do biogás é composto por poços de coleta e tubos condutores, sistema de compressão, sistema de purificação e queima utilizado em períodos de quantidade diminuta ou excesso de biogás (Willumsen, 2001).

O biogás produzido nos aterros sanitários pode ser utilizado como fonte de eletricidade, de aquecimento em indústrias, estufas, casas e aquicultura ou também como combustível para veículos sobre a forma de gás natural comprimido e liquefeito (Willumsen, 2001).

As principais propriedades da combustão do biogás encontram-se identificadas na Tabela 4.

Tabela 4. Propriedades da combustão do biogás (Fonte: Balat & Balat, 2009)

Ponto de ignição	700 °C
Densidade	1.2 kg/m ³
Produção de gás durante a ignição	6-12 %
Poder Calorífico	5.0-7.5 kWh/m ³

A percentagem de metano é a principal característica que influencia o poder calorífico do biogás, na Figura 5 verifica-se que o poder calorífico do biogás aumenta à medida que aumenta a percentagem de metano (Alves, 2008). Além da percentagem de metano também o teor de humidade afeta o poder calorífico pois diminui a temperatura

da chama e conseqüentemente o poder calorífico e os limites de inflamabilidade (Pecora et al., 2008).

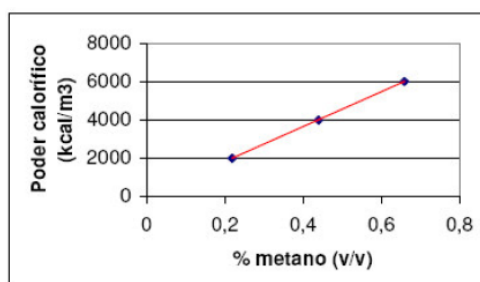


Figura 5. Relação entre o poder calorífico do biogás e a percentagem de metano em volume (Fonte: Alves, 2008)

A partir do poder calorífico e a eficiência média da combustão é possível obter-se a equivalência energética do biogás relativamente a outros combustíveis e assim se perceber melhor o potencial energético do biogás. Na tabela 5 está representada a equivalência energética de 1 Nm³ relativamente a outros combustíveis (Filho, 2005).

Tabela 5. Equivalência energética de 1Nm³ de biogás em relação a outros combustíveis (Fonte: Figueiredo, 2007)

Combustível	Quantidade equivalente a 1Nm³ de biogás
Carvão vegetal	0.8 kg
Lenha	1.5 kg
Óleo diesel	0.55 l
Querosene	0.58 l
Gasolina amarela	0.61 l
Gás petróleo liquefeito	0.45 l
Álcool carburante	0.80 l
Carvão mineral	0.74 kg

As tecnologias mais utilizadas para a conversão energética do biogás são as turbinas a gás e os motores de combustão interna, contudo ultimamente também são utilizadas ainda em número reduzido as células de combustível. As turbinas a gás podem ser de ciclo aberto ou de ciclo fechado, as primeiras são o tipo de turbinas mais comuns. Nas

turbinas de ciclo aberto o ar é comprimido no compressor o que faz aumentar a pressão, depois deste processo o ar dirige-se para a câmara de combustão, onde em contacto com o combustível reage, dando então origem ao processo de queima. Os gases gerados expandem-se devido às altas temperaturas verificadas na turbina o que produz energia mecânica. Já nas turbinas de ciclo fechado os gases ao saírem da turbina passam por um trocador de calor onde arrefecem e depois entram novamente no compressor (Moran & Shapiro, 2002).

A viabilidade económica de utilização do biogás para produção de energia eléctrica dependerá da eficiência que se obterá com a conversão eléctrica; da produtividade do metano e do custo de instalação, operação e manutenção do sistema eléctrico (Banco Mundial, 2003).

2. METODOLOGIA

2.1. Caraterização do caso de estudo

O Aterro Sanitário em estudo localiza-se em Évora. Este é gerido pela empresa GESAMB. A empresa foi criada pela Associação de Municípios do Distrito de Évora, esta é uma empresa intermunicipal com capitais maioritariamente públicos. A GESAMB é a responsável pela gestão e exploração do Sistema Intermunicipal de Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos do Distrito de Évora – SIRSU, identificado na Figura 6, o qual abrange os municípios de Alandroal, Arraiolos Borba, Estremoz, Évora, Montemor-o-Novo, Mora, Mourão, Redondo, Reguengos de Monsaraz, Vendas Novas e Vila Viçosa. Nos concelhos abrangidos são produzidas cerca de 76 mil T de resíduos por ano. A área de intervenção da GESAMB corresponde a 6,9 % da área total do país, cerca de 1,6 % do lixo doméstico produzido em Portugal é tratado e valorizado nesta empresa. (GESAMB, 2013).

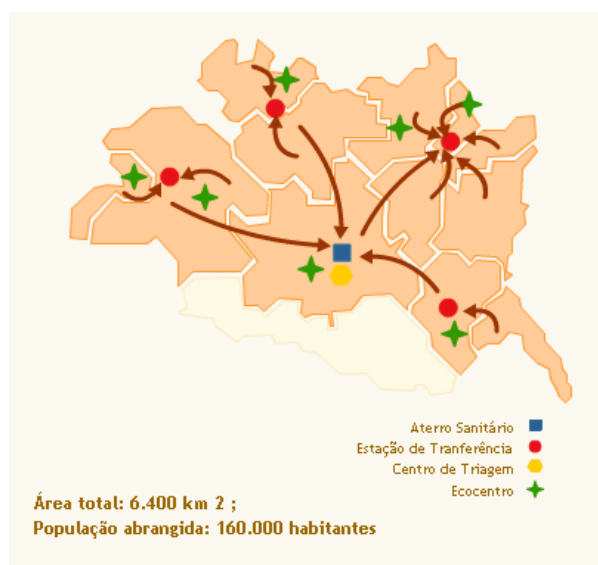


Figura 6. Sistema intermunicipal de resíduos sólidos urbanos do distrito de Évora (Fonte: GESAMB, 2013)

Em termos climáticos o aterro sanitário de Évora localiza-se num clima tipicamente mediterrânico. Nesta região a temperatura média anual é de 16°C, e a precipitação média anual de cerca de 600mm (INAG, 2008a). O regime da precipitação é muitíssimo

irregular, tanto a nível espacial como temporal, sobretudo em termos de quantidade de precipitação (Daveau, 1977 citado em Durão et al, 2009). Nesta região os verões são muito quentes (ocorrem cerca de 128 dias por ano com temperatura média superior a 25°C) os quais contrastam com Invernos muito frios (verificam-se cerca de 90 dias por ano com média inferior a 5°C) (Câmara Municipal de Évora, 2013).

O Aterro Sanitário de Évora, presente na Figura 7, é um reator anaeróbico que entrou em funcionamento em 2002, o qual possui uma área total de 300.000m². Este é composto por 4 células - A,B,C,D, as quais estão identificadas na Figura 8. Todas as células possuem resíduos depositados, sendo que o grau de enchimento de cada uma não é uniforme, no entanto, a cota máxima final da plataforma deverá rondar os 248m - 250m (AMBIRUMO, 2012).



Figura 7. Aterro Sanitário de Évora (Fonte: Própria)

Neste momento encontra-se em fase final de construção uma unidade de Tratamento Mecânico e Biológico que tem como principal objetivo a diminuição da deposição de resíduos biológicos em aterro, o que irá aumentar o tempo de vida útil do aterro. Os resíduos resultantes desta nova unidade serão depositados numa nova célula (E), pois possivelmente no final de 2013 será atingida a cota máxima da plataforma (AMBIRUMO, 2012).

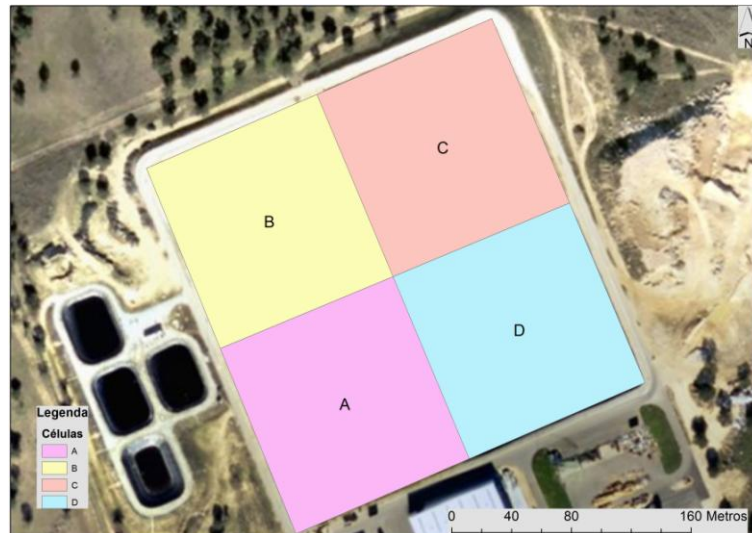


Figura 8. Localização das células que compõe o aterro sanitário (Fonte: Própria)

A exploração do aterro é feita de modo convencional, ou seja, através da deposição dos resíduos em camadas com 2m de altura, sendo estas depois compactadas e cobertas com terra. Atualmente as células A, B e C já se encontram seladas pois os taludes laterais estão dentro da cota máxima (AMBIRUMO, 2012).

Para que haja uma perfeita drenagem do biogás foram instalados 30 poços verticais, os quais estão identificados na Figura 9. A drenagem do biogás é constituída por um gabião na base a partir do qual se desenvolve uma tubagem de captação em PEAD ranhurado com um diâmetro de 160 mm, atravessada por sucessivos troços. Estes tubos são rodeados por brita envolta em geotêxtil, no entanto nas zonas de exploração já finalizadas, os poços são selados com cabeça em PEAD e ligados ao coletor periférico que conduz o biogás ao queimador (AMBIRUMO, 2012).

O aterro sanitário contém ainda uma rede de drenagem das águas lixivantes, sendo o lixiviado tratado por uma unidade de osmose inversa. Os drenos que recebem o lixiviado são compostos por cascalho rolado. Presentemente está a ser preparado o sistema de captação, drenagem e tratamento de biogás, para que este possa ser queimado ou tenha aproveitamento energético. Este possui ainda instalações de apoio (báscula de pesagem dos resíduos, refeitório, vestiários e balneários, oficina, armazém e unidade de lavagem de contentores e viaturas, sendo o aterro vedado (AMBIRUMO, 2012).

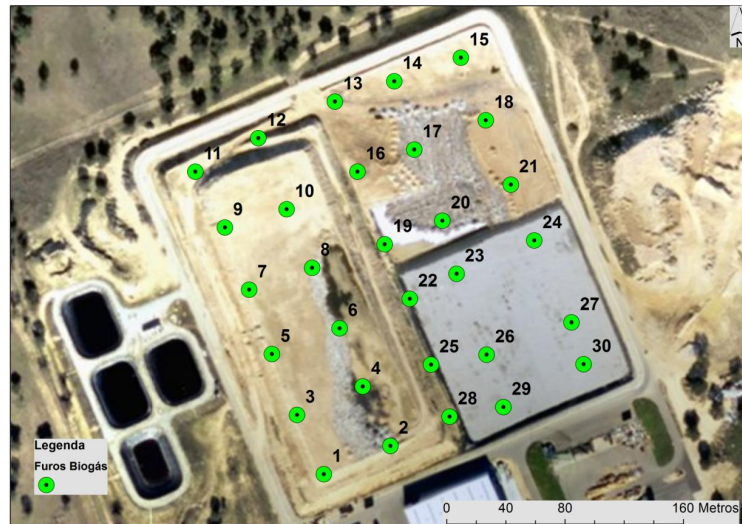


Figura 9. Localização dos poços de recolha de biogás (Fonte: Própria)

Em 2009, a GESAMB efetuou um estudo para avaliar a viabilidade do aproveitamento energético do biogás do Aterro Sanitário, no qual se concluiu que este era viável e por isso foi estabelecido um esquema para o arranque da captação e aproveitamento energético do biogás de forma compatibilizada com a exploração do aterro, o que pressupunha um faseamento de encerramento das células em utilização - A a D. Contudo a implementação deste esquema não foi possível devido à colmatagem dos poços existentes e por isso apenas se efetuou a construção de alguns novos drenos verticais para substituição dos colmatados, sobretudo em zonas periféricas do aterro, acompanhada da selagem das respetivas áreas de influência. Para dar vazão aos resíduos foi também iniciada a construção de uma nova célula, onde após o esgotamento das células A a D serão depositados os resíduos provenientes da unidade de Tratamento Mecânico e Biológico (AMBIRUMO, 2012).

A deposição dos resíduos iniciou-se na célula B, depois foi preenchida a célula A e em seguida a célula C e presentemente os resíduos estão a ser depositados na célula D (AMBIRUMO, 2012).

Dado o grau de enchimento dos taludes, pois parte dos taludes laterais já se encontram nas cotas finais, em Setembro de 2006 estes foram objeto de selagem final, presentemente só falta selar a área correspondente aos poços 24, 27, 29 e 30 (AMBIRUMO, 2012).

A quantidade de resíduos recebidos anualmente neste aterro é de 76.906 T de lixo. Os resíduos inicialmente depositados nas células A e B eram essencialmente inertes, contudo atualmente os resíduos depositados nestas células e nas restantes possuem um teor de matéria orgânica relativamente elevado. Além disto o facto de estes resíduos possuírem um elevado grau de compactação e cobertura faz com que os processos anaeróbios ocorram fácil e rapidamente o que propicia a formação de biogás nas referidas células (AMBIRUMO, 2012).

2.2. Recolha dos dados

Os dados relativos à produção de Biogás foram cedidos pela empresa que gere o aterro sanitário – a GESAMB. Estes dados reportam-se ao início da monitorização do aterro sanitário, nomeadamente Janeiro de 2003, sendo os últimos dados analisados referentes a Outubro de 2012.

Os parâmetros que no aterro sanitário de Évora são monitorizados são:

- i) Metano - CH₄ (%);
- ii) Dióxido de Carbono - CO₂ (%)
- iii) Oxigénio - O₂ (%);
- iv) Sulfureto de Hidrogénio - H₂S (%);
- v) Hidrogénio - H₂ (%);
- vi) Temperatura (° C) e
- vii) Pressão atmosférica (mb).

Os parâmetros referidos são monitorizados mensalmente através do aparelho LMSxi G4.18, este possui um detetor por infravermelhos de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) e sensores de pressão e temperatura. Os dados recolhidos ficam armazenados no aparelho sendo depois transferidos para um computador. A medição é feita uma vez por mês, nos últimos dias de cada mês. Para se efetuar a medição dos parâmetros o aparelho é colocado na desembocadura de cada poço, registando então os valores que se fazem sentir nesse dado momento. Em situações de vento moderado a

forte, as condições meteorológicas podem influenciar os valores de metano registados pelo aparelho.

No estudo em causa apenas foram tidos em consideração os valores de metano (%) verificados no período de Janeiro de 2003 a Outubro de 2012. O metano é o principal gás que constitui o biogás e por isso nesta tese só foi estudado este parâmetro.

2.2.1. Estimativa da produção de metano e de biogás

Um dos objetivos desta tese centra-se na viabilidade do aproveitamento energético do biogás produzido no aterro sanitário de Évora. Partindo do pressuposto que a produção de biogás num aterro depende de parâmetros que são fixos no tempo e espaço, para se estimar a produção de metano (m^3 /ano) registada durante a vida útil do aterro sanitário de Évora utilizou-se o modelo de cinética de primeira ordem (Equação 4) (Souza et al. 2009). Este modelo é também utilizado pela GESAMB.

$$Q_{CH_4} = L_0 \times R \times (e^{-k \cdot c} - e^{-k \cdot t}) \quad (4)$$

Onde:

Q_{CH_4} – Quantidade de metano produzido no ano t (m^3 /ano);

L_0 - Potencial de Produção de Metano (m^3 /t);

R – Média anual de entrada de lixo (t/ano);

k – Taxa de produção de metano (ano^{-1});

c – Anos desde o encerramento do aterro e

t – Anos desde o início da atividade.

Tendo em conta a composição dos resíduos presentes no aterro (SWANA, 1997), foi considerada uma taxa de produção de metano (k) igual a 0.09 (ano^{-1}). Este é também o valor considerado pela GESAMB. Os valores relativos à média anual de entrada de lixo utilizados foram os considerados no estudo efetuado pela GESAMB para avaliar a viabilidade de aproveitamento energético do biogás produzido pelo aterro sanitário, estes valores encontram-se identificados na Tabela 6 (AMBIRUMO, 2012).

De seguida estimou-se a produção de metano (m^3 /ano) a partir da Equação 4, registada no período entre 2002 e 2013, tendo em conta três cenários de potência de produção de metano (L_0) de 100; 50 e 25 (m^3 /t).

Tabela 6. Média anual de entrada de lixo (t/ano)

Ano	R (t/ano)
2003	100.498
2004	99.818
2005	84.969
2006	79.537
2007	81.587
2008	79.463
2009	78.120
2010	79.400
2011	78.177
2012	78.000
...	...
2043	78.000

Posteriormente estimou-se a produção de biogás (m^3 /ano) registada no período entre 2002 e 2013, também tendo em conta quatro cenários de potência de produção de metano (L_0) de 25; 50; 75 e 100 m^3 /t.

Para estimar a produção de biogás considerou-se que o metano estaria presente no biogás numa relação de 55% deste. Face a esta percentagem de metano no biogás o fator de conversão entre metano e biogás utilizado foi de 1.81. A produção de biogás (m^3 /ano) foi assim estimada a partir da Equação 6.

$$\text{Biogás} = Q_{\text{CH}_4} * 1.81 \quad (6)$$

Onde:

Biogás – Produção de biogás (m^3 /ano);

Q_{CH_4} - Taxa de produção de CH_4 por ano (m^3 /ano);

1.81 – Fator de conversão de metano para biogás.

2.2.2. Estimativa da potência e energia disponíveis

Após a estimativa da produção de metano e do biogás no aterro sanitário de Évora, calculou-se a potência disponível através da Equação 7 (Souza, et al. 2009).

$$P_{CH_4} = Q_{CH_4} * P_c * \eta / 860000 \quad (7)$$

Onde:

P_{CH_4} – Potência disponível (MW);

Q_{CH_4} – Quantidade de metano produzido no ano t (m^3 /ano);

P_c – Poder calorífico do metano (J/m^3CH_4);

η – Eficiência do motor: 0.28 e

860000 – Fator de conversão de unidades

A partir do cálculo da potência disponível foi depois possível estimar a produção de energia térmica através da Equação 8 (Adaptado de Souza et al., 2009):

$$E_t = P_{CH_4} * \text{Rendimento} * \text{Tempo de operação} \quad (8)$$

Onde:

E_t – Energia térmica disponível (MWh/dia);

P_{CH_4} – Potência disponível (MW);

Rendimento – Rendimento do motor em plena carga: considerou-se $0.87 = 87\%$;

Tempo de operação – 24 (h/dia).

Além do cálculo da energia térmica, foi estimada também a energia elétrica disponível, a partir da Equação 9 (Adaptado de AMBIRUMO, 2002):

$$E_e = E_t * 0.35 \quad (9)$$

Onde:

Ee - Energia elétrica (MWh);

0.35 – Motor com rendimento de 35%.

A Figura 10 contém um organograma que representa a estrutura das estimativas efetuadas nos pontos 2.2.1; 2.2.2 e 2.2.3 desta tese.

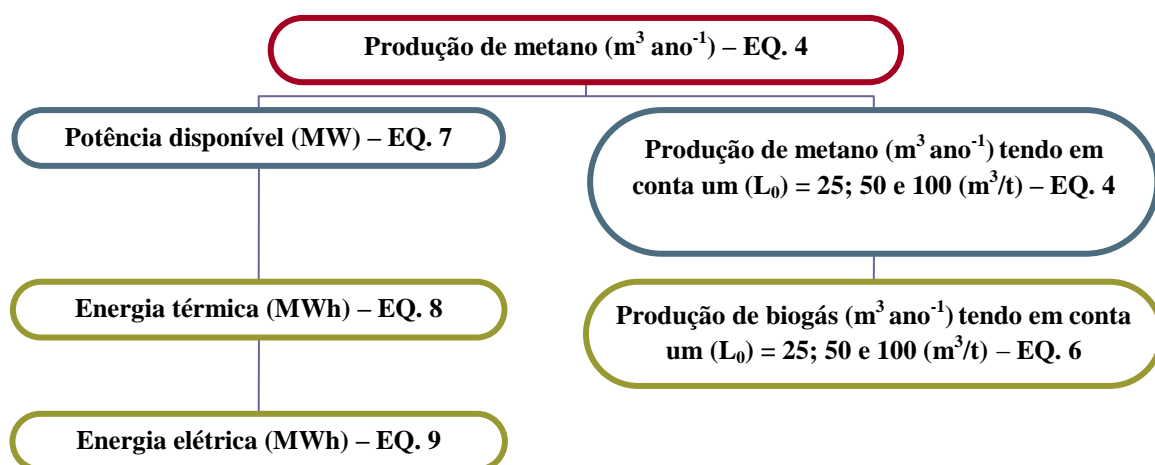


Figura 10. Organograma das estimativas

2.2.3. Estudo da variabilidade temporal e espacial da produção de metano

Tendo em conta que um aterro sanitário é um meio complexo e que por isso é difícil conceber um modelo que abarque toda a variabilidade temporal e espacial da produção de metano, foram produzidos mapas que representam a variabilidade da produção de metano no aterro sanitário de Évora, os quais permitem responder ao principal objetivo desta tese. Para melhor compreender a variabilidade existente foi utilizado o software ArcGIS® 2010. Contudo inicialmente procedeu-se à identificação das coordenadas geográficas (recolhidas através do GNSS, Geoploter 6000 da Trimble) de todos os poços.

No software ArcGIS® 2010, georreferenciou-se uma fotografia aérea com a localização do aterro sanitário de Évora e sobre esta fotografia foram posicionados os

poços de biogás, representados por objetos geográficos do tipo ponto. Com os valores de metano (%) registados nos meses de Março e Outubro de 2003 a 2012 foram elaborados mapas com legendas apropriadas por forma a ilustrar a evolução temporal e espacial da produção de metano registadas nas Primaveras e Outonos dos anos em análise.

Os fatores que maior influência tem na produção de biogás são a temperatura e a precipitação. Tendo em conta este aspeto foram construídos gráficos para cada poço com o intuito de analisar o impacto da temperatura e da precipitação na produção de metano. Construíram-se dois tipos de gráficos, uns que relacionam os valores de produção de metano com os de temperatura média do ar registados no dia da medição e outros gráficos que relacionam os valores de produção de metano com os valores totais de precipitação ocorrida nos dez dias anteriores à medição.

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1. Produção de metano e de biogás

Para se estimar a produção de metano no aterro sanitário de Évora utilizou-se a Equação 4, já citada nesta tese. Os valores dos parâmetros que foram utilizados para estimar a produção de metano através do modelo de cinética de primeira ordem estão presentes na Tabela 7.

Na tabela 7 é possível verificar que a produção de metano (Q_{CH_4}) aumenta à medida que a média anual de entrada de lixo (R) diminui, porém a partir do encerramento do aterro em 2016 a produção de metano diminuirá consecutivamente, tendência que se manterá até ao final de vida útil do aterro. Após o encerramento do aterro, a produção de metano irá diminuir devido ao decréscimo da disponibilidade de matéria orgânica, pois nesta altura já não ocorre a deposição de resíduos. A produção de metano que se irá verificar a partir de 2016 dependerá da taxa de produção de metano (k), ou seja, da velocidade de degradação no tempo da matéria orgânica. A presença de resíduos moderadamente biodegradáveis no aterro de Évora permite que haja produção de metano mesmo após já não haver a deposição de resíduos, este mecanismo de produção encontra-se em linha com o citado por Durmusoglu et al., (2005).

De acordo com a tabela 7 e tendo em conta um L_0 de $100 \text{ m}^3/\text{t}$ a produção máxima de metano no aterro sanitário de Évora será de $5.587.499 \text{ m}^3/\text{ano}$, esta produção será atingida catorze anos após o início de atividade do aterro e cinco anos após a estabilização do volume de resíduos depositados. Contudo por exemplo no aterro sanitário de Mato da Cruz em Vila Franca de Xira, cuja área total do aterro é de 420.000 m^2 e o qual recebe por ano $1.000.000 \text{ t}$ de resíduos, a produção máxima de metano foi de $5.119.090 \text{ m}^3/\text{ano}$, este valor foi alcançado onze anos após o início de atividade do aterro e enquanto este se encontrava em plena atividade. No aterro de Évora, o qual possui uma área total menor (cerca de 300.000 m^2) do que a do aterro Mato da Cruz, a produção máxima de metano será atingida mais tardiamente, mais concretamente numa altura em que já não ocorre a deposição de resíduos, o que demonstra a potencialidade deste aterro na produção de metano

Tabela 7. Valores dos parâmetros utilizados na estimativa da produção de metano ($\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$) a partir do modelo de cinética de primeira ordem

Ano	L_0 (m^3/t)	R (t/ano)	k (ano^{-1})	c (ano)	t (ano)	Q_{CH_4} (m^3/ano)
2003	100	100.498	0.09	0	0	0
2004	100	99.818	0.09	0	1	859.121
2005	100	84.969	0.09	0	2	1.399.692
2006	100	79.537	0.09	0	3	1.882.008
2007	100	81.587	0.09	0	4	2.466.568
2008	100	79.463	0.09	0	5	2.879.515
2009	100	78.120	0.09	0	6	3.259.570
2010	100	79.400	0.09	0	7	3.711.221
2011	100	78.177	0.09	0	8	4.012.416
2012	100	78.000	0.09	0	9	4.330.107
2013	100	78.000	0.09	0	10	4.628.756
2014	100	78.000	0.09	0	11	4.901.702
2015	100	78.000	0.09	0	12	5.151.155
2016	100	78.000	0.09	0	13	5.379.138
2017	100	78.000	0.09	0	14	5.587.499
2018	100	78.000	0.09	1	15	5.106.589
2019	100	78.000	0.09	2	16	4.667.071
2020	100	78.000	0.09	3	17	4.265.382
2021	100	78.000	0.09	4	18	3.898.265
2022	100	78.000	0.09	5	19	3.562.746
2023	100	78.000	0.09	6	20	3.256.105
2024	100	78.000	0.09	7	21	2.975.856
2025	100	78.000	0.09	8	22	2.719.728
2026	100	78.000	0.09	9	23	2.485.644
2027	100	78.000	0.09	10	24	2.271.707
2028	100	78.000	0.09	11	25	2.076.184
2029	75	78.000	0.09	12	26	1.423.117
2030	75	78.000	0.09	13	27	1.300.631
2031	75	78.000	0.09	14	28	1.188.687
2032	75	78.000	0.09	15	29	1.086.378
2033	75	78.000	0.09	16	30	992.875
2034	75	78.000	0.09	17	31	907.420
2035	75	78.000	0.09	18	32	829.319
2036	75	78.000	0.09	19	33	757.941
2037	75	78.000	0.09	20	34	692.705
2038	75	78.000	0.09	21	35	633.085
2039	75	78.000	0.09	22	36	578.596
2040	75	78.000	0.09	23	37	528.797
2041	75	78.000	0.09	24	38	483.284
2042	75	78.000	0.09	25	39	441.689
2043	75	78.000	0.09	26	40	403.673

Ao final de catorze anos de atividade do aterro sanitário Mato da Cruz foram produzidos 4.831.207 m³/ano de metano porém no aterro de Évora serão produzidos 5.587.499 m³/ano de metano. O aterro sanitário Mato da Cruz a partir de 2002 passou a receber apenas a receber os resíduos que não são valorizáveis, daí a quantidade de metano obtido neste aterro ser menor e neste se considerar um L₀ de 50 m³/t.

Tabela 8. Produção de metano (m³ /ano)

Aterro Sanitário	Área (m ²)	Entrada de resíduos (t/ano)	Estimativa da produção de metano ao fim de catorze anos de atividade (m ³ /ano)	Estimativa da produção máxima de metano (m ³ /ano)
Mato da Cruz	420.000	1.000.000	4.831.207	5.119.090
Évora	300.000	76.906	5.587.499	5.587.499

Para além da produção estimada considerando L₀ de 100 m³/t (Tabela 7) calculou-se ainda a mesma produção de CH₄ considerando L₀=50 m³/t e L₀=25 m³/t. Estes resultados podem ser comparados nas Figuras 11 e 12.

Através da análise das Figuras 11 e 12 verifica-se que tanto a produção de metano (m³/ano) como a de biogás (m³/ano) aumentam consecutivamente ao longo dos anos, apresentando valores mais elevados quando se considera um potencial de produção de metano de 100 m³/t resíduo e valores mais baixos quando o potencial é de 25 m³/t. Para que se mantenha um potencial de produção de metano de 100 m³/t e dado que o potencial de produção de metano depende sobretudo da fração de matéria orgânica disponível, a deposição de resíduos biodegradáveis no aterro sanitário deve ser muito superior à deposição de resíduos não biodegradáveis, daí o potencial de produção de metano do aterro sanitário Mato da Cruz ser menor do que o do aterro de Évora.

Pela análise das Figuras 11 e 12 é também possível verificar que por exemplo quando o potencial de produção de metano é de 100 m³/t, os 140 m³/m² de biogás produzido são constituídos por cerca de 80 m³/m² de metano, ou seja, mais de metade do biogás é constituído por metano, e o mesmo acontece quando se considera um potencial diferente. Neste aterro, o metano compõe mais de metade do biogás (m³/ano) produzido, o que está em linha com o indicado por O'Leary & Tchobanoglous (2002),

neste caso devem ser fomentadas as condições de anaeróbiose para que haja uma elevada produção de metano. O facto de mais de metade do biogás produzido ser constituído por metano permite concluir que neste aterro caso o biogás fosse aproveitado, a quantidade de CO₂ que não seria libertado para a atmosfera rondaria os 40%.

O metano possui um potencial de aumento do efeito de estufa 21 vezes superior ao do CO₂. A quantidade de carbono equivalente que potencialmente seria impedido de alcançar a atmosfera devido à utilização do biogás na produção de energia poderia ser de 12 milhões de toneladas.

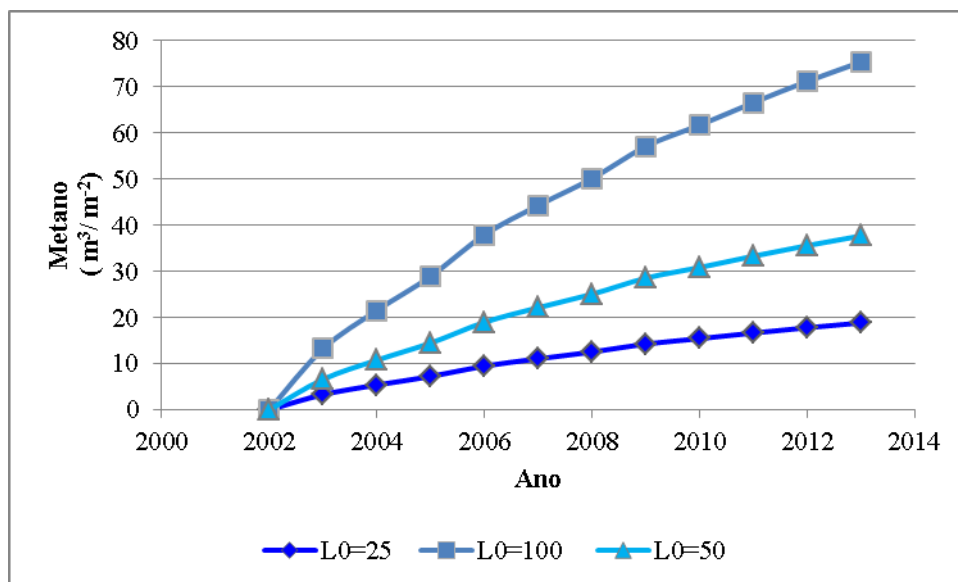


Figura 11. Evolução da produção de metano (m^3/m^2) consoante o potencial de produção (m^3/t)

Nem sempre é possível obter um potencial de produção de metano de 100 m³/t e também nem sempre o composto obtido é o de melhor qualidade, tendo em conta que a rentabilidade obtida pela produção de biogás ou de composto não é a melhor, pode conjugar-se a produção destes dois recursos. Tendo em conta que a GESAMB terá uma unidade de TMB (Tratamento Mecânico e Biológico) pode associar a esta, uma unidade de Digestão Anaeróbia na qual se produz biogás e se obtém também composto. Esta unidade além de garantir o cumprimento da legislação nacional e comunitária no que se refere ao desvio de matéria orgânica de aterro, uma vez associada ao TMB, já existente permite ainda obter mais-valias com a produção de energia. A unidade de digestão

anaeróbia poderá compensar uma diminuição temporária de produtividade dos poços e também a diminuição de produtividade que ocorrerá após o encerramento do aterro.

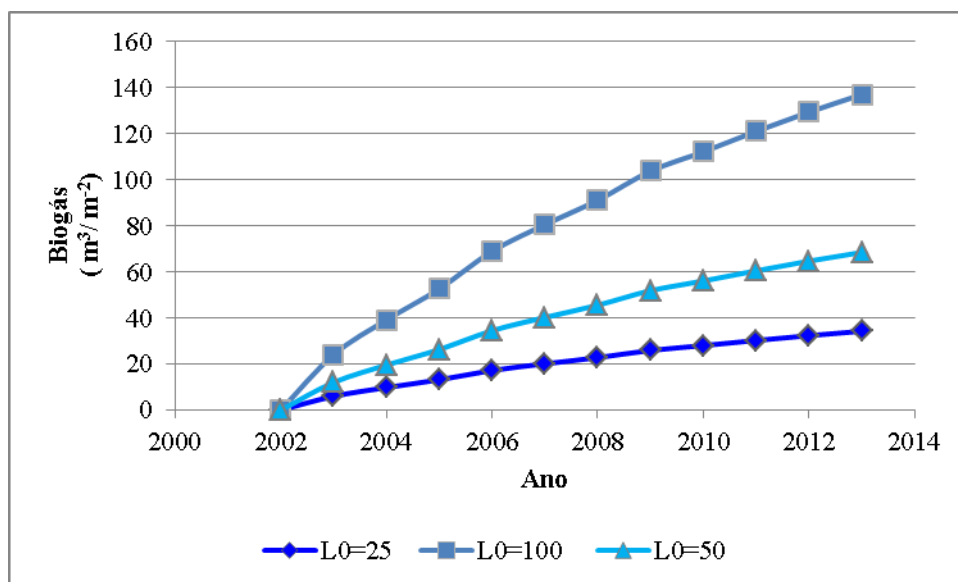


Figura 12. Evolução da produção de biogás (m^3/m^2) consoante o potencial de produção (m^3/t)

De acordo com Verdonck et al (1985 citados em Russo, 2003) e segundo um projeto estudado em escala piloto, numa unidade de digestão anaeróbia é possível obter 180 m^3 de biogás por toneladas de resíduos orgânicos processados em 3 meses.

A VALNOR é a empresa que gere os resíduos do Alto Alentejo e municípios envolventes, o tipo de resíduos recebidos por esta empresa é semelhante aos da GESAMB. De acordo com seu relatório de contas, em 2012 a VALNOR obteve 84.526 euros com a venda de composto, porém obteve 819.053 euros resultantes da venda de biogás proveniente dos três aterros que possui e do processo de digestão anaeróbia (VALNOR, 2013). Tomando em conta os lucros obtidos pela VALNOR através da venda do biogás e fazendo uma conta simples em que se dividi o valor total em euros por quatro (três aterros e uma unidade de digestão anaeróbia), se o biogás produzido no aterro de Évora fosse valorizado, a GESAMB poderia obter cerca de 200.000 euros por ano com a venda do biogás. Estes valores demonstram que o biogás não deve ser um recurso desperdiçado mesmo que haja diminuições de produtividade no aterro e as quais devem ser compensadas pela Unidade de Digestão Anaeróbia. A venda

do biogás e do composto permitirá rentabilizar em poucos anos o investimento efetuado nestas duas unidades.

3.2. Potência Disponível

Em seguida calculou-se a potência disponível (MW), entre 2003 e 2043, a partir da Equação 7 (Souza et al, 2009). Os resultados encontram-se ilustrados na Figura 13.

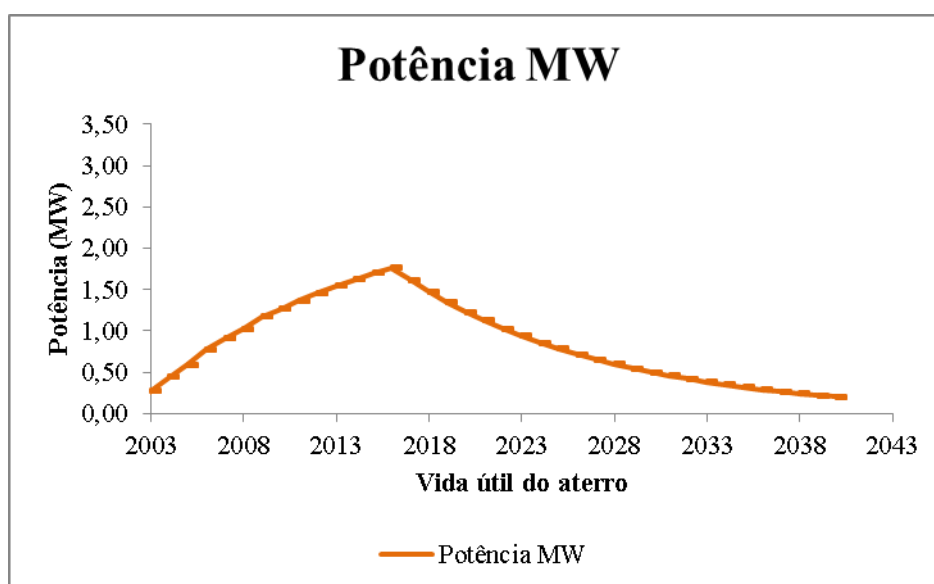


Figura 13. Potência disponível (MW)

A potência disponível (MW) representada na Figura 13 segue a tendência evolutiva da produção de metano (m^3/ano), a qual aumentará consecutivamente até ao encerramento do aterro e diminuirá após esta data.

Tabela 9. Média anual da vazão de metano (m^3/h) e respetiva potência (MW)

	Vazão de CH ₄ (m^3/h)	Potência (MW)
Média diária	301	0,83

Na tabela 9 é visível que no aterro sanitário de Évora por dia pode ser alcançada uma potência de 0,83 MW, ou seja, 830 KW.

Considerando a potência do biogás produzido no aterro sanitário de Évora, nomeadamente de 830 kW, e o seu respetivo aproveitamento energético, tendo em conta as potências unitárias disponíveis no mercado de comercialização de moto geradores, conclui-se que neste aterro deveriam ser instalados motogeradores de Ciclo Otto, com capacidade unitária de 835 kW, perfazendo uma capacidade total instalada de 0,83 MW.

Os motores de combustão interna são normalmente utilizados em aterro com potências de 800 kW pois possuem baixo custo e a sua operação e manutenção é relativamente fácil. Uma outra vantagem destes equipamentos é a flexibilidade na implantação do sistema de geração, o que permite que este seja ampliado com o aumento da quantidade de gás produzido ao longo da vida útil do aterro, instalando-se para isso novos motores.

Na Tabela 10 é possível verificar que em 2012 a potência obtida a partir da produção do biogás no aterro sanitário de Évora foi de 1.46 MW enquanto que por exemplo num aterro sanitário no Brasil (Santa Tecla) que iniciou a sua atividade também em 2002, a potência obtida em 2012 foi de 2.73 MW (Vanzin, 2006). Já no aterro sanitário de Mato da Cruz em Vila Franca de Xira (Teixeira, 2010), um aterro onde a deposição de resíduos já tinha estabilizado em 2002, tal como no aterro de Évora, a potência deste foi de 0.15 MW considerando uma entrada anual de 78.000 t de resíduos. Tomando em conta estes exemplos verifica-se que a potência anual produzida no aterro sanitário de Évora se encontra dentro dos valores de potência dos aterros considerados.

Tabela 10. Potência dos aterros considerados em 2012

Aterro Sanitário	Área (m²)	Resíduos recebidos (t /ano)	Potência (MW)
Évora	300.000	78.000	1.46
Santa Tecla	100.000	50.000	2.73
Mato da Cruz	420.000	200.000	0.15

São várias as fontes de energia renovável, uma delas é a eólica. Os aerogeradores que permitem fazer o aproveitamento da energia eólica são classificados de acordo com a sua potência nomeadamente: i) pequena potência - <40kW; ii) média potência – 40 a 1MW e iii) grande potência - > 1MW. Já por exemplo as plantas solares que fazem o aproveitamento da energia solar podem ter potências de: i) ≤ 10 MW; ii) 20 a 50 MW e iii) ≥ 50 MW. O aproveitamento da potência do biogás produzido no aterro sanitário de Évora, que é de cerca de 0.8 MW equivaleria à instalação de um aerogerador de grande potência (> 1MW) ou então de vinte aerogeradores de pequena potência (<40kW). No que se refere à energia solar o aproveitamento da potência do biogás produzido, este equivaleria à instalação de uma planta solar de baixa potência rondando 1 MW.

Num cenário em que a tarifa de venda do kWh do biogás e do kWh eólico seria semelhante, nomeadamente 0.326€/kWh, o aproveitamento do biogás considerando a sua potência de 0.8 MW, seria mais proveitoso economicamente do que a instalação de um parque eólico com 20 aerogeradores de 40 kWh em Évora, sendo que também o espaço ocupado pelo aterro também é menor do que o necessário para a construção do parque eólico ou até de uma planta solar.

A produtividade da energia solar e da energia eólica é intermitente pois ao contrário do biogás a sua produtividade varia ao longo do dia, mês e ano. Além disto a sua disponibilidade espacial não é igual em todo o país, não sendo assim rentável a sua produção em todas as regiões do país. Caso se aposte na produção de energia a partir da energia solar será imprescindível que haja uma outra fonte de energia que permita responder à necessidade de energia elétrica, compensando assim a intermitência da produção de energia solar. O facto de a produção de biogás ser relativamente constante ao longo do tempo permite que esta seja uma das energias alternativas a considerar. Também o facto de poderem ser vendidos os créditos de carbono traz rentabilidade económica à produção de energia a partir do biogás.

3.3. Produção de energia térmica e elétrica disponível

Depois da potência disponível calculada foi também possível estimar a energia térmica e energia elétrica obtidas entre 2003 e 2043.

A energia térmica disponível foi estimada a partir da Equação 8. Já a energia elétrica disponível estimou-se a partir da Equação 9.

Os resultados obtidos encontram-se ilustrados nas Figura 14.

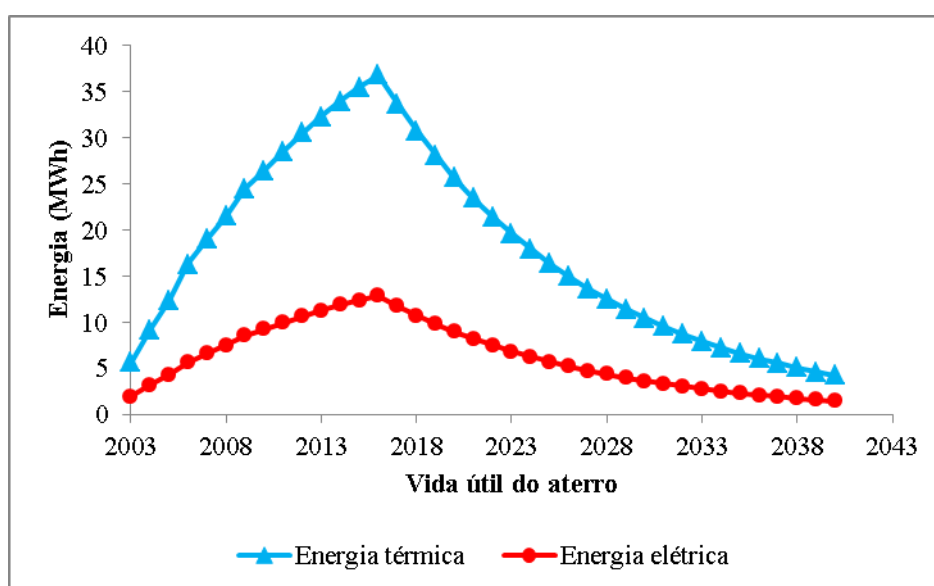


Figura 14. Energia térmica e Energia elétrica (MWh)

Nas Figuras 14 verifica-se que tal como ocorria com os valores de potência, a quantidade de energia térmica e elétrica (MWh) produzida começou a aumentar a partir do momento em que se iniciou a produção de metano, tendência esta que se manterá até ao encerro do aterro em 2016.

A energia disponível máxima obtida no aterro sanitário de Évora foi de 36.86 MWh enquanto que por exemplo no aterro sanitário de Palmas, um aterro brasileiro de maior dimensão, este foi de 18.85 MWh, como se pode verificar na Tabela 11 (Souza et al, 2009). Em 2012 no aterro sanitário de Évora foram produzidos 30.53 MWh porém no aterro sanitário de Palmas foram produzidos 13.04 MWh o que demonstra a

potencialidade do aproveitamento energético do biogás do aterro de Évora. As estimativas dos dois aterros foram feitas tendo em conta um L_0 de $100 \text{ m}^3/\text{t}$.

Segundo Filho (2005) por cada 1.43 kWh de biogás utilizado na produção de energia evita-se a importação de 0.45 l de gás petróleo liquefeito e de 0.74 kg de carvão mineral.

Tabela 11. Energia disponível (MW)

Aterro Sanitário	Área (m ²)	Resíduos recebidos (t/ano)	Energia disponível máxima (MWh)	Energia disponível em 2012 (MWh)
Palmas	530.00	65.700	18.85	13.04
Évora	300.000	78.000	36.86	30.53

Tabela 12. Média anual e dos 39 anos de atividade do aterro sanitário de Évora

	Vazão de CH ₄ (m ³ /ano)	Energia disponível (MWh)
Média anual	2.639.424	17.41
Total dos 39 anos de atividade	102.937.532	679.01

Na Tabela 12 verifica-se que a partir da produção de $2.639.424 \text{ m}^3/\text{ano}$ de metano permitirá obter 17.41 MWh de energia disponível, caso se produza energia a partir do biogás produzido no aterro sanitário de Évora poderá ser evitada a importação de 1559 de tep. Tendo em conta os 39 anos de atividade do aterro a importação de petróleo evitada será de 60810 tep.

3.4. Variação da produção de metano no tempo e espaço

A utilização do software ArcGIS® 2010, possibilitou que se criassem objetos geográficos que permitem compreender a variabilidade temporal e espacial da produção de metano registada nos meses de Março e Outubro entre 2003 e 2012

Através da análise dos mapas produzidos é visível que a produção de metano nos poços da célula B é relativamente constante a nível espacial, como ilustra a Figura 15, e ao nível temporal como está visível na Figura 16. A partir de Março de 2012, como se pode ver na Figura 17 a produtividade da produção de metano destes poços diminuiu para 20% contudo em Outubro de 2012 a maioria dos poços desta célula voltaram a recuperar a sua produtividade, como está visível na Figura 18, em linha com o que se verifica nos poços da célula B. Hanson et al (2008) verificou que em locais com elevados teores de humidade, resultantes sobretudo de precipitação intensa, após estes eventos, a temperatura aumentava rapidamente e consequentemente havia a recuperação da produtividade do metano.

Os poços localizados na célula A inicialmente eram muito produtivos (entre 40 e 70%), como se pode verificar na Figura 15, porém a sua produtividade diminuiu com o passar dos anos como está visível na Figura 16. Ao nível espacial a produtividade destes poços tornou-se irregular como se pode ver na Figura 18 ao contrário do que acontecia por exemplo em Março de 2005.

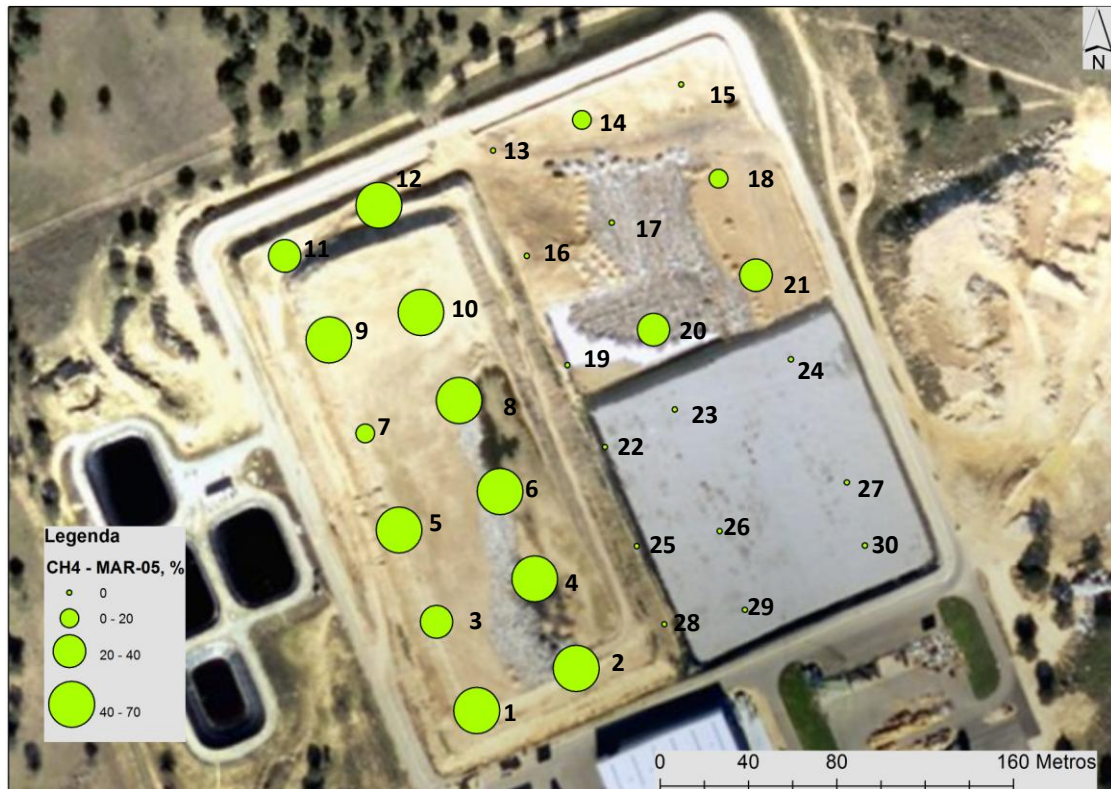


Figura 15. Produção de metano em Março de 2005

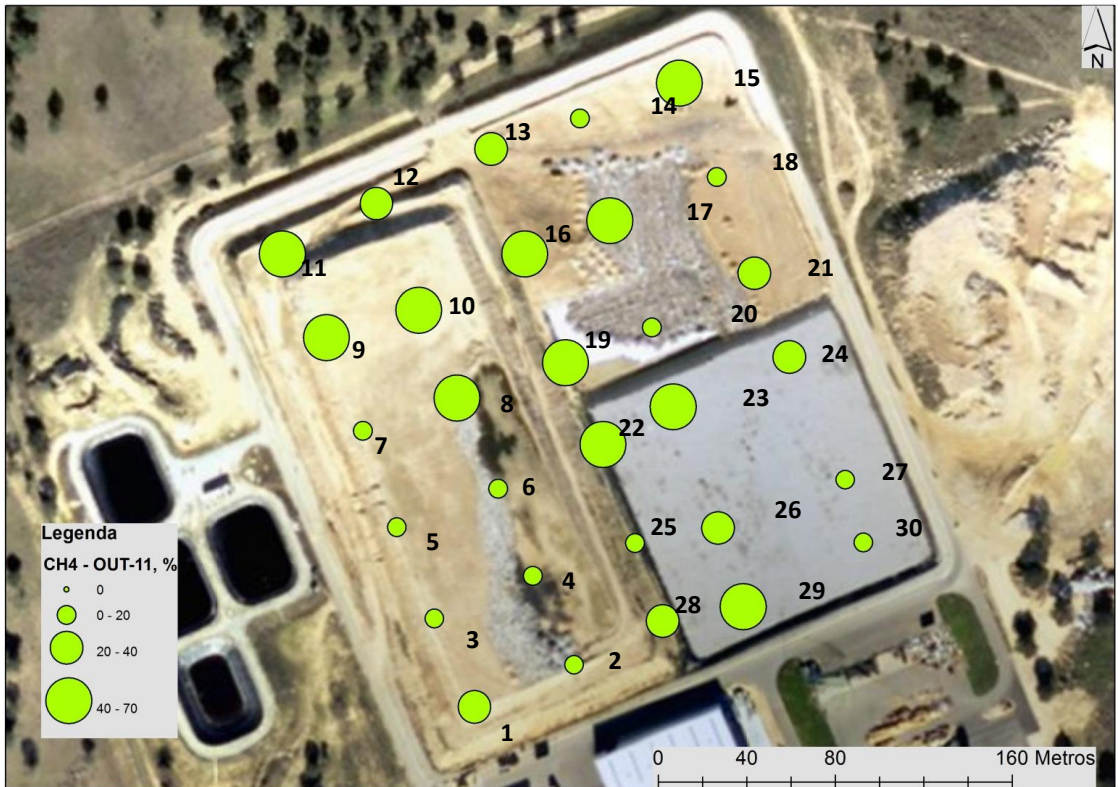


Figura 16. Produção de metano em Outubro de 2011



Figura 17. Produção de metano em Março de 2012

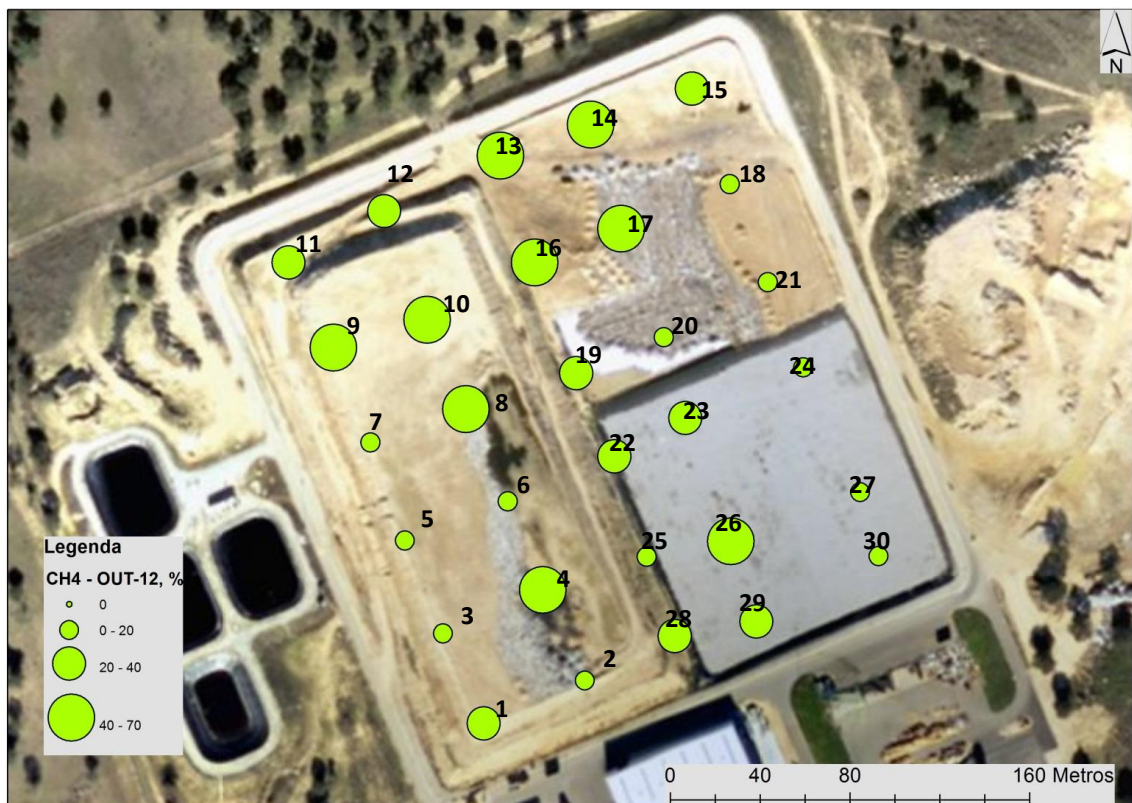


Figura 18. Produção de metano em Outubro de 2012

Os poços localizados na célula C, só começaram a ser produtivos a partir de Outubro de 2005, como se pode verificar na Figura 19. Contudo, é de referir que o poço 13 só começou a produzir metano em Março de 2007, situação visível na Figura 20, pois o mês anterior foi muito chuvoso, chegando a registar-se dois eventos com precipitações muito elevadas, nomeadamente 14.5 mm e 31.8 mm.

Já os poços da célula D começaram a ser produtivos em Março de 2007, como se pode ver na Figura 20, sendo de realçar que os poços 22 e 28 em Outubro de 2007 já apresentavam produtividades entre os 40% e os 70%, como que é visível na Figura 21. Nem todos os poços desta célula começaram a produzir ao mesmo tempo, sendo que o poço a iniciar produção mais tardiamente foi o poço 25, em Outubro de 2009 como é visível na Figura 22.

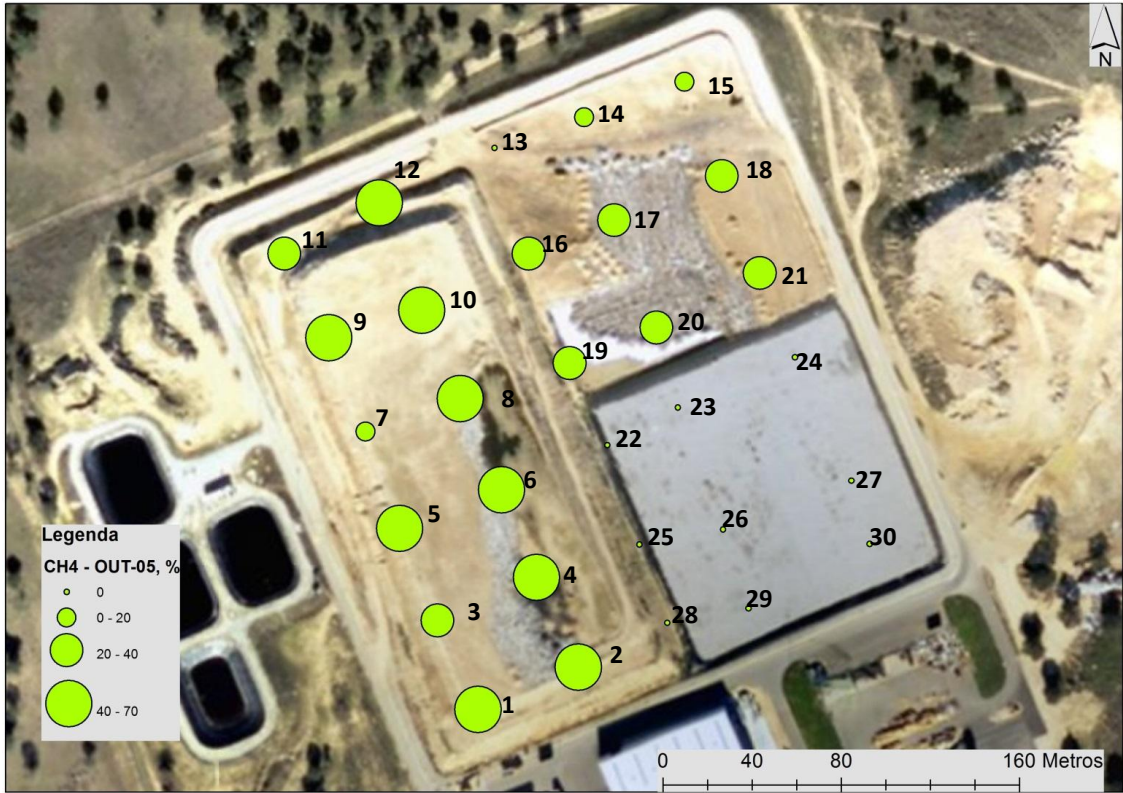


Figura 19. Produção de metano em Outubro de 2005

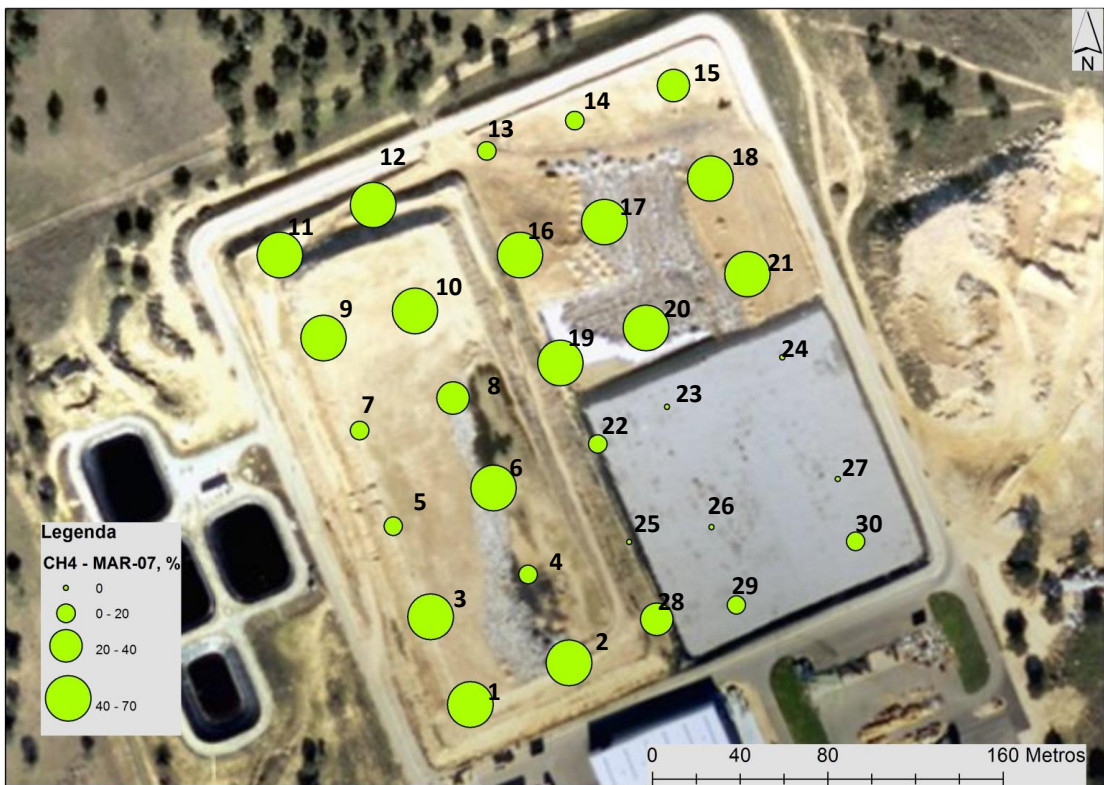


Figura 20. Produção de metano em Março de 2007

É também de realçar que o poço menos produtivo da célula D só começou a produzir após o mês anterior ter sido relativamente chuvoso e possuir dois eventos de precipitação elevados, nomeadamente, 24.1mm e 11.9mm. De acordo com Warith et al (2005) sendo que a precipitação propícia o transporte dos nutrientes e substrato pelo aterro, nos poços da célula D em que a produção de metano se iniciou mais tarde dos que nos envolventes, foi este o fator responsável pelo desenrolar da atividade das bactérias e consequentemente da produção de metano. Nos poços desta célula cuja produção de metano depende do transporte de nutrientes e do teor de humidade, nas alturas do ano em que o regime de precipitação é mais irregular e diminuto deve-se promover a manutenção de um teor de humidade constante, por exemplo através da recirculação do lixiviado e de forma constante, como referem Warith et al (2005) e Kelly (2002).

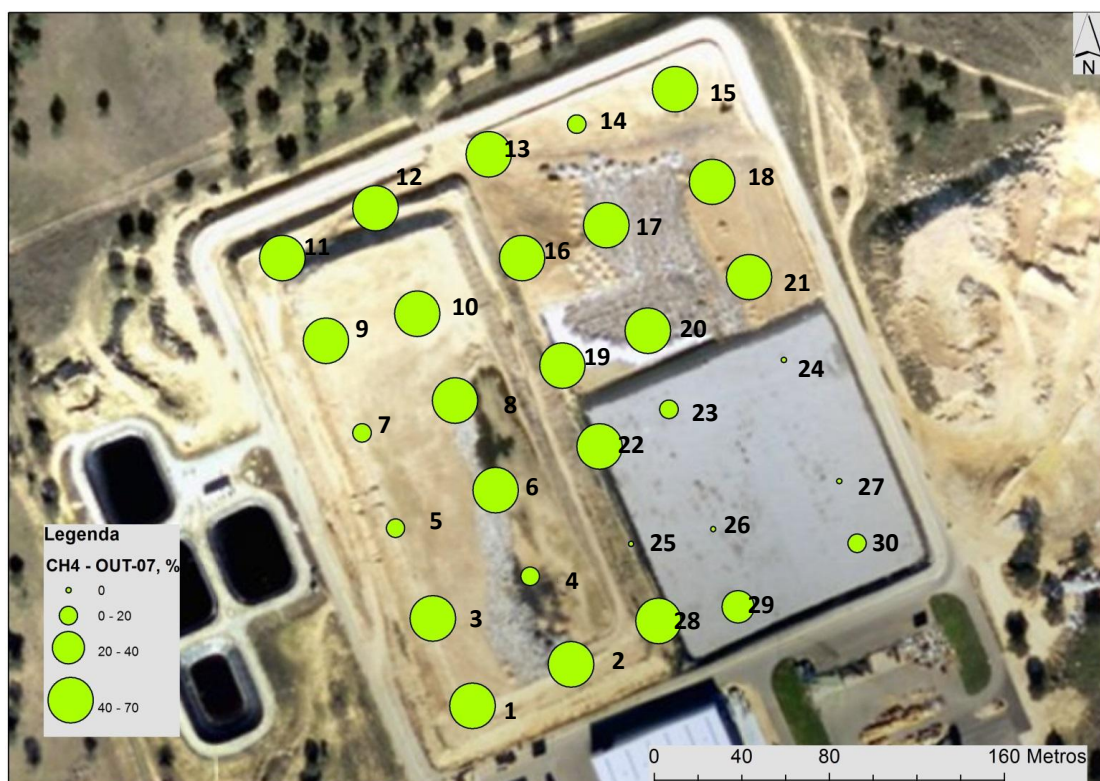


Figura 21. Produção de metano (%) em Outubro de 2007

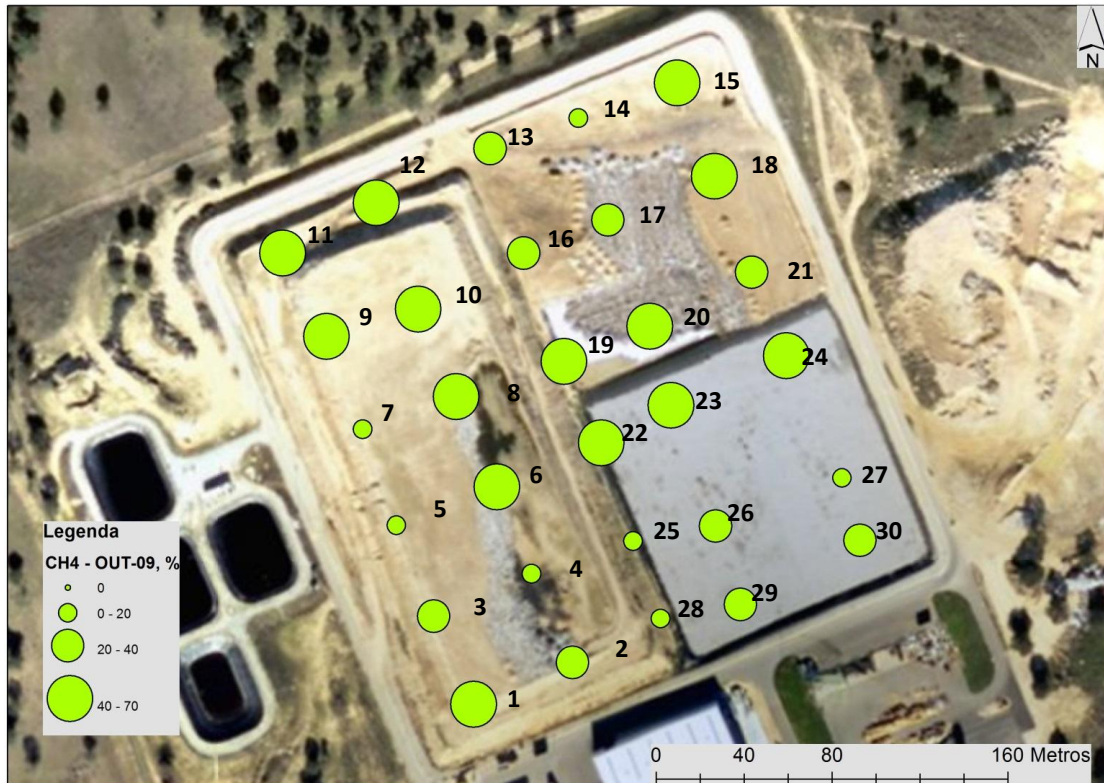


Figura 22. Produção de metano (%) em Outubro de 2009

Através da análise dos mapas verificou-se que a maioria dos poços apresenta produtividades elevadas e relativamente constantes, como se pode ver na Figura 23.

Porém verifica-se também nesta figura que os poços 25, 26, 27 localizados na célula D e os poços 3, 4, 5 na B e 7 localizado na célula A, apresentam produções de metano mais baixas possivelmente devido a funcionarem como ‘passagem’ pela qual o lixiviado existente no aterro segue em direção às lagoas de lixiviados localizadas junto às células A e B.

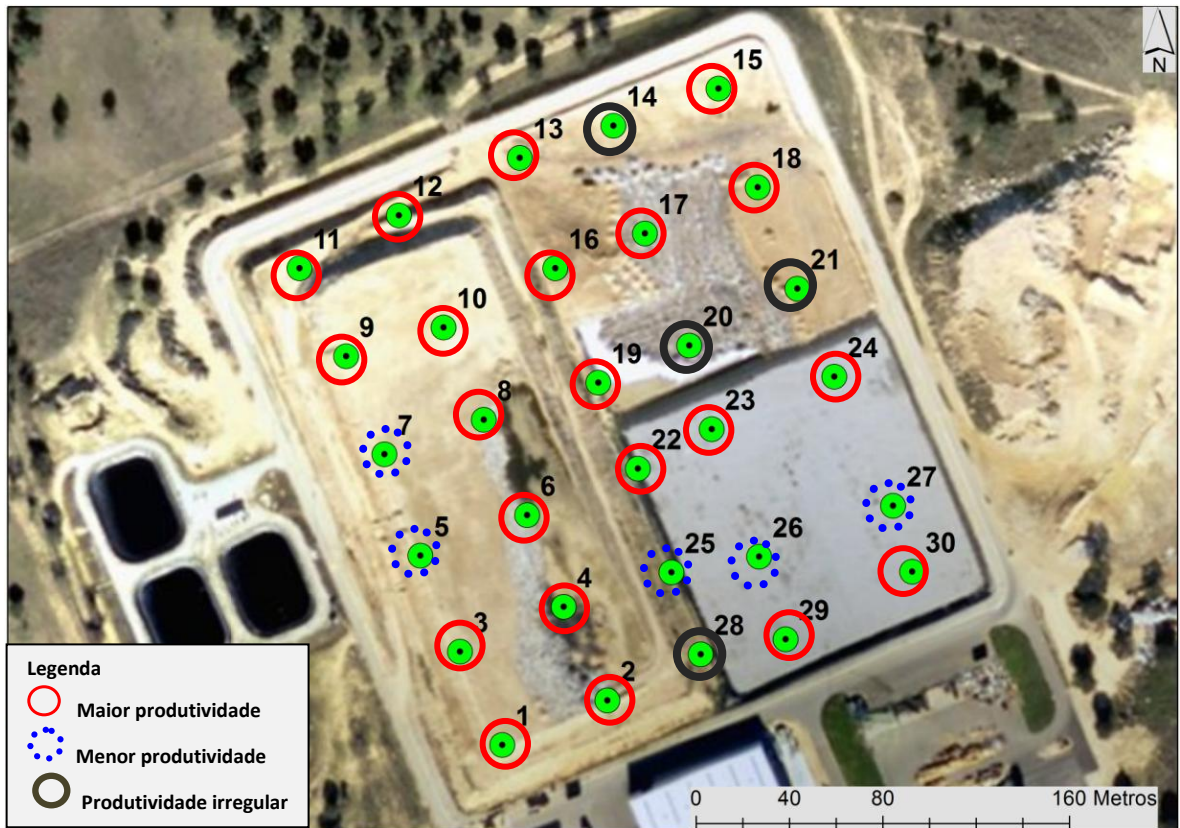


Figura 23. Localização dos poços consoante a produtividade em metano

3.5. Variação da produção de metano com a temperatura e precipitação

No estudo efetuado verificou-se que existem 2 tipos de poços, cuja produção de metano é sensível à temperatura (grupo 1) e os que não são sensíveis à temperatura (grupo 2). Na Tabela 13 estão identificados os poços que se incluem em cada grupo.

Tabela 13. Variação da produção de metano com a temperatura

Grupo	Número dos poços
1) A produção de metano é sensível à temperatura	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 18, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, e 30
2) A produção de metano não é sensível à temperatura	7, 10, 15, 16, 17, 19, 20, 21 e 25

Através da análise da Tabela 13 conclui-se que a maioria dos poços possui sensibilidade à temperatura registrada, pois estão incluídos no Grupo 1. Já na Figura 24 é possível verificar que é sobretudo nos poços mais periféricos e em alguns laterais que a produção de metano é mais sensível à temperatura. No interior do aterro apenas a produção do poço 22 é sensível à temperatura registrada, contudo as descidas de produção verificadas neste poço poderão dever-se à presença de lixiviado, a qual leva à diminuição da temperatura e consequentemente da produção. É também de realçar que dos poços periféricos ao aterro apenas o poço 7 não é sensível à temperatura.

As conclusões obtidas relativamente à temperatura corroboram em certa medida as obtidas no estudo de Hanson et al (2008) que verificou que num aterro sanitário as temperaturas mais elevadas verificam-se nos locais mais centrais, enquanto que as temperaturas mais baixas, as quais apresentam variações semelhantes às ocorridas à superfície do solo de acordo com a estação do ano, ocorrem na parte superior do aterro. Já nas partes mais profundas dos aterros a temperatura é relativamente constante independentemente da estação do ano e dos processos de degradação dos resíduos.

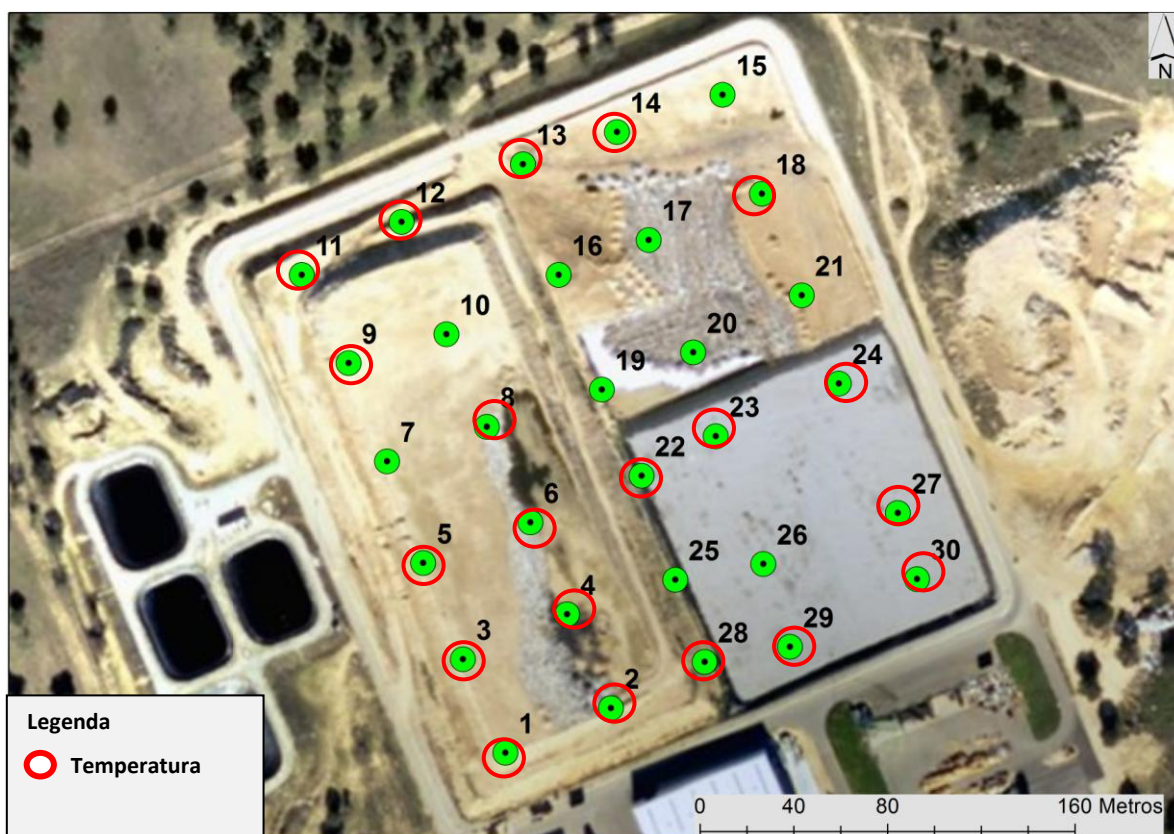


Figura 24. Imagem representativa dos poços cuja produção de metano é sensível à temperatura

Dobson (1964) e Ramaswamy (1970) (citados em Farquhar e Rovers, 1973) demonstraram que a produção máxima de metano ocorre entre os 30-35°C de temperatura dos resíduos, suportando desta forma o comportamento registado nos poços analisados. Contudo Gerardi (2003) refere que nos aterros sanitários, são as bactérias mesofílicas as principais responsáveis pela produção de biogás e por isso as temperaturas de 35°C são as ideais para a produção de metano, porém a temperatura não deve descer abaixo dos 32°C para que a produção de metano não desacelere.

Relativamente à sensibilidade da produção de metano à precipitação, no aterro sanitário de Évora existem três tipos de poços, os que são muito sensíveis (Grupo 1); os que possuem alguma sensibilidade (Grupo 2) e os que cuja produção é insensível à precipitação registada (Grupo 3). Na Tabela 14 estão identificados os poços que se incluem em cada grupo.

Tabela 14. Variação da produção de metano com a precipitação

Grupo	Número dos poços
i) A produção de metano é muito sensível à precipitação	18 e 21
ii) A produção de metano possui alguma sensibilidade em relação à precipitação	7, 9, 13, 15, 16, 20, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29 e 30
iii) A produção de metano é insensível à precipitação registada	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 11, 12, 14, 17, 19 e 25

Quanto à sensibilidade da produção de metano aos valores de precipitação registada, verifica-se na Tabela 14 que quase metade dos poços do aterro sanitário é sensível à precipitação, sendo que há poços com maior sensibilidade que outros, e uma outra metade que cuja produção não é sensível à precipitação.

Na Figura 25 é possível verificar que são sobretudo os poços localizados nas células C e D, cuja produção é sensível à precipitação. Também a produção de metano dos poços 7 e 9, localizados na célula B, são sensíveis à precipitação.

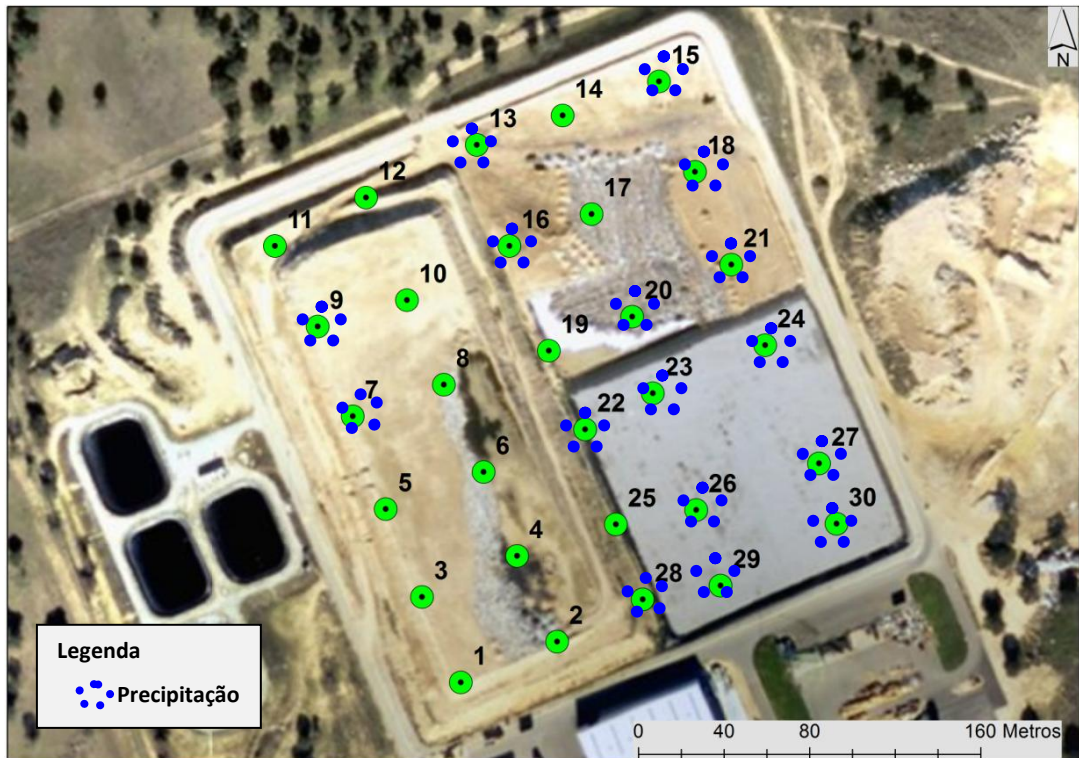


Figura 25. Imagem representativa dos poços cuja produção de metano é sensível à precipitação

Através da análise da Figura 26 verifica-se que no geral a produção de metano é influenciada pelas condições atmosféricas, neste caso pela temperatura e precipitação que foram os fatores analisados. Também é visível que apenas os poços 10, 17, 19 e 25 não apresentam sensibilidade aos fatores analisados neste estudo.

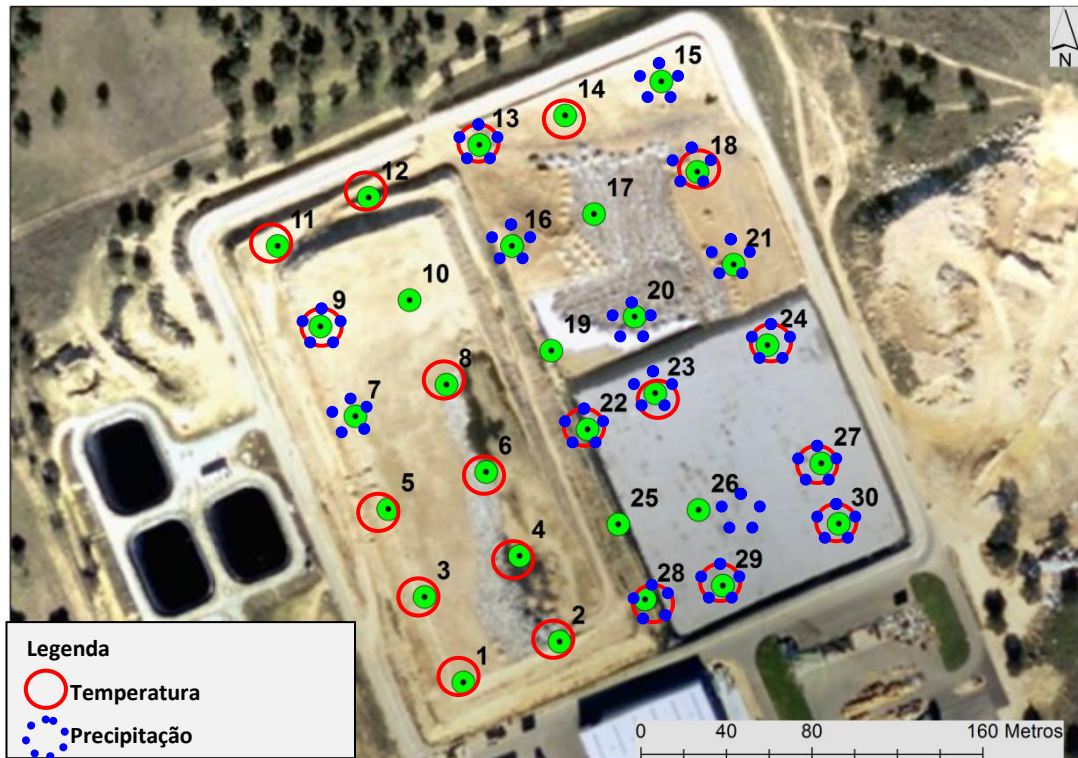


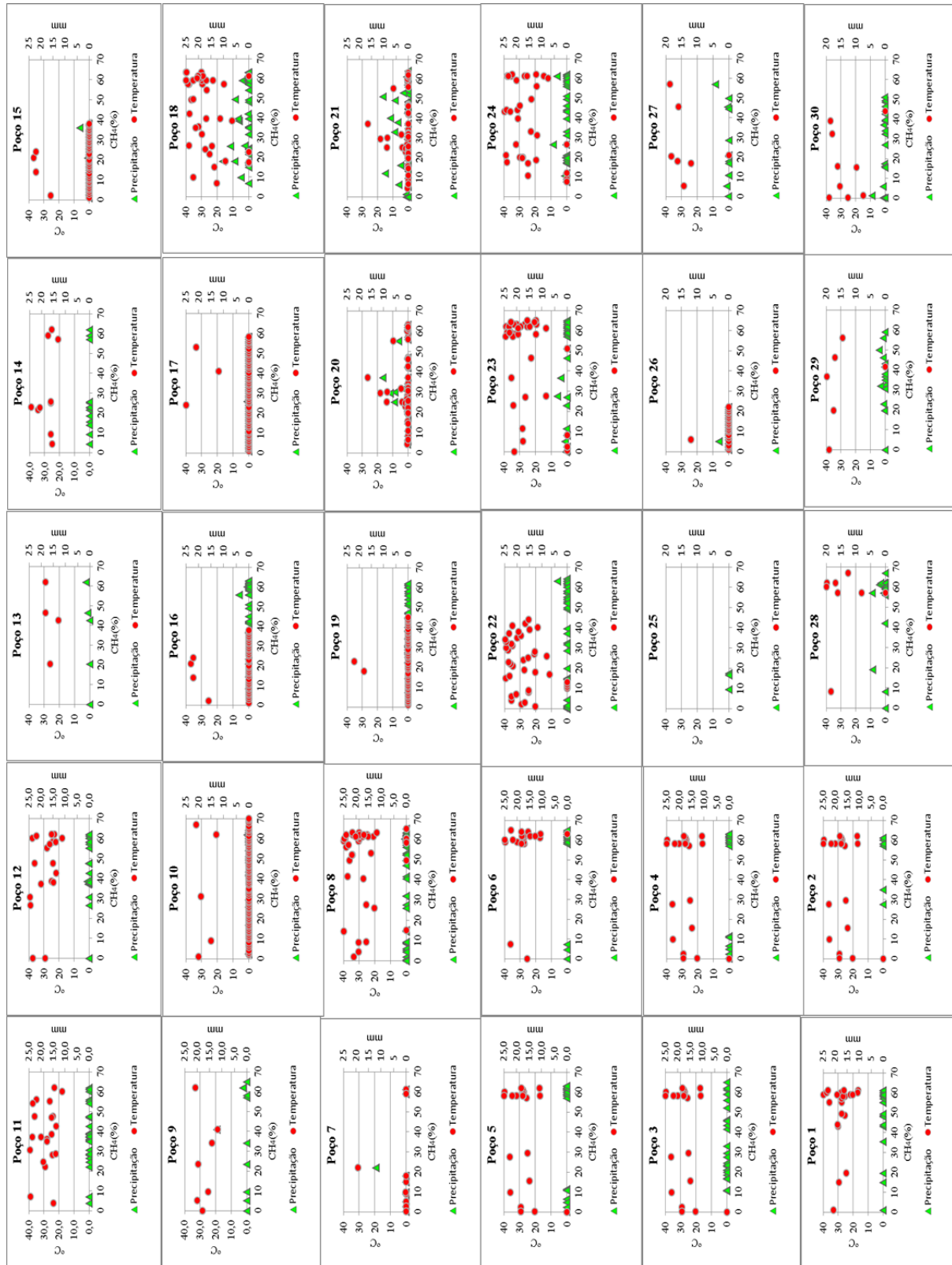
Figura 26. Localização dos poços cuja produção de metano é sensível à temperatura e precipitação

Na análise da Figura 26 também se verifica que existem poços cuja produção de metano é ao mesmo tempo sensível à temperatura e à precipitação, nomeadamente os poços 9; 13; 18; 23; 24; 28; 29 e 30.

O facto de na maioria dos poços a produção de metano ser sensível à temperatura e à precipitação permite inferir que possivelmente a produção verificada nos poços laterais e centrais é influenciada pela dinâmica dos poços circundantes.

Na Figura 27 verifica-se que as produções de metano mais elevadas, nos poços sensíveis às subidas de temperatura, registam-se quando a temperatura do ar ronda os 20° - 40°C.

Figura 27. Imagem representativa da distribuição dos poços no aterro sanitário de Évora e respetiva variação da produção de metano com os valores de temperatura (°c) e precipitação (mm).



Na Figura 27 também é visível que os poços mais produtivos como por exemplo o 3 e o 4, são os que apresentam maior sensibilidade à subida de temperatura, de acordo com Gerardi (2003) como foi referido na sub-capítulo 1.3 desta tese, a produção de metano e a temperatura estão intimamente relacionadas pois à medida que aumenta a temperatura no aterro maior é a taxa de destruição de sólidos voláteis. A temperatura é também diretamente proporcional à atividade enzimática das bactérias. Já os poços menos produtivos como por exemplo o 7 e o 25, são os que possuem produções de metano relativamente constantes independentemente da temperatura e precipitação registadas, como se verifica na Figura 27.

A produção de metano, como já foi referido anteriormente, não é constante no espaço e no tempo.

Do ponto de vista espacial o tipo de resíduos depositados, o grau de compactação, bem como o teor de humidade do mesmo pela dinâmica diferenciada dos lixiviados, não é uniforme, o que faz com que uns poços possam ser mais produtivos que outros, como se verifica nos mapas presentes no anexo I desta tese.

Do ponto de vista temporal a dinâmica da temperatura média do ar e a precipitação pareceram dois dos fatores que condicionam a produção de metano.

4. CONCLUSÃO

A gestão eficiente dos resíduos sólidos desempenha um papel importante na redução do impacto ambiental causado pela emissão de gases com efeito de estufa e consumo de combustíveis fósseis, através do aproveitamento do potencial energético do biogás.

Os aterros sanitários funcionam como reatores biológicos produzindo biogás, tal produção é normalmente variável no espaço e no tempo e nem sempre se ajusta aos modelos que estimam a produtividade de biogás, nomeadamente pela via da produção de metano.

O aterro sanitário de Évora possui uma potência nominal de 0.83 MW, a qual se encontra dentro da média das potências obtidas em aterros sanitários, tendo em conta a potência obtida devem ser instalados motogeradores com 850 kW para que se aproveite o potencial elétrico do biogás deste aterro sanitário, o que permitirá colmatar os períodos de menor produção de biogás. O aproveitamento da potência nominal do biogás produzido no aterro sanitário de Évora, que corresponde a cerca de 0,8 MW equivaleria à instalação de um aerogerador de grande potência (> 1MW) ou então de vinte aerogeradores de pequena potência (<40kW). No que se refere à energia solar o aproveitamento da potência do biogás produzido, este equivaleria à instalação de uma planta solar de cerca de 1 MW.

Num cenário em que a tarifa de venda do kWh do biogás e do kWh eólico fosse semelhante, nomeadamente 0.326€/kWh, o aproveitamento do biogás considerando a sua potência de 0.8 MW, seria mais proveitoso economicamente do que a instalação de um parque eólico com 20 aerogeradores com 40 kW em Évora, sendo que o espaço ocupado pelo aterro também é menor do que o necessário para a construção do parque. Contudo tendo em conta uma tarifa do kWh do biogás semelhante à do kWh solar, a construção de uma planta solar de potência ≤ 10 MW acarretaria mais custos do que o aproveitamento da potência do biogás produzido no aterro sanitário de Évora.

Já a energia disponível do aterro sanitário de Évora é 17.41 MWh, a produção de energia a partir do biogás produzido neste aterro poderá evitar a importação de 1559 de tep.

O aterro sanitário de Évora desde o início de atividade que possui uma elevada produtividade na produção de biogás, quase sempre de 50-60 m³/ano de metano. Contudo esta não é constante, neste estudo verificou-se que a nível temporal sobretudo a temperatura média do ar mas também a precipitação são um dos principais responsáveis pela variabilidade verificada. Já a variabilidade a nível espacial depende do tipo de resíduos depositados, grau de compactação e teor de humidade, resultante da dinâmica diferenciada dos lixiviados, não serem uniformes em todo o aterro, o que faz com que uns poços possam ser mais produtivos que outros. Tomando em consideração que existe uma grande variabilidade na produção de metano devido à temperatura e precipitação, nos casos em que se verifique uma menor produção devido à falta de humidade e à ocorrência de temperaturas baixas deve ser utilizada a recirculação do lixiviado para otimizar o transporte dos nutrientes e substratos e consequentemente a produção de metano.

No aterro em estudo é possível identificar o percurso preferencial dos lixiviados em direção à lagoa onde são tratados, pois nesse percurso os poços apresentavam baixas produtividades devido à lavagem dos nutrientes e substratos pelos lixiviados.

A variabilidade temporal da produtividade de metano no Aterro Sanitário de Évora coloca aos sistemas de aproveitamento de biogás, seja pela via térmica, seja pela via elétrica, problemas de estabilidade temporal da energia produzida, desta forma, os sistemas têm que estar preparados com sistemas alternativos por forma a compensar tais flutuações temporais do aterro. Este problema chama à atenção para a necessidade de cada aterro ter que desenvolver modelos de previsão da produção temporal de metano, por forma a anteciparem temporalmente tais variações de produtividade e consequentemente variações nos sistemas de aproveitamento energético sejam eles térmicos ou elétricos.

A implantação de um sistema de produção de energia num aterro possui um alto custo, porém, esta é uma solução que permite reduzir os problemas ambientais

provocados pela emissão de metano, um poderoso gás de efeito de estufa. Além do aproveitamento da energia produzida no aterro possuir vantagens a nível ambiental, este também apresenta uma enorme vantagem económica pois a energia produzida poderá ser consumida pelo próprio aterro e a excedente vendida para empresas privadas de energia e assim o retorno de todo o investimento poderá ser obtido rapidamente.

Para que se tenha uma melhor noção do efeito da temperatura e precipitação num aterro sanitário deverão ser feitas medições diárias e não apenas mensais. Com os resultados obtidos por exemplo, conseguir-se-á perceber quando deve ser utilizada a recirculação de lixiviado para manter elevadas as produtividades dos poços.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, I.R.F.S. (2008) Análise experimental do potencial de produção de biogás em resíduos sólidos urbanos. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Brasil. 118 pp.

AMBIRUMO (2012) Central de valorização energética do biogás do aterro sanitário da GESAMB. Memória descritiva e justificativa. 48 pp.

ATDR (2001) Landfill Gas Primer Department of Health and Human Services, Agency for Toxic Substances and Disease Registry Division of Health Assessment and Consultation. 74 pp.

Balat, M. & Balat, H. (2009) Biogas as a Renewable Energy Source— A Review. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effect*, 31(14) 1280-1293 pp.

Banco Mundial – Manual de recolha de biogás de aterro sanitário para produção de energia na América Latina e Caraíbas. ESMAP. 40 pp.

Barlaz, M. A., Ham, R. K., & Schaefer, D. M. (1989). Mass Balance Analysis of Decomposed Refuse in Laboratory Scale Lysimeters. *Journal of Environmental Engineering*, 115 (6), 1088–1102 pp.

Barlaz, M.A.; Eleazer, W.E.; Odle, W.S.; Qian, X.Y.; Wang, Y.S. (2004). Biodegradative Analysis of Municipal Solid Waste in Laboratory-Scale Landfills. EPA, 5 pp.

Bogner, J. & Spokas, K. (1993) Landfill CH₄: rates, fates, and role in global carbon cycle. *Chemosphere*, 26 (1–4), 369–386 pp.

Demirbas, A. (2006): Biogas Production from the Organic Fraction of Municipal Solid Waste, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effect, 28 (12), 1127-1134 pp.

Durão, R.; Pereira, M.J ; Costa, A.C.; Côrte-Real, J. M. & Soares, A. (2009) Indices of precipitation extremes in Southern Portugal – a geostatistical approach. Natural Hazards and Earth System Sciences, 9, 241-250 pp.

Durmusoglu, E., Corapcioglu, M., & Tuncay, K. (2005). Landfill Settlement with Decomposition and Gas Generation. Journal of Environmental Engineering, 131(9), 1311–1321 pp.

EL-Fadel, M.; Findikakis, A.N. and Leckie, J.O. (1997). Environmental impact of solid waste landfilling. Journal of Environmental Management, 50, 1-25 pp.

Farquhar, G.; Rovers, F.A. (1973) Gas production during refuse decomposition. Water, Air, and Soil Pollution, 2 (4), 483-495 pp.

Figueiredo, N. J. V. (2007) Utilização do biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica e iluminação a gás – estudo de caso. Tese de Licenciatura. Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Brasil. 90 pp.

Filho, L.F.B. (2005) Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos (Tese de Mestrado) Universidade Federal do Rio de Janeiro. Brasil. 203 pp.

Findikakis A.N. & Leckie J.O. (1979). Numerical Simulation of Gas Flow in Sanitary Landfills. Journal of Environmental Engineering Division, 105 (EE5) 927-944 pp.

Findikakis, A. N.; Papelis, C.; Halvadakis, C.P.; & Leckie, J.O. (1988) Modeling Gas Production in Managed Sanitary Landfills, Waste Management. and Research, 6, 115–123 pp.

Gerardi, M. H. (2003) *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. Wastewater Microbiology Series. Wiley-Interscience. New Jersey. Canada.

Gracino, M.C.S. (2010) *Caracterização dos aterros sanitários de Araçatuba e região e o potencial do aterro sanitário da cidade de Araçatuba para produção de biogás*. Tese de Licenciatura. Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, Brasil. 63 pp.

Ham, R. K.; Hekimian, K.K.; Katten, S.L.; Lockman, W. J.; Lofy, R. J.; McFaddin, D. E. & Daley, E.J. (1979) *Recovery Processing and Utilization of Gas from Sanitary Landfills*. EPA. 134 pp.

Hanson, J., Yeşiller, N., & Oettle, N. (2008) *Spatial and Temporal Temperature Distributions in Municipal Solid Waste Landfills*. *Journal of Environmental Engineering*, v136. SPECIAL ISSUE: Innovations in Solid Waste Engineering and Management: The 2008 Global Waste Management Symposium, 804–814 pp.

Kamalan, H., Sabour, M., Shariatmadari, N., (2011). *A review on available gas models*. *Journal of Environmental Science and Technology*, 4, 79 – 92 pp.

Kelly, R. J. (2002) *Solid Waste Biodegradation Enhancement and the Evaluation of Analytical Methods Used to Predict Waste Stability*. Tese de Mestrado. Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University. Virginia. 66 pp.

Klein, R., Baumann, T., Kahapka, E., & Niessner, R. (2001) *Temperature development in a modern municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash landfill with regard to sustainable waste management*. *Journal of Hazardous Materials*, 83 (3), 265-280 pp.

MAOTDR (2007). *Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos, 2007-2016 (PERSU II)*. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. Lisboa. 195 pp.

Maurice, C. & Lagerkvist, A. (2002) LFG emission measurement in cold climactic conditions: Seasonal variations and methane emissions mitigation. *Cold Regions Science and Technology*, 36, 37-46 pp.

Moran, M. J. & Shapiro, H. N. (2002) *Princípios da Termodinâmica para Engenharia*. 4ª edição, Editora LTC, Rio de Janeiro.

O'Leary, P. R.; Tchobanoglous, G (2002) Landfilling. In: *Handbook of solid waste management*. USA. McGraw-Hill.

Pecora, V.; Figueiredo, N. J.V.; Coelho, S.T. & Velásquez, S.M.S.G (2008) Potencial de produção de energia elétrica e iluminação a gás por meio o aproveitamento de biogás proveniente de aterro sanitário. 7º Congresso Internacional sobre Produção Distribuída e Energia no Meio Rural - AGRENER GD 2008, Fortaleza, CE, Brasil.

Reinhart, D.R., McCreanor, P.T., Townsend, T. (2002). The bioreactor landfill: iT status and future. *Waste Management & Research*,v 20 (2) 172–186 pp.

Scott, J.; Beydoun, D.; Amal, R.; Low, G; Cattle, J. (2007) Landfill Management, Leachate Generation and Leach Testing of Solid Wastes in Australia and Overseas., *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 35(3), 239-332 pp.

Teixeira, C. D. (2010) - Valorização energética do biogás produzido nos aterros sanitários de resíduos urbanos. Dissertação de mestrado. ISCTE – Instituto Universitário de Lisboa. Portugal. 94 pp.

Tchobanoglous, G.; Theisen, H.; Vinil, S. (1993) *Integrated Solid Waste Management*. Engineering principles and management issues. Irwin MacGraw Hill.

Vanzin, E. (2006). Procedimento para análise da viabilidade econômica do uso do biogás de aterros sanitários par geração de energia elétrica: aplicação no Aterro Santa Tecla. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo. Brasil. 91 pp.

Valencia, R., Zon, W., Woelders, van der H., Lubberding, H.J., Gijzen, H.J. (2009) The effect of hydraulic conditions on waste stabilization in bioreactor landfill simulators. *Bioresources. Technology*, 100, 1754 –1761 pp.

Verma, Shefali (2002) Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes. Tese de Mestrado. Columbia University. New York. 50 pp.

Warith, M. (2002) Bioreactor landfills: experimental and field result. *Waste Management*, 5, 40 –46 pp.

Warith, M., Li, X., & Jin, H. (2005) Bioreactor landfills: state-of-the-art review. *Emirates Journal for Engineering Research*, 10 (1), 1-14 pp.

Sites

Câmara Municipal de Évora (2013) Caracterização do concelho de Évora – Clima. <http://www.cmevora.pt/pt/conteudos/Concelho/Caracterizacao%20do%20concelho/Caracterizacao%20do%20Concelho.htm> (16/11/2012)

Diretiva Comunitária 1999/31/EC de 26 de Abril de 1999. http://europa.eu/legislation_summaries/environment/waste_management/121208_pt.htm (16/11/2012)

Government Engineering (2006) Landfill Design and Operation. <http://www.govengr.com/solidwaste.htm> (16/11/2012)

GESAMB (2013) SIRSU - Sistema intermunicipal de resíduos sólidos urbanos do distrito de Évora. <http://www.gesamb.pt/default.asp?SqlPage=sistema&CpContentId=28> (16/11/2012)

Hughes, K.L.;Christy, A.D.; Heimlich, J.E. (s.d.) Landfill Types and Liner Systems. Extension Fact Sheet. The Ohio State University.: <http://ohioline.osu.edu/cd-fact/pdf/0138.pdf> (20/11/2012)

INAG, I.P. 2008a. Tipologia de Rios em Portugal Continental no âmbito da implementação da Diretiva Quadro da Água.. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. Instituto da Água, I. P <http://dqa.inag.pt/> (20/11/2012)

Russo, M.A.T (2003) Tratamento de resíduos sólidos. Texto de Apoio. Universidade de Coimbra. <http://homepage.ufp.pt/madinis/RSol/Web/TARS.pdf> (20/11/2012)

Sarsby, R. (2000) Environmental geotechnics. http://books.google.pt/books?id=B0meWBhYfV0C&printsec=frontcover&hl=pt-PT&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (20/11/2012)

Souza, R. M.; Serra, J. C. V.; Junior, J. C. Z & Santos, D. R. R. (2009) Análise do potencial energético do biogás proveniente do aterro sanitário de palmas para produção de energia elétrica. http://www.revista.ajes.edu.br/arquivos/artigo_20110907160448.pdf (20/11/2012)

SWANA (1997) Final report - Comparison of models for predicting landfill methane recovery. The solid waste association of North America. <http://www.nrel.gov/docs/legosti/fy97/26041.pdf> (20/11/2012)

USEPA, (2008) Background information document for updating AP-42 section 2.4 for estimating emissions from municipal solid waste landfills. United States Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch02/bgdocs/b02s04.pdf> (20/11/2012)

U.S. EPA (2012) Bioreactors. <http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/landfill/bioreactors.htm> (20/11/2012)

VALNOR (2013) <http://www.valnor.pt> (20/11/2012)

Willumsen, H.C. (2001) Energy recovery from landfill gas in Denmark and worldwide. <http://www.lei.lt/Opet/pdf/Willumsen.pdf> (16/11/2012)