

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

**CONTRIBUIÇÃO PARA O DIMENSIONAMENTO
DE LEITOS DE SECAGEM DE LODO**

POR

AMILTON SALES DE MELO

**CAMPINA GRANDE – PB
SETEMBRO DE 2006**

Amilton Sales de Melo

**CONTRIBUIÇÃO PARA O DIMENSIONAMENTO
DE LEITOS DE SECAGEM DE LODO**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: **Recursos Hídricos**

Sub-área: **Engenharia Sanitária e Ambiental**

Orientadores:

Professor: **Adrianus C. van Haandel**

Professora: **Paula Frassinetti F. Cavalcanti**

Campina Grande – PB

Setembro de 2006



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

M528c Melo, Amilton Sales de
2006 Contribuição para o dimensionamento de leitos de secagem de lodo/ Amilton Sales de Melo. —Campina Grande, 2006.
74f.: il.

Referências.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

Orientadores: Adrianus C. van Haandel e Paula Frassinetti F. Cavalcanti.

1— Lodo- Leitos de Secagem 2— Desidratação do Lodo 3—Esgoto - tratamento 4— Modelagem Matemática – Secagem de Lodo I—Título

CDU 628.336.4

CONTRIBUIÇÃO PARA O DIMENSIONAMENTO DE LEITOS DE
SECAGEM DE LODO

AMILTON SALES DE MELO

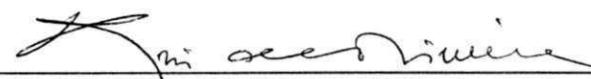
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 15 DE SETEMBRO DE 2006

COMISSÃO EXAMINADORA:

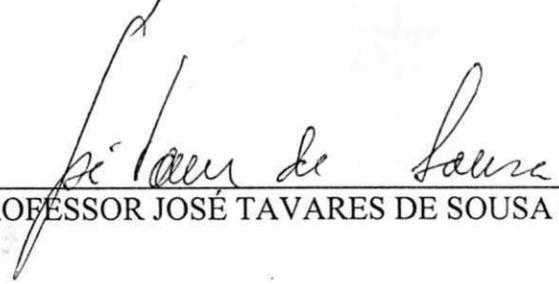


PROFESSOR ADRIANUS C VAN HAANDEL – M.Sc. Ph.D.

PROFESSORA PAULA FRASSINETTI FEITOSA CAVALCANTI – M.Sc. Dr^a.



PROFESSOR RUI DE OLIVEIRA – M.Sc. Ph.D.



PROFESSOR JOSÉ TAVARES DE SOUSA – M.Sc. Dr.

Campina Grande – PB
Setembro de 2006

AGRADECIMENTOS

A todos que participaram deste trabalho e me apoiaram nos momentos mais difíceis para a conclusão do mesmo. Especialmente aos orientadores, Professora Paula Frassinetti e Professor Adrianus van Haandel, e ao colega Eudes Alves, os quais foram indispensáveis para a realização e conclusão deste trabalho.

DEDICATÓRIA

Dedico aos saudosos:

Joaquim Isidoro de Melo

Pedro Clementino de Sales

RESUMO

Esta dissertação tratou de um estudo realizado sobre leito natural de secagem de lodo, com cargas atípicas, maiores que o recomendado pelas normas brasileiras ($15\text{kgSST}/\text{m}^2$), também se analisou a secagem do lodo pela insuflação ascendente de ar. A pesquisa relacionada à secagem natural foi executada com dois tipos de leitos, cobertos e descobertos, sujeitos as condições atmosféricas. A secagem artificial consistiu na insuflação de ar sobre uma camada de lodo, de forma ascendente, em leitos carregados com altura de até um metro de lodo úmido, que correspondeu a uma carga de $312\text{kgSST}/\text{m}^2$, obtendo-se uma evaporação de 250mm em 45 dias. No seu início se relata uma brevíssima história da evolução do destino final dos dejetos humanos, no seu encadeamento se apresenta uma revisão bibliográfica que consubstanciou os estudos físicos e atmosféricos abordados, os dados foram coletados no período de março a junho de 2005, na cidade de Campina Grande, onde se media diariamente a massa d'água evaporada ou incorporada nas amostras e a radiação era medida por um radiômetro conectado a um micro-computador que fornecia leitura a cada 5 minutos, usando estes materiais e aplicando os métodos por modelagem matemática que forneceram os resultados alcançados e as discussões. Em sua conclusão foi indicada a carga mais conveniente para secagem natural, em relação às condições climáticas do município de Campina Grande-PB.

Palavras chaves: Secagem de lodo, leitos de secagem, modelagem matemática.

ABSTRACT

This is a dissertation about a study of the behaviour of a natural drying bed for sludge, with atypical loads, larger than those recommended by the Brazilian norms ($15\text{kgSST}/\text{m}^2$). Sludge drying with upward insuflation of air was also investigated. The research about natural drying was carried out with two types of beds, covered and uncovered and, subject to atmospheric conditions. Artificial drying consisted in blowing air in upward direction through sludge beds loaded with up to one meter of humid sludge, corresponding to a load of $312\text{kgSST}/\text{m}^2$. Evaporation of a layer of 250 mm of water was obtained in 45 days. Initially the dissertation presents a very brief history of the evolution of the destination of human wastes. In its development a literature review is presented, in which the physical and atmospheric studies are reviewed. The data were collected over a period of march to june 2005, at Campina Grande, where the mass of evaporated from sludge samples as well as the solar radiation was measured by a radiometer connected to a micro-computador so that readings were taken every five minutes. These data were used and methods of mathematical modeling were applied to evaluate the obtained data. In its conclusion it was indicated which would be the optimal load to be applied on natural drying beds for the climatic conditions of Campina Grande-PB.

Key words: Sludge drying, drying beds, mathematical modeling.

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo geral	3
2.2 Objetivos específicos	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Esgoto e seu tratamento	4
3.1.1 Esgoto sanitário	5
3.1.2 Tratamento de esgoto	7
3.1.3 Tratamento anaeróbio em reator UASB	9
3.2 Lodo e seu tratamento	11
3.2.1 Tratamento de lodos	15
3.2.2 Leitões de secagem	17
3.3 Radiação solar	19
3.4 Calor	24
3.4.1 Calor específico e capacidade térmica	24
3.4.2 Calor sensível e calor latente	25
4. MATERIAL E MÉTODOS	26
4.1 Descrição dos experimentos	26
4.1.1 Leitões de secagem natural	27
4.1.2 Leitões de secagem forçada por ar comprimido	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5.1 Parâmetros meteorológicos para o ano de 2005 em Campina Grande	53
5.2 Modelagem matemática	56
5.3 Secagem por ar comprimido	63
6. CONCLUSÕES	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
ANEXOS	71

Amilton Sales de Melo

**CONTRIBUIÇÃO PARA O DIMENSIONAMENTO
DE LEITOS DE SECAGEM DE LODO**

Dissertação apresentada ao curso de
Mestrado em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Campina
Grande, como requisito para obtenção
do título de Mestre.

Área de Concentração: **Recursos Hídricos**

Sub-área: **Engenharia Sanitária e Ambiental**

Orientadores:

Professor: **Adrianus C. van Haandel**

Professora: **Paula Frassinetti F. Cavalcanti**

Campina Grande – PB

Setembro de 2006

1. INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo, desde que o homem se organizou e se urbanizou, apareceu o problema do destino final dos dejetos humanos. Os índios da América e os aborígenes da Austrália enterram seus dejetos. Na Roma antiga com a decadência do Império, o sistema de coleta dos esgotos deixou de funcionar e a população das cidades, em poucos anos, de 500000 habitantes baixou para 20000. Na Cidade do México, ao construírem a rede de esgoto, encontraram antigos coletores de esgotos construídos no tempo dos Astecas, que descarregavam nos canais da antiga cidade. Nas cidades da Europa, após a Idade Média, no combate a peste negra, foram construídos sistemas de coleta de esgotos unitários, o maior exemplo é o sistema de esgoto de Paris. Antigas galerias, construídas em alvenaria pelos padres jesuítas, foram encontradas recentemente em São Luiz do Maranhão.

Nos meados do Século XIX foi implantado o primeiro sistema de esgoto separador absoluto, nos Estados Unidos, onde os esgotos domésticos são aduzidos a um local, o destino final dos dejetos humanos estaria resolvido, bastaria fazer o tratamento do mesmo e lançar o efluente tratado numa corrente d'água qualquer, lagos ou no mar. Mas um dos resultados finais do tratamento de esgoto, o lodo, deve receber tratamento e seu destino final é problemático, devido possuir características indesejáveis e ofensivas ao meio ambiente. Antes dos movimentos ecológicos, este lodo era usado na agricultura em países da Europa, mas os metais pesados usados nos tratamentos ou do próprio esgoto contaminaram diversas propriedades na Bélgica e França.

Os esgotos domésticos são constituídos por 99,9% de água e 0,1% de partículas sólidas, as quais são removidas em sistema de tratamento de esgoto. Do total dos sólidos, 70% aproximadamente são matéria orgânica e os 30% restante são matéria inorgânica.

É da parte sólida que se origina o lodo, que é formado por matéria orgânica, mineral e água, suas características e composição podem variar muito, dependendo da origem e do processo de tratamento empregado, o qual influi na quantidade produzida deste lodo, uma vez que sua geração está ligada ao metabolismo das bactérias existentes na matéria orgânica e da temperatura ambiente.

A secagem natural depende de uma série de fatores, como a umidade inicial do lodo e fatores climatológicos, tais como radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do

ar, e precipitação, os quais, para este trabalho, foram fornecidos pelo Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande – DCA/UFCG, para o ano de 2005 na cidade de Campina Grande.

Inicialmente, para concatenar este trabalho, após a explicitação dos OBJETIVOS apresenta-se uma REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, onde são abordados conteúdos sobre: esgoto e seu tratamento, lodo e seu tratamento, dando enfoque ao tratamento anaeróbio tipo UASB – Upflow Anaerobic Sludge Blanket – que se traduz por digestor anaeróbio de fluxo ascendente de manta de lodo. Faz referência também a estudos de alguns fatores climatológicos, os quais foram utilizados para determinação de parâmetros importantes e essenciais, como a energia envolvida no processo de evaporação. Em seguida, apresenta-se o capítulo MATERIAL E MÉTODOS, onde se discrimina o material utilizado na pesquisa e a metodologia aplicada, tanto na descrição dos experimentos como para aquisição dos dados, que consubstanciaram o desenvolvimento do trabalho. No capítulo RESULTADOS E DISCUSSÕES estão apresentados os resultados obtidos, os quais são realçados por gráficos, tabelas e equações, desenvolvidas por modelagem matemática. Na CONCLUSÃO decide-se pela melhor produtividade para secagem natural de lodo, em função da radiação solar e da umidade inicial do lodo, para conseguir a umidade final desejada. Encontrando-se no ANEXO dados da radiação solar média diária ao longo do ano de 2005 em Campina Grande-PB.

Esta dissertação, denominada CONTRIBUIÇÃO PARA O DIMENSIONAMENTO DE LEITOS DE SECAGEM DE LODO, trata de uma pesquisa sobre secagem de lodo, por modelagem, onde foram simulados leitos de secagem, com cargas elevadas e distintas, com levantamento de curvas de evaporação e perfil da perda de umidade do lodo para carregamentos distintos em leitos cobertos e descobertos, expostos às condições atmosféricas. Estuda-se a secagem artificial através da passagem de ar sobre diferentes cargas de lodo. Sendo analisada também a influência de precipitações sobre os leitos de secagem.

Propõe-se uma modelagem matemática para o processo de secagem natural de lodo, tendo sido utilizado nos experimentos lodo já percolado, ou seja, com umidade inicial inferior a 80%, associando a perda de água do lodo com a radiação solar.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar o processo de secagem de lodo anaeróbio, proveniente de reator UASB, através de dois processos: evaporação em leitos de secagem natural e evaporação em leitos de secagem artificial provocada por uma fonte externa de energia, a passagem forçada de ar sobre uma camada de lodo. Tendo como finalidade a otimização do dimensionamento de leitos de secagem.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Acompanhar a perda diária de massa de água do lodo nos leitos, obtendo com isso a curva de evaporação para esses leitos.

Pesquisar fatores climatológicos que influenciam o processo de secagem, como: radiação solar, umidade relativa do ar, temperatura do ar e precipitações, em Campina Grande, no ano de 2005.

Levantar as curvas de perda da umidade do lodo para cinco cargas de sólidos distintas para leitos cobertos e descobertos, expostos às condições atmosféricas.

Avaliar a influência de precipitações na umidade do lodo, em leitos de secagem, para diferentes cargas e umidades distintas.

Analisar a influência da passagem ascendente de ar sobre uma camada de lodo, de modo a determinar a taxa de evaporação em torres de secagem.

Propor uma modelagem matemática que determina o tempo necessário para evaporação de uma determinada carga de lodo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Estudar o processo de secagem de lodo de esgotos, por meios naturais, ou seja, através da exposição do lodo às condições atmosféricas locais, requer inicialmente uma visão acerca da geração do lodo em estações de tratamento e da distribuição da radiação solar, fonte primária de energia, que será aproveitada pelo lodo, no processo de evaporação. O estudo empírico associa o calor emitido pelo Sol e o recebido pela superfície do lodo exposto, através da perda de massa, ocasionada pela evaporação da água, contida no lodo.

O lodo proveniente de estações de tratamento de esgotos (ETEs) tem umidade elevada (95% à 99%); após a percolação, próxima de 80%. Podendo ser inferior a 10%, dependendo das condições atmosféricas da região após um determinado período.

Inicialmente revisar-se-ão os aspectos referentes à produção e caracterização de esgotos, algumas formas de tratamento e geração de lodo e, em seguida, alguns conceitos relacionados à radiação solar devido à sua importância no processo de evaporação do lodo.

A evaporação da água contida no lodo ocasiona a perda de umidade, cessando quando o lodo atinge a menor umidade possível, chamada umidade de equilíbrio, que dependerá da natureza do lodo e das condições climáticas da localidade. O tempo necessário até o fim do processo de secagem dependerá da quantidade de água a ser evaporada, ou seja, de uma determinada energia para evaporação, de modo que quanto maior a área de exposição maior será essa energia.

3.1 Esgoto e seu tratamento

A falta de rede coletora de esgoto é um dos maiores problemas que o país enfrenta atualmente, acarretando numa série de doenças de veiculação hídrica tais como, a cólera, esquistossomose, paralisia infantil dentre outras. Sem rede coletora a população fica desprotegida de microrganismos patogênicos, que incluem vírus, bactérias, protozoários e nematóides. A falta de saneamento básico faz com que vidas sejam dizimadas por esses microrganismos, sendo esta a realidade brasileira. Doenças com malária e tuberculose provocam milhares de mortes todo ano, mostrando que a falta de saneamento básico pode ser considerada uma das maiores violências que vem enfrentando o povo brasileiro.

3.1.1 Esgoto sanitário

O esgoto sanitário é constituído por águas que foram utilizadas em banheiros, cozinhas, lavanderias, possuindo em sua composição fezes, urina, sabões, e restos de comida dentre outros compostos orgânicos e inorgânicos. Sua composição é aproximadamente 99,9% de água, e 0,1% de sólidos, que se compõem de proteínas, carboidratos, óleos e graxas, nutrientes como nitrogênio e fósforo, produtos químicos, defensivos agrícolas como os agrotóxicos e alguns metais pesados (Campos *et alii.*, 1999). Do total de sólidos encontrados nos esgotos cerca de 30% são de origem inorgânica, como metais, areia e sais e 70% de compostos orgânicos (Mara, 1976).

Quanto maior a concentração do esgoto mais pronunciado serão o odor e a turbidez. A concentração pode ser definida como “força do esgoto” que, dependendo da quantidade de matéria orgânica existente no esgoto este pode ser classificado em três níveis: fraco, médio, ou forte. Caso a DQO, parâmetro utilizado para indicar a presença de matéria orgânica, seja inferior a 250mg/l o esgoto é classificado como fraco, caso seja superior a 250mg/l e inferior a 1000mg/l é considerado médio, e se for superior a 1000mg/l é considerado forte (Metcalf & Eddy, 1991). A Tabela 3.1 contém a classificação de esgotos segundo a quantidade de matéria orgânica quantificada em termos de DQO e DBO₅.

Tabela 3.1 Classificação do esgoto doméstico em relação à matéria orgânica (mg/l)

Classificação	Parâmetro	
	DQO (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)
Fraco	250	110
Médio	500	220
Forte	1000	400

Fonte: Adaptado de Metcalf & Eddy (1991)

As principais características do esgoto são aquelas que conferem à água residuária, um aspecto indesejável, do ponto de vista físico, químico ou biológico (van Haandel & Lettinga, 1994). As características do esgoto podem retratar a realidade de comunidades, que diferem desde hábitos alimentares, produção *per capita* de esgoto e a concentração de

organismos patógenos, que servem como indicadores da qualidade de vida de determinada comunidade.

Os sólidos do esgoto são classificados de acordo com o tamanho de suas partículas e suas propriedades, podendo ser sedimentáveis ou dissolvidos. Na Figura 3.1 se vê a classificação e as frações dos sólidos que compõem o esgoto.

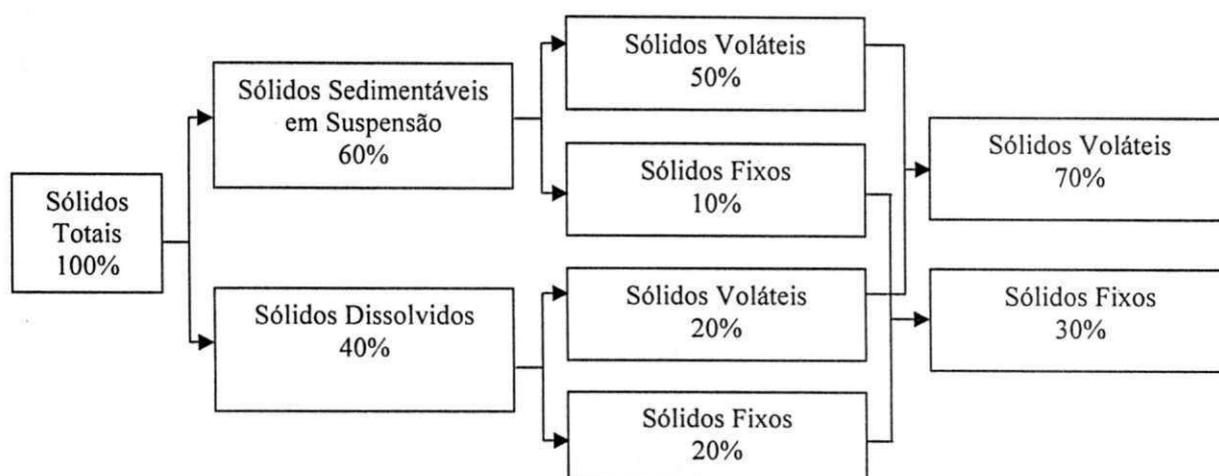


Figura 3.1 Composição dos sólidos nos esgotos (Jordão e Pessoa, 1982).

A Tabela 3.2 contém algumas características dos esgotos de dois bairros da cidade de Campina Grande-PB, sendo o bairro do Pedregal de classe social menos favorecida que o do Catolé. Pode-se perceber que a concentração de sólidos suspensos totais é maior no Pedregal, assim como também a matéria orgânica indicando, talvez, um menor consumo de água por aquela população, o que acarretaria em uma maior concentração, tanto de sólidos quanto de matéria orgânica.

Tabela 3.2 Composição de esgoto sanitário de dois bairros de Campina Grande

PARÂMETRO	Bairro	
	Pedregal ⁽¹⁾	Católé ⁽²⁾
SST (mg/l)	420	137
DQO (mg/l)	727	564
DBO ₅ (mg/l)	369	91

Fonte: Adaptado de Bezerra (1998)

(1) van Haandel & Lettinga, (1994), (2) Nascimento (1996) e Filho (2000).

Para se determinar a fração sólida que é sedimentável do esgoto, ou seja, a parte que pode ser removida por sedimentação nos decantadores primários (Pessoa e Jordão, 1982) é realizado um teste de sedimentabilidade simples, que consta da adição de 1 litro do esgoto em recipiente apropriado (Cone de Imhoff), o qual tem uma graduação que indica a concentração de sólidos que sedimentaram após o período de 1 hora, segundo técnicas padronizadas pelo Standard Methods (1995). Os sólidos ainda podem ser classificados de acordo com o tamanho das partículas podendo ser: (a) dissolvido, (b) coloidal e (c) particulado, sendo os sólidos em suspensão formados pelas duas últimas categorias (van Haandel & Lettinga, 1994).

3.1.2 Tratamento de esgoto

A construção de coletores permite o transporte dos despejos perigosos e nocivos da vizinhança das habitações, mas quando o esgoto não recebe tratamento se torna uma ameaça para o meio ambiente, poluindo assim os mananciais de água, devendo ser resolvido o problema de seu tratamento e destino, tanto da fase líquida, como da fase sólida. A qualidade do efluente líquido de ETEs deve obedecer aos limites de lançamentos estabelecidos para alguns parâmetros, que dependerá principalmente da classe do corpo receptor e a consequência do lançamento, de modo que cada rio comporta uma determinada carga orgânica.

O tratamento do esgoto pode ser realizado através de processos físicos, químicos ou biológicos. No tratamento preliminar os processos que predominam são os físicos, gradeamento e sedimentação. O tratamento primário visa, principalmente, a remoção de parte da matéria orgânica e dos sólidos sedimentáveis. O tratamento secundário remove matéria orgânica e eventualmente nutrientes (fósforo e nitrogênio), predominando os processos biológicos. Enquanto que o tratamento terciário objetiva a remoção de poluentes específicos (usualmente tóxicos ou compostos não biodegradáveis) e nutrientes que não foram removidos no tratamento secundário.

No processo de digestão anaeróbia de águas residuárias as bactérias são responsáveis pela transformação da matéria orgânica em compostos mais reduzidos, como o gás metano e o gás carbônico, através do catabolismo fermentativo (van Haandel & Lettinga, 1994).

A Figura 3.2 indica a seqüência das reações de fermentação da matéria orgânica presente em esgotos domésticos e os produtos resultantes em cada etapa da digestão anaeróbia.

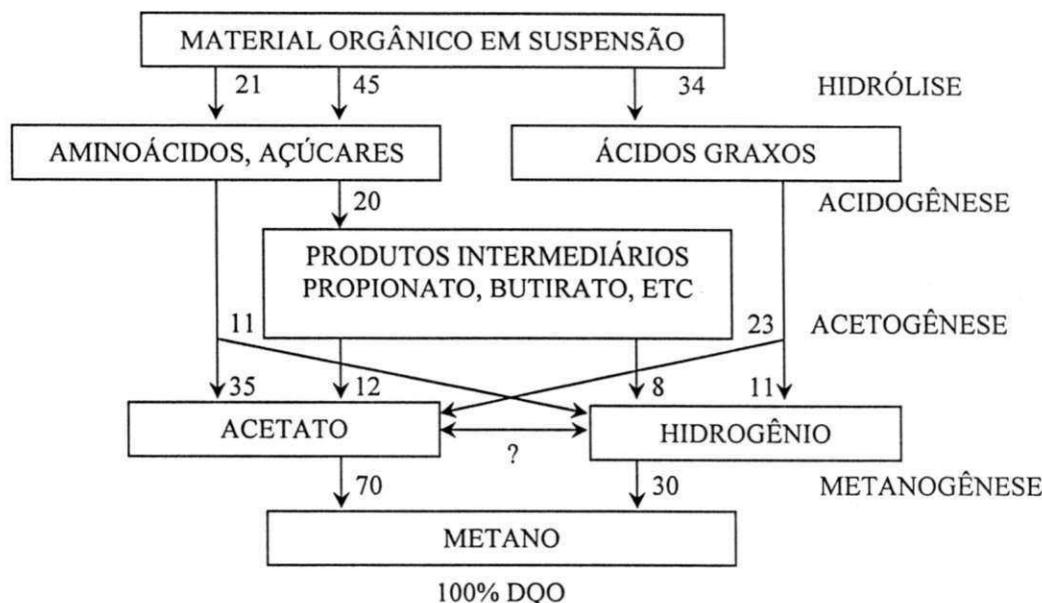


Figura 3.2 Representação esquemática da decomposição de lodo através da digestão anaeróbia (os números referem-se a porcentagens de DQO).

Fonte: Gujer e Zehnder (1983)

A hidrólise é o processo pelo qual o material orgânico particulado é convertido em compostos dissolvidos de menor peso molecular e complexidade, pelo efeito de enzimas extracelulares produzidas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas (van Haandel & Lettinga, 1994). A hidrólise pode ser ainda o processo limitante para a digestão anaeróbia. Segundo O'Rourke (1968) a temperatura do esgoto é um fator extremamente importante para que haja um bom desempenho do processo de hidrólise, de modo que temperaturas inferiores a 20°C tornam a taxa de conversão da matéria orgânica baixa, para todo o processo de digestão anaeróbia. A hidrólise é um processo lento e normalmente limita a taxa de digestão anaeróbia (van Haandel & Marais, 1999).

Na acidogênese os produtos resultantes da hidrólise são absorvidos pelas bactérias denominadas acidogênicas que são excretados como compostos mais simples como: os ácidos graxos voláteis (AGV), álcoois e ácido láctico, e compostos minerais como: gás carbônico (CO₂), hidrogênio (H₂), amônia (NH₃) e gás sulfídrico (H₂S). Dentre os ácidos graxos o acético, o butírico e o propiônico são definidos por voláteis (Sawyer *et alii.*, 1994).

A acetogênese é o processo pelo qual os produtos da acidogênese são convertidos em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono pelo grupo de bactérias denominadas acetogênicas (van Haandel & Marais, 1999).

Na etapa final da digestão anaeróbia - a metanogênese - bactérias denominadas metanogênicas convertem os produtos da fermentação ácida em produtos gasosos estáveis que se desprendem da fase líquida: metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂). As bactérias que utilizam o acetato são chamadas acetoclásticas, e são responsáveis por cerca de 70% da produção de metano e as que utilizam hidrogênio são chamadas hidrogenotróficas sendo responsáveis pelos 30% restantes (van Haandel & Lettinga, 1994). O metano é produzido através das seguintes reações catabólicas:

(a) metanogênese acetotrófica:



(b) metanogênese hidrogenotrófica:



Para que haja um bom funcionamento do sistema, é necessário que a taxa de remoção de ácidos voláteis através da metanogênese acompanhe a produção dos mesmos, caso contrário pode surgir uma situação de instabilidade, ocorrendo uma diminuição do pH, provocando assim o chamado “azedamento” impedindo assim a geração do metano, que é produzido na faixa de pH entre 6,3 e 7,8, condição necessária ao equilíbrio das populações bacterianas (van Haandel & Lettinga, 1994).

3.1.3 Tratamento Anaeróbio em reator UASB

O reator UASB (up flow anaerobic sludge bed) foi desenvolvido na década de 70 na Holanda. recebendo no Brasil a denominação de DAFA - Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente. O reator é provido de separador de fases, que possibilita a separação das fases gasosa (biogás), sólida e líquida (o efluente). A passagem do esgoto a ser tratado se faz de forma ascendente, passando inicialmente por uma camada de lodo, chamada zona de digestão, depois por uma zona de transição e por fim a zona de sedimentação onde é descarregado o efluente. A Figura 3.3 mostra a representação desse reator, podendo ser visualizados seus principais dispositivos e as diferentes zonas que o constituem.

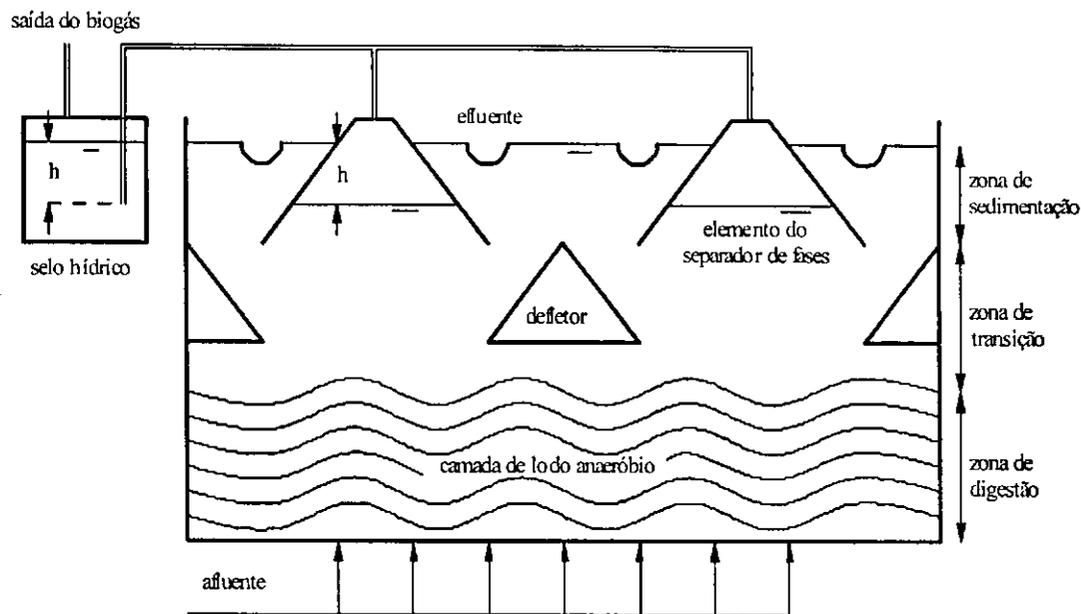


Figura 3.3 Representação esquemática de um reator tipo UASB

No interior do reator as bolhas de gases que se formam, sobem verticalmente, encontrando os defletores, que são responsáveis pelo seu direcionamento até o separador de fases. Entre os separadores de fases existem defletores, que são responsáveis por desviarem o biogás, que tem a pressão de saída controlada por selo hidráulico (van Haandel & Lettinga, 1994).

A eficiência do tratamento dependerá basicamente da temperatura e do tempo de permanência hidráulica. Resultados experimentais mostram que para temperaturas superiores a 20 °C a eficiência da remoção de matéria orgânica em termos de DQO pode ser expressa como:

$$E = 1 - 0,68(Tp)^{-0,68} \quad (3.3)$$

onde E representa a eficiência da remoção de DQO, em termos percentuais, em relação ao tempo de permanência - Tp, expresso em horas.

Para tempo de permanência de 6 horas a remoção de matéria orgânica é próxima de 80%, mostrando assim alta eficiência, com pequeno tempo de permanência. No entanto, para temperaturas mais baixas (10 a 18 °C), o tempo de permanência deve ser aumentado

assumindo valores entre 12 e 14 horas (De Man, 1990, Van Der Last, 1991 apud van Haandel & Lettinga, 1994).

Dentre os critérios de dimensionamento de um reator UASB o principal parâmetro é o tempo de permanência do líquido, que definirá o volume do reator, dependendo da carga hidráulica, da seguinte forma:

$$V_r = Q_a \cdot T_p \quad (3.4)$$

onde, V_r representa o volume do reator (m^3), para Q_a : vazão afluyente (m^3/h) e T_p : tempo de permanência (horas).

Outro fator importante é a altura do reator, que determinará a área, conseqüentemente a velocidade ascendente do líquido no reator, que não pode exceder 1m/h. Estes reatores possuem altura entre 4 e 6m (van Haandel & Lettinga, 1994).

Os formatos básicos destes reatores são apresentados na Figura 3.4, podendo os mesmos ainda possuir formato circular ou quadrado.

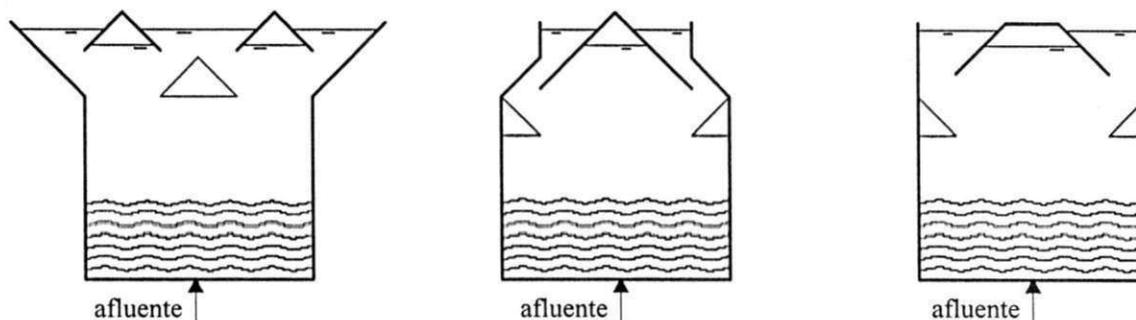


Figura 3.4 Formas básicas para reatores UASB

3.2 Lodo e seu tratamento

O lodo resultante de processos de tratamento de esgotos é constituído basicamente de sólidos: matéria orgânica (sólidos voláteis) e minerais (sólidos fixos), e água. Suas propriedades e composições dependerão do esgoto de origem e da forma pelo qual o mesmo foi tratado. A parte sólida deve ainda ser tratada para destinação final em aterros sanitários ou na agricultura.

A água presente no lodo pode ser dividida em quatro classes distintas, de acordo com a facilidade de separação de fases (van Haandel & Lettinga, 1994):

1. Água livre que pode ser removida por gravidade (adensamento, flotação);
2. Água absorvida que pode ser removida por forças mecânicas ou pelo uso de flocculante;
3. Água capilar que se mantém adsorvida à fase sólida por força capilar, distingue-se da adsorvida pela necessidade de uma força maior para sua separação;
4. Água celular. Que é parte da fase sólida e só pode ser removida através de mudança no estado de agregação da água, através de congelamento ou evaporação.

A parte sólida do lodo pode ser classificada segundo o tamanho e a fração orgânica. Em relação ao tamanho das partículas é representada pelos sólidos em suspensão e sólidos dissolvidos. Em relação à matéria orgânica, os sólidos dividem-se em fixos ou inorgânicos (SF) e sólidos voláteis ou orgânicos (SV)(Andrioli *et al.*, 2001). A distribuição dos sólidos no lodo é representada pela Figura 3.5.

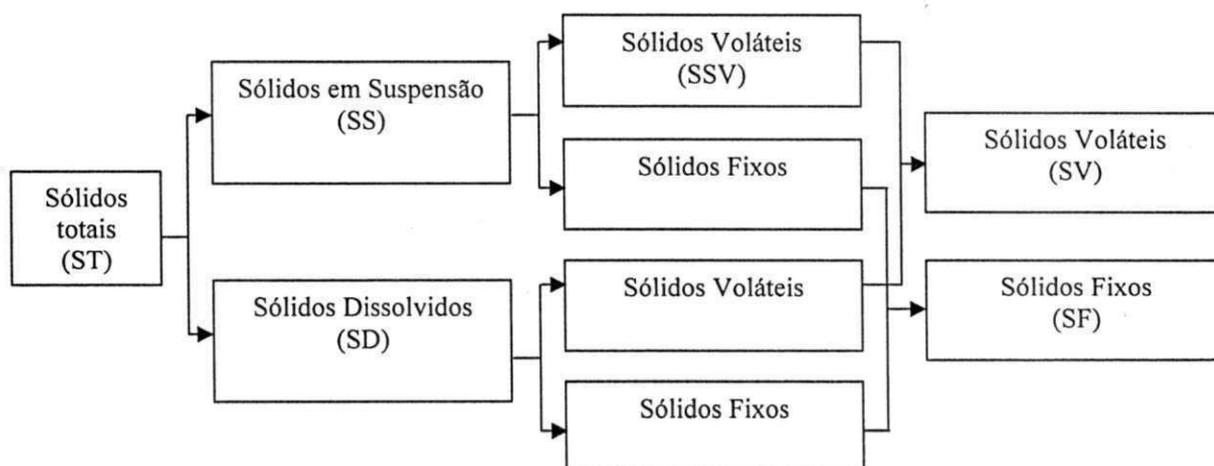


Figura 3.5 Distribuição dos sólidos do lodo segundo o tamanho e a fração orgânica.

Fonte: Andreoli *et al.*(2001)

A relação entre os sólidos voláteis e os sólidos totais indica a fração orgânica dos sólidos do lodo, e o nível de digestão no lodo. A fração volátil do lodo digerido (SV/ST) situa-se entre 0,60 e 0,65, enquanto lodos não digeridos apresentam valores de SV/ST entre 0,75 e 0,80 (Andrioli *et al.*, 2001).

A relação entre o teor de sólidos secos e a umidade em um lodo se dá da seguinte forma:

$$\text{Umidade (\%)} = 100 - \text{Sólidos secos (\%)} \quad (3.3)$$

Uma massa de lodo com umidade de 80% possui teor de sólidos de 20%. Assim, em cada 100kg de lodo úmido, 80kg são de água e 20kg são de sólidos. Quando disposta em uma área de 1m^2 , corresponderá a uma carga de 20kgSST/m^2 .

Supondo que a massa de sólidos não varie durante a evaporação, é possível determinar a umidade do lodo, basta dividir a massa de água nas amostras de lodo pelo peso total.

$$U = Ma/(Ms+Ma) = (Mt-Ms)/Mt \quad (3.4)$$

sendo:

U: umidade do lodo;

Mt: massa total de lodo úmido (kg);

Ma: massa de água no lodo (kg);

Ms: massa dos sólidos do lodo (kg).

A umidade influi nas propriedades mecânicas do lodo, influenciando no manuseio e na disposição final do mesmo. A relação entre a umidade e as propriedades mecânicas que caracterizam o lodo quanto à sua consistência pode ser vista na Figura 3.6.

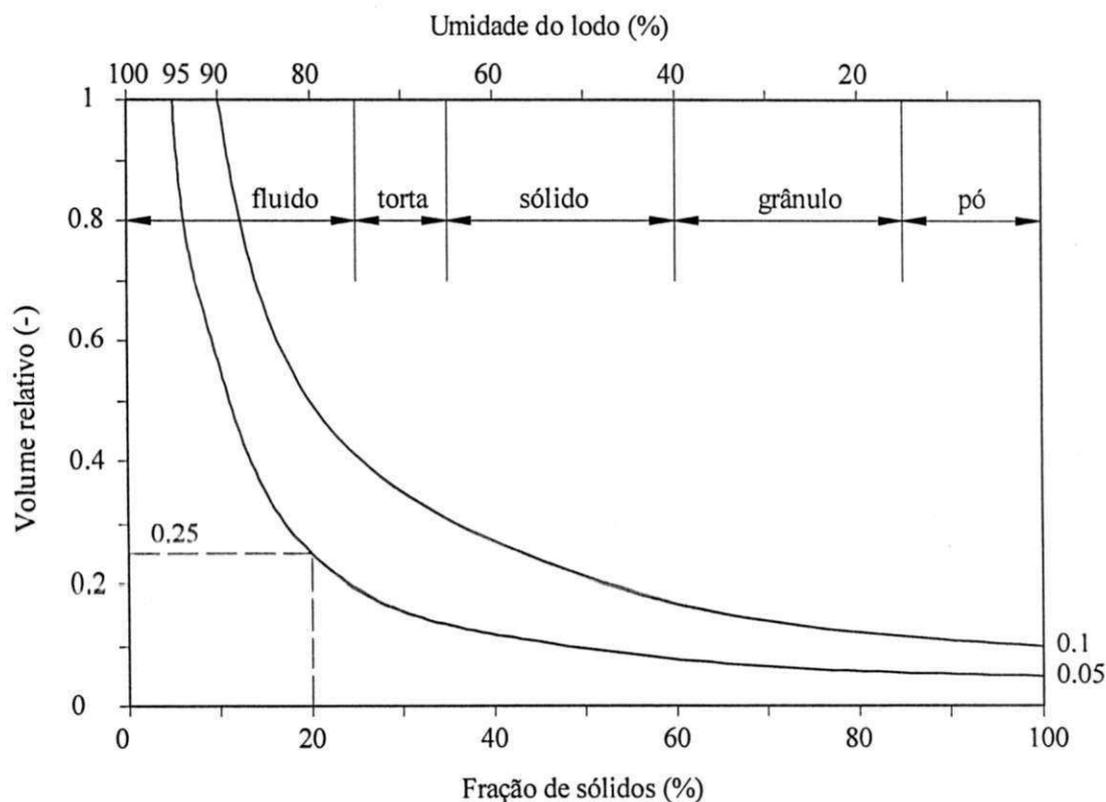


Figura 3.6 Relação entre o volume de lodo e sua umidade ou fração de sólidos.

Fonte: van Haandel & Lettinga (1994).

Na medida em que a percentagem de água do lodo diminui, o lodo se torna pastoso, perdendo a característica de um fluido, tornando-se uma torta semi-sólida, quando a umidade está entre 65% e 75%, obtendo consistência sólida para umidade abaixo de 65% e sendo considerado um sólido duro quando a umidade é inferior a 40%. Caso a umidade do lodo seja inferior a 15%, o mesmo tende a se desintegrar, formando um pó fino. Conforme Figura 3.6 o lodo pode ter seu volume final reduzido a 10% do seu volume inicial, mostrando assim a vantagem da secagem.

Os sólidos estabilizados em reatores anaeróbios podem ser utilizados como fertilizantes na agricultura, podendo ter outro destino final com incineração, compostagem e aterro sanitário (van Haandel & Lettinga, 1994). Ao lodo proveniente de estações de tratamento de esgotos sanitários que possuem características benéficas ao uso agrícola é designado o termo biossólido (Tsutiya, 2001). Segundo a Water Environment Federation – WEF (1996) o termo biossólido deve ser utilizado para designar os produtos orgânicos gerados nos tratamentos de esgotos, devidamente estabilizados, que podem ser reutilizados de forma benéfica, enquanto o termo lodo é dado aos sólidos que não foram adequadamente estabilizados, gerando riscos a sua utilização.

Dependendo da composição do esgoto e das condições operacionais (tempo de permanência hidráulico e temperatura) a produção de lodo num reator UASB tipicamente está na faixa de 0,1 a 0,2kg SST/kgDQO (van Haandel & Lettinga), enquanto em sistemas de lodo ativado a concentração típica é de 50g por dia por habitante. Na Tabela 3.3 encontram-se valores de produção de lodo segundo o processo de tratamento.

Tabela 3.3 Produção de lodo em ETEs

PROCESSO DE TRATAMENTO	PRODUÇÃO DE LODO (gSST/hab.dia)
Lodo ativado convencional	35 – 40
Reator UASB	15 – 20
Lagoa aerada	15 – 25
Filtro biológico	35 – 40
Lodo ativado sem digestão	65 – 70

Fonte: Adaptado de Além Sobrinho (2001)

A produção de lodo em ETEs pode também ser estimada por sua concentração, que dependerá do processo de tratamento. A Tabela 3.4 apresenta a densidade e a concentração de sólidos no lodo para variados processos de tratamento.

Tabela 3.4 Produção típica de lodo para vários processos de tratamento

PROCESSO DE TRATAMENTO	DENSIDADE DO LODO	SÓLIDOS SECOS (kg/m ³)	
		FAIXA	VALOR TÍPICO
Decantação primária	1,02	0,106 – 0,165	0,147
Lodo ativado	1,005	0,070 – 0,094	0,082
Filtro biológico	1,025	0,060 – 0,094	0,070
Aeração prolongada	1,015	0,082 – 0,118	0,094
Lagoa aerada	1,01	0,082 – 0,118	0,094

Fonte: Adaptado de Metcalf & Eddy (1991).

3.2.1 Tratamento de lodos

Os processos de tratamento de esgoto concentram, no lodo, a maior carga de microrganismos contidos inicialmente no afluente. Os microrganismos patogênicos que podem ser encontrados no lodo são representados nos cinco grupos: (a) helmintos, (b) protozoários, (c) fungos, (d) vírus e (e) bactérias (Andreoli *et al.*, 2001). A Tabela 3.5 mostra alguns dos principais parasitos encontrados no lodo, e os sintomas que podem causar no homem.

Tabela 3.5 Alguns microrganismos encontrados no lodo e doenças causadas no homem

PARASITO	PRINCIPAIS SINTOMAS
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Distúrbios digestivos, vômitos e dor abdominal
<i>Ancylostoma duodenale</i>	Anemia, emagrecimento
<i>Taenia solium</i>	Distúrbios digestivos e nervosos, irritação, dor abdominal, anorexia e emagrecimento
<i>Taenia saginata</i>	Distúrbios digestivos, insônia, anorexia, dor abdominal e emagrecimento
<i>Entamoeba histolytica</i>	Enterite aguda
<i>Giardia lamblia</i>	Diarréia, perda de peso

Fonte: Adaptado de Thomaz-Socool *et alii.* (2000)

O tratamento do lodo é tão importante como o tratamento do esgoto, tendo em vista a presença de microrganismos patógenos. A Dose Infectiva Mínima – DMI para ovos de helmintos e cistos de protozoários, segundo a OMS (1989) é de apenas um ovo ou cisto. Dentre os vírus encontrados em esgotos domésticos a Tabela 3.6 lista os principais e as doenças por eles causadas.

Tabela 3.6 Principais vírus entéricos encontrados no lodo de origem doméstica

Vírus entérico	Doenças
Vírus da hepatite A e E	Hepatite infecciosa
Rotavirus	Gastroenterite
Enterovirus	Meningite, encefalite, doenças respiratórias
Poliovirus	Poliomielite
Coxsackievirus	Meningite, pneumonia
Astrovirus	Meningite, paralisia
Reovirus	Gastroenterite, infecções respiratórias

Fonte: ADEME (1998) citado por Andreoli *et al.* (2001)

A incidência de raios solares contribui para diminuir o tempo de sobrevivência dos parasitos (Andreoli *et al.*, 2001). Com a diminuição da umidade do lodo, diminui também a possibilidade de vida de alguns microrganismos de veiculação hídrica, que têm na água seu meio de locomoção e reprodução.

Alguns métodos de tratamento de lodo são indicados na Figura 3.7, com as possibilidades de fração de sólidos e disposição final do lodo, segundo van Haandel & Lettinga (1994).

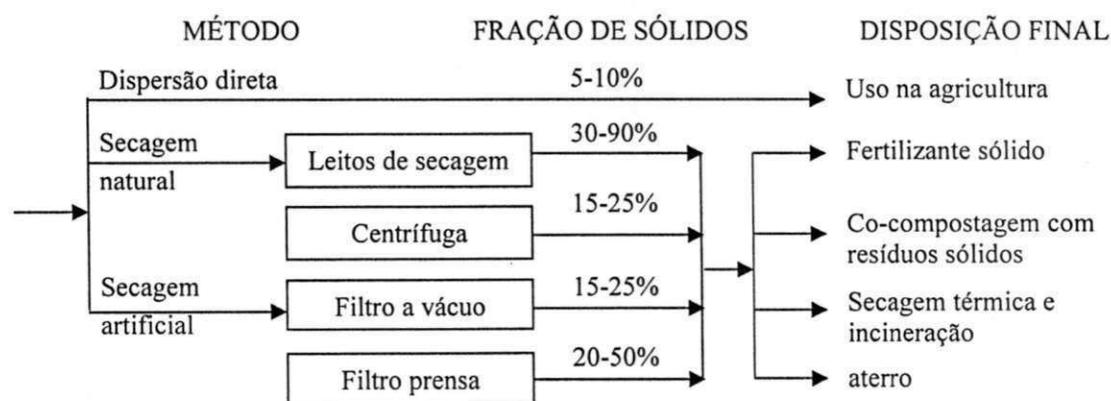


Figura 3.7 Alguns métodos para o tratamento e disposição de lodo

3.2.2 Leitos de Secagem

Leitos de secagem foram as primeiras unidades a serem usadas para a secagem de lodo, sendo o sistema mais comum de se preparar o lodo digerido para o destino final, que dependendo do tratamento e das características climáticas, pode ser utilizado na agricultura como fertilizante. Consistem de camadas de areia apoiadas em brita, sendo o fundo de terreno natural ou concreto ao qual se dá uma ligeira declividade para os drenos que são tubos perfurados com diâmetro de 150mm. A distinção e a disposição dos materiais utilizadas na construção de leitos de secagem de lodo podem ser vistas na Figura 3.8.

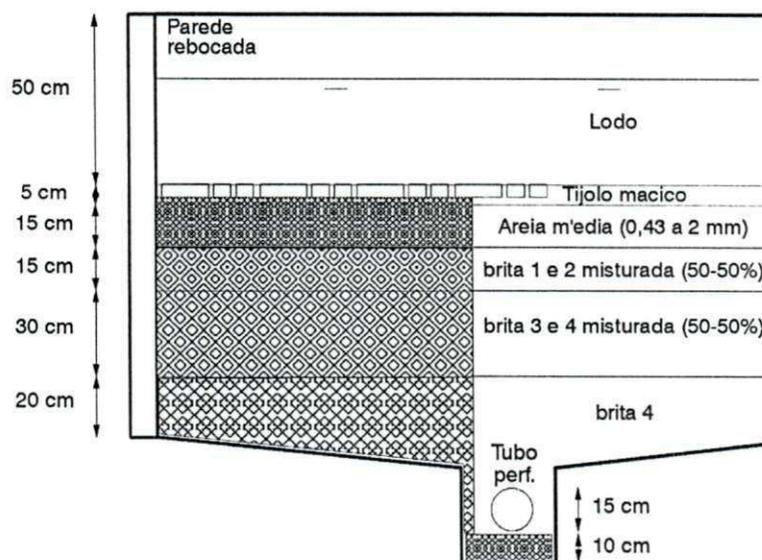


Figura 3.8 Seção de um leito de secagem de lodo

A parte superior, denominada camada suporte é constituída por uma camada de tijolos, apoiada na soleira drenante do leito, que tem em sua parte inferior um sistema de drenagem (Franci, 1999). A disposição dos tijolos constituintes da camada suporte pode ser realizada de duas maneiras, conforme Figura 3.9. A distância entre os tijolos é de 2 a 3 cm.

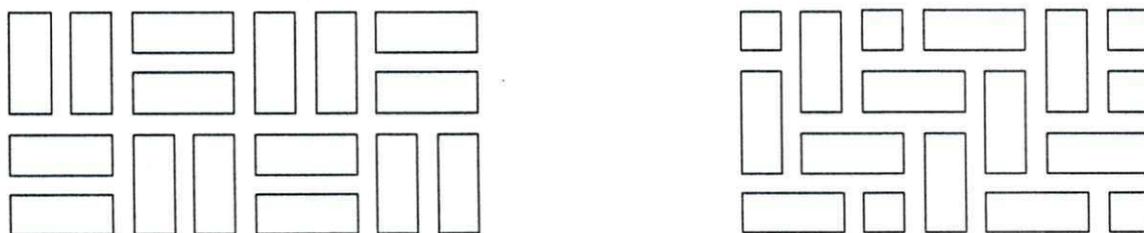


Figura 3.9 Detalhe da posição dos tijolos que compõem a camada suporte (Franci, 1999)

Os leitos de secagem requerem área elevada, sendo indicados para ETEs que tratem uma população equivalente de 20000 habitantes (Andreoli *et al.*, 2001). A secagem dependerá da taxa de evaporação que, por sua vez, depende de vários fatores, tais como clima, natureza do lodo e a carga de lodo aplicada (van Haandel & Lettinga, 1994).

O tempo total do ciclo de secagem de lodo num leito (T_t) se compõe de quatro períodos seqüenciais diferentes:

1. T_1 : tempo para preparação do leito e descarga do lodo;
2. T_2 : tempo de percolação;
3. T_3 : tempo de evaporação para se atingir a umidade desejada e;
4. T_4 : tempo de remoção dos sólidos secos.

Os períodos para preparação do leito e remoção dos sólidos (T_1 e T_4) são limitados pelo número de trabalhadores e disponibilidade de equipamento mecanizado. Já os períodos T_2 e T_3 são determinadas pelas condições operacionais durante a secagem, condições meteorológicas e carga aplicada (van Haandel & Lettinga, 1994).

Dados experimentais comprovaram uma relação quadrática entre o tempo de percolação e cargas na faixa de 15 a 50 kg SST/m² podendo ser expressa como:

$$T_2 = (C_s^2 / 420) + 0,5 \quad (15\text{kgSST/m}^2 < C_s < 50\text{kgSST/m}^2) \quad (3.5)$$

onde C_s é a carga de sólidos aplicada em kgSST/m² e T_2 o tempo de percolação em dias.

A produtividade de leitos de secagem é o principal parâmetro utilizado no dimensionamento de leitos de secagem, de modo que o tempo total de um ciclo T_t é determinado como sendo a razão entre a massa de lodo seco e a produtividade.

$$P_{LS} = C_s / T_t \quad (3.6)$$

onde T_t é o tempo total em dias para secar uma massa de lodo, C_s é a carga de lodo seco (kgSST/m²) P_{LS} é a produtividade do leito (kgSST/m².dia).

O leito de secagem pode ser descoberto ou coberto, podendo a cobertura ser constituída por vidro, ou plástico, que servem para proteger o lodo da ação da chuva. Dependendo da configuração, a cobertura pode auxiliar na higienização do lodo, ocasionada por elevação da temperatura. Porém, isto só ocorrerá após a evaporação, devido à liberação da energia de vaporização que ocasiona num resfriamento na massa de lodo.

3.3 Radiação Solar

É a energia proveniente do Sol, que chega até a Terra na forma de ondas eletromagnéticas. Sua propagação ocorre tanto no vácuo quanto na atmosfera, com velocidade de propagação de 299.300 km por segundo (Ayoade, 1983). Esta energia está relacionada a uma frequência que se relaciona com o comprimento de onda e com a velocidade de propagação, da seguinte forma:

$$V = \lambda \cdot f \quad (3.6)$$

onde, V é a velocidade de propagação da onda (m/s), λ o comprimento de onda (m) e f a frequência em Hertz (Hz).

A energia de um fóton da radiação eletromagnética caracteriza a radiação, e é expressa como:

$$E = h \cdot f \quad (3.7)$$

onde: E : energia de um fóton da radiação (J);

h : constante de Planck ($6,6262 \times 10^{-34}$ J.s)

A radiação solar é um conjunto de radiações eletromagnéticas, que se apresentam na maioria como ondas de comprimentos entre 0,3 e 4 micrometros, sendo então chamada de radiação de onda curta. A Tabela 3.7 a seguir indica o comprimento de onda para a radiação solar.

Tabela 3.7 Espectro eletromagnético da radiação solar

Radiação	Comprimento de onda (μm)
Radiação ultravioleta	0,001 a 0,39
Luz visível	0,39 a 0,77
Radiação infravermelha	0,77 a 1000

O espectro da radiação solar se assemelha ao de um corpo negro à temperatura aproximada de 6000°K . Entende-se por corpo negro aquele que absorve totalmente a radiação eletromagnética de todos os comprimentos de onda que incidam sobre ele.

Segundo a Lei Stefan-Boltzmann pode se determinar a energia total emitida por um corpo negro como sendo:

$$E = \sigma \cdot T^4 \quad (3.8)$$

onde: E : energia total emitida (cal/cm².min);

σ : constante de Stefan-Boltzmann (0,827 x 10⁻¹⁰ cal/cm².min.K⁴);

T : temperatura absoluta (K);

A energia total emitida por um corpo não negro é obtida a partir da equação (3.8), aplicando-lhe um fator ϵ , que corresponde a emissividade do corpo:

$$E = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (3.9)$$

Algumas superfícies se caracterizam pela emissividade da radiação infravermelha. Na Tabela 3.8 encontra-se a emissividade de algumas superfícies. A emissividade do corpo negro é 1,0.

Tabela 3.8 Emissividade de algumas superfícies

SUPERFÍCIE	EMISSIVIDADE (%)
Água	92 – 96
Neve Fresca	82 – 99.5
Areia seca	89 – 90
Areia úmida	95

Outra grandeza importante no estudo da radiação atmosférica é a densidade de fluxo de radiação que representa a quantidade de energia radiante que passa através de um certo plano na unidade de tempo e de área, sendo medida em W.m⁻². A constante solar é a irradiância sobre uma superfície normal aos raios solares, à distância média Terra-Sol, na ausência da atmosfera. Seu valor estimado corresponde a aproximadamente 1.367 W/m².

A radiação solar incidente no topo da atmosfera terrestre varia basicamente com a latitude, o dia do ano e a hora do dia (Vianello, 1991). A Tabela 3.9 apresenta os valores da radiação solar diária numa superfície horizontal no topo da atmosfera. Parte da radiação é absorvida por partículas constituintes da atmosfera, como o dióxido de carbono e vapor de água.

Tabela 3.9 Radiação solar diária em uma superfície horizontal no topo da atmosfera ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$), em função da latitude (ϕ).

ϕ	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
10°N	32,7	35,3	38,7	31,8	38,2	37,7	37,8	38,2	37,7	35,9	33,3	31,8
8°N	33,6	36,0	38,0	38,5	37,8	37,1	37,2	37,9	37,8	36,4	34,1	36,5
6°N	34,5	36,6	38,2	38,3	37,3	36,4	36,6	37,5	37,9	36,9	34,9	33,7
4°N	35,4	37,2	38,4	38,1	36,7	35,7	36,0	37,2	37,9	38,2	35,7	34,7
2°N	36,2	37,7	38,5	37,8	36,1	34,9	35,3	36,7	37,9	37,7	36,4	35,5
0°	37,0	38,2	38,6	37,5	35,4	34,2	34,6	36,3	37,8	38,0	37,2	36,4
2°S	37,7	38,7	38,7	37,1	34,8	33,4	33,8	35,8	37,7	38,3	37,8	37,2
4°S	38,5	39,1	38,7	36,7	34,1	32,5	33,1	35,2	37,5	38,6	38,5	38,0
6°S	39,1	39,5	38,6	36,2	33,3	31,6	32,2	34,7	37,3	38,8	39,0	38,8
8°S	39,8	39,8	38,5	35,7	32,5	30,7	31,4	34,0	37,0	39,0	39,5	39,5
10°S	40,3	40,1	38,4	35,2	31,7	29,8	30,5	33,4	36,7	39,1	40,0	40,2
12°S	40,9	40,3	38,2	34,6	30,8	28,8	29,6	32,6	36,3	39,1	40,5	40,8
14°S	41,4	40,5	38,0	33,9	29,9	27,8	28,6	31,9	35,9	39,2	40,8	41,4
16°S	41,8	40,6	37,7	33,3	29,1	26,8	27,7	31,1	35,5	39,1	41,2	41,9
18°S	42,3	40,7	37,4	32,6	28,1	25,7	26,6	30,3	35,0	39,0	41,5	42,4
20°S	42,6	40,8	37,0	31,9	27,1	24,7	25,6	29,5	34,5	39,0	41,8	42,9
22°S	43,0	40,8	36,6	31,1	26,1	23,6	24,6	28,6	33,9	38,8	42,0	43,3
24°S	43,2	40,7	36,1	30,3	25,1	22,5	23,5	27,7	33,3	38,6	42,1	43,7
26°S	43,5	40,6	35,7	29,4	24,0	21,4	22,4	26,8	32,6	38,3	42,3	44,1
28°S	43,6	40,5	35,1	28,5	22,9	20,2	21,3	25,7	32,0	38,0	42,4	44,3
30°S	43,8	40,3	34,5	27,6	21,9	19,1	20,1	24,8	31,2	37,7	42,4	44,6
32°S	43,9	40,0	33,9	26,6	20,7	17,9	19,1	23,8	30,5	37,2	42,4	44,8
34°S	44,0	39,8	33,2	25,7	19,6	16,7	17,9	22,7	29,6	36,8	42,4	45,0
36°S	44,1	39,5	32,5	24,7	18,4	15,5	16,7	21,7	28,8	36,4	42,3	45,1
38°S	44,0	39,1	31,7	23,7	17,3	14,4	15,5	20,6	28,0	35,9	42,2	45,2
40°S	43,9	38,7	30,9	22,6	16,1	13,2	14,4	19,5	31,4	35,3	42,0	45,3

Fonte: Adaptado de Tubelis (1980)

A Figura 3.10 mostra a variação da radiação ao longo do ano para latitudes diferentes, podendo ser verificado que os extremos da radiação ocorrem na latitude 40° S.

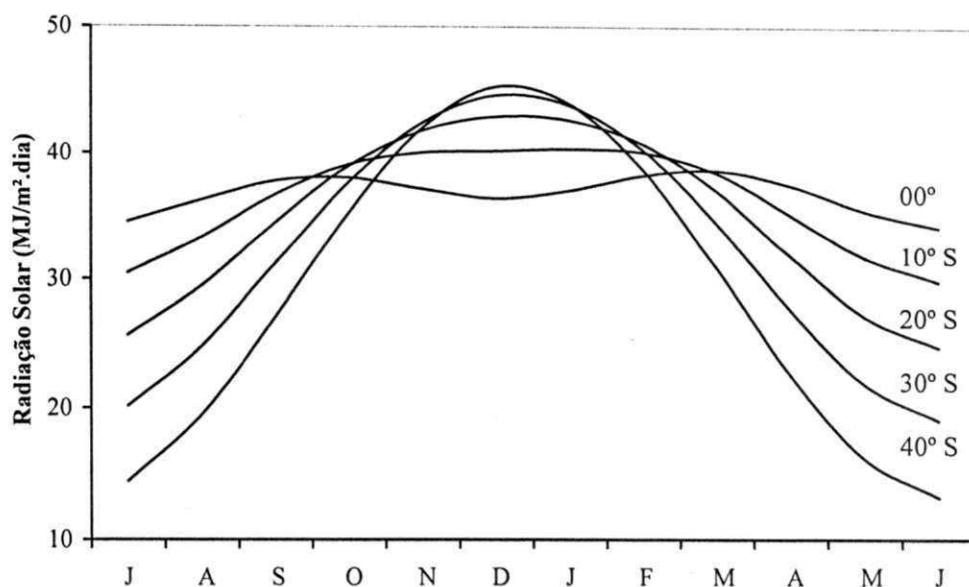


Figura 3.10 Totais diários da radiação solar em uma superfície horizontal no topo da atmosfera

O curso da radiação sofre variações maiores, quanto maior for a latitude. Para as latitudes maiores que 10° seus valores são máximos no solstício de verão e mínimos no solstício de inverno, enquanto que para a latitude do Equador ocorrem dois momentos de máxima que se localizam nos equinócios (Tubelis, 1980).

A energia solar que atravessa a atmosfera e chega à superfície terrestre é chamada de radiação global (Vianello, 1991). Esta energia é cada vez mais utilizada por indústrias e em projetos agrícolas, visando seu aproveitamento e substituição de fontes não renováveis. Na Tabela 3.10 estão os valores extremos da radiação global de alguns estados brasileiros, e respectivos meses de ocorrência.

Tabela 3.10 Valores médios mensais extremos da radiação global em algumas localidades

LOCAIS	MÁXIMA (MJ/m ² .dia)	MÍNIMA (MJ/m ² .dia)
RS – Estado	22,6	JAN 9,18 JUN
SP– Estado	21,9	DEZ 13,1 JUN
Salvador – BA	21,5	DEZ 11,8 JUL
Recife – PE	19,0	NOV 12,7 JUN

Fonte: Adaptado de Tubelis (1980)

Para a cidade de Campina Grande, segundo o Atlas Climatológico do Estado da Paraíba (1987), a radiação global assume o perfil representado na Figura 3.11.

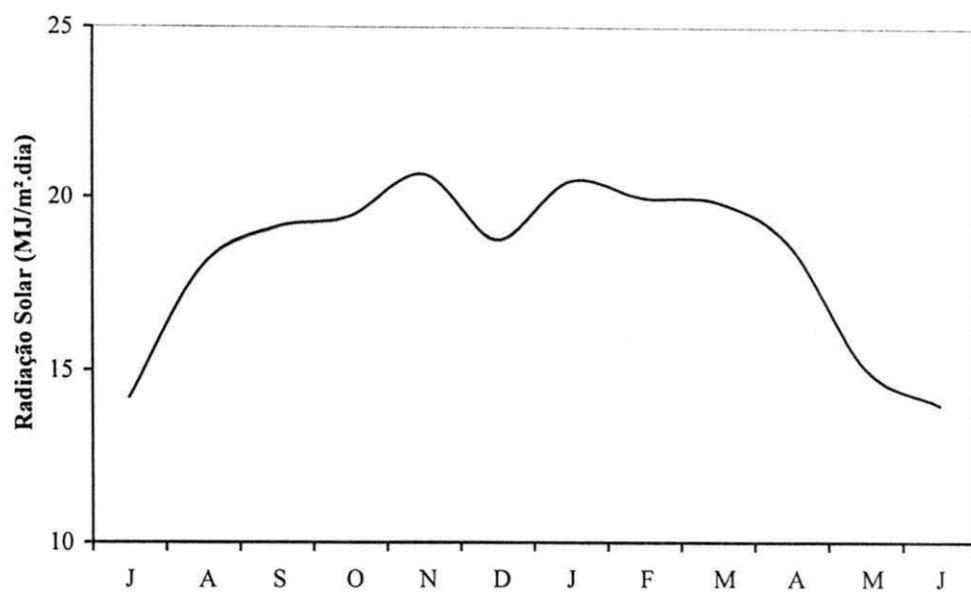


Figura 3.11 Perfil da radiação solar global no município de Campina Grande – PB

É importante também conhecer o conceito de albedo, que tem sido definido como coeficiente de reflexão da superfície para a radiação solar. Se uma fração da radiação global incidente numa superfície for refletida (αR_g) diz-se que α é o albedo desta superfície. Encontram-se na Tabela 3.11 os albedos de algumas superfícies, na forma de percentagem.

Tabela 3.11 Albedo para alguns tipos de superfícies

Item	Albedo (%)
algodão	20 – 22
milho	16 – 23
feijão	24
tomate	23
água	5
asfalto	9
alumínio	85
cobre	74
aço	80

Fonte: Adaptado de Vianello (1991)

3.4 Calor

O calor é uma forma de energia que pode ser transferida de um sistema a outro, independente do transporte de massa e da realização de trabalho. No séc. XVII, Galileu, Newton e outros filósofos da natureza apoiaram a teoria dos atomistas gregos da Antiguidade, que consideravam o calor uma manifestação do movimento molecular que escoava de um corpo mais quente para um corpo mais frio. Esta aceitação levou ao desenvolvimento de uma teoria do calor, como a de uma substância material que escoava. Lavoisier chamou esta substância de calórico. Benjamin Thomson, através de experiências precisas notou que não havia absolutamente nenhuma alteração de massa nos corpos dos quais o calor escoava (Quadros, 1996). Percebendo não haver limite para a extração de calórico dos corpos, ou seja, um corpo podia ser aquecido várias vezes, havendo sempre mais calórico para oferecer. Concluiu Thomson que o calórico não era uma substância material, pois em corpos isolados, não existe substância material que possa ser extraída sem limite.

Em 1840 surge a teoria mecânica do calor. Nesta teoria, o calor é energia que se transfere de um corpo para outro em virtude da diferença de temperatura. James Joule (1818-1889) foi quem em precisas experiências, demonstrou a equivalência entre energia térmica e a energia mecânica (Tipler, 1994). Em homenagem a este cientista, a unidade de energia no SI é J (Joule), sendo a caloria uma unidade ainda muito utilizada.

Finalmente, pode-se dizer que o calor é energia em trânsito, ou seja, uma energia que flui de um corpo a outro devido à diferença de temperatura entre eles. Ao estudar como a energia é transferida a um objeto, surgem dois novos conceitos: o calor específico e a capacidade térmica.

3.4.1 Calor Específico e Capacidade Térmica

Define-se a capacidade térmica de um corpo como a quantidade de calor necessária para elevar sua temperatura de um grau Celsius. Quando a massa do corpo é unitária, a sua capacidade térmica é denominada calor específico. No caso da água, o calor específico a 15°C é de $1\text{cal}\cdot\text{g}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$, ou seja, necessita-se de uma caloria para elevar a temperatura de um grama d'água de 14,5°C para 15,5°C.

3.4.2 Calor Sensível e Calor Latente

O calor sensível é a quantidade de energia necessária para elevar a temperatura de uma determinada substância, até um limite, dependendo da substância. O calor sensível se refere à mudança de temperatura. A quantificação do calor para variar a temperatura de um determinado corpo é dada por:

$$Q = m c \Delta T \quad (3.10)$$

onde Q representa a quantidade de calor recebida ou cedida por um corpo, m é a sua massa e c é seu calor específico, valendo salientar que esta equação representa a quantidade de calor para variar a temperatura em ΔT de um corpo de massa m .

O calor latente é a quantidade de energia necessária para a mudança de fase de uma quantidade de substância de uma fase para outra. Os tipos de mudança de fase são fusão, que é a transformação de um sólido em líquido; a vaporização, que é a mudança de líquido em vapor (como na evaporação da água); e a sublimação, a mudança de sólido em vapor.

Para que haja mudança de fase, com uma certa quantidade de substância, é necessária uma certa quantidade de energia térmica. O calor necessário à mudança de fase é proporcional à massa da substância. O calor necessário para evaporar uma determinada massa de uma substância é dado por:

$$Q = m L_v \quad (3.11)$$

onde L_v é o calor latente de vaporização. Para a água, na pressão de 1atm, o calor latente de vaporização é 2.257 kJ/kg.

Por exemplo, a quantidade de energia necessária para evaporar uma massa de 100g de água será:

$$Q = 0,100\text{kg} \times 2.257\text{kJ/kg} = 225,7\text{kJ} \quad (3.12)$$

Desta forma a quantificação da energia utilizada para evaporação da água do lodo, disposto nos leitos de secagem será feita através da equação (3.11), como mostra o exemplo da equação (3.12). É certo que haverá aquecimento da massa de lodo, no entanto este estudo trata apenas da energia utilizada para evaporação, de modo que a energia utilizada para o aquecimento do lodo será também utilizada para evaporação.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão indicados os materiais usados e descritos os métodos aplicados para se conseguir os resultados da pesquisa. Os experimentos ocorreram durante os meses de fevereiro a junho de 2005 e foram realizados no laboratório da UFCG-PROSAB, localizado na Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos Sanitários – EXTRABES, situado na avenida Conselheiro José Noujaim Habib (Canal do Prado), por onde passa um interceptor do sistema de esgotamento sanitário da cidade de Campina Grande.

O lodo utilizado na pesquisa era submetido primeiramente ao processo percolação, tendo sua umidade reduzida para 95 a 80%, assumindo uma consistência pastosa, e depois à evaporação até apresentar umidade de 74%, sendo esta a umidade inicial do material de estudo utilizado nos dois primeiros experimentos. Na pesquisa foram feitos cinco experimentos, sendo a umidade do lodo nos dois últimos experimentos de 70%.

4.1 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Os experimentos foram realizados em duas etapas. Na primeira etapa, três experimentos possibilitaram estudar o comportamento da evaporação do lodo em leitos de secagem natural. No primeiro, simularam-se 5 carregamentos diferentes de lodo em caixas de madeira descobertas; expostas às condições atmosféricas. O segundo foi realizado paralelamente ao primeiro, com as mesmas cargas, em caixas de madeira, porém providas de uma cobertura, constituída por armação metálica e revestida por uma camada plástica, permitindo assim a passagem da radiação solar, e a convecção livre do ar. O terceiro foi realizado para analisar a influência de precipitações sucessivas sobre dois carregamentos de lodo, com umidades variando de 45% a 75%. Em ambos os experimentos as caixas possuíam um sistema drenante: furos de diâmetro 6mm, e uma camada de geotêxtil Bidim-XT4, como camada filtrante, permitindo a passagem da água resultante das precipitações.

A segunda etapa da pesquisa está dividida em dois experimentos, que visaram estudar a secagem de lodo com auxílio de uma fonte externa de energia, a passagem de ar por uma camada de lodo. Para isso foram realizados na primeira experiência três carregamentos de lodo em tubos de PVC, branco, diâmetro 100mm, protegidos das

intempéries, nos quais se injetavam areias comprimidas de forma ascendente. Na última experiência se estudou o efeito da injeção de ar de forma ascendente, em dois tubos com mesmo carregamento, 50cm de lodo com umidade 70%, construídos de PVC, branco, diâmetro 100mm, sendo que em um desses tubos o ar afluente é aquecido por uma lâmpada incandescente, localizada na parte inferior do tubo, controlando assim a temperatura do ar.

4.1.1 Leitos de secagem natural

Para analisar o processo de secagem natural em leitos, foram realizados cinco carregamentos, em cinco caixas de madeira, com mesma área, $0,075\text{m}^2$ (25cm x 30cm), construídas com madeira tipo compensado naval de espessura 1/2", de modo a isolar termicamente o fundo. As paredes laterais, que eram do tipo encaixe, formadas por segmentos de 8cm de altura, que eram removidas quando da diminuição da altura do lodo, diminuindo assim o efeito do sombreamento na massa de lodo. As caixas eram providas de sistema de drenagem, que era constituído de furos no fundo protegidos por uma camada de Bidim -XT4, que permitia a passagem da água proveniente das chuvas, substituindo assim as camadas de brita e areia, utilizadas em leitos de secagem convencionais. A Figura 4.1 mostra os modelos dos leitos utilizados na primeira etapa da pesquisa.

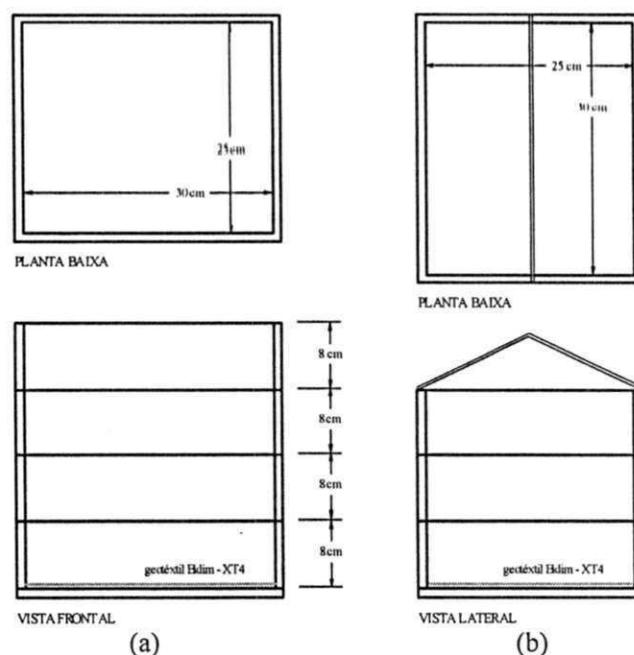


Figura 4.1 Modelo dos leitos utilizados na pesquisa: (a) descobertos e (b) cobertos

A primeira etapa da pesquisa trata a respeito da evaporação da água do lodo, em dois tipos de leitos: cobertos e descobertos, expostos às condições atmosféricas. A Tabela 4.1 mostra as massas iniciais de lodo, com umidade inicial de 74%. Dividindo a massa de sólidos do lodo pela área se obtém os carregamentos, que são expressos em kgSST/m^2 . Por se tratar de cinco cargas distintas, porém, essas cargas se repetem para os dois tipos de leitos, então os leitos descobertos foram representados pela sigla LD e os cobertos por LC, seguidos por I, II, III, IV ou V, que representam as seguintes cargas: 21, 27, 41, 55 e 68kgSST/m^2 , respectivamente. Por exemplo, o leito LC III, refere-se ao leito coberto com a carga de 41kgSST/m^2 . A carga de 68kgSST/m^2 foi conseguida com 20kg de lodo com umidade de 74% disposta em $0,075\text{m}^2$, sendo denominado LC V, se coberto e LD V caso descoberto. A Tabela 4.1 mostra as siglas que denominam os leitos e seus carregamentos.

Tabela 4.1 Massa inicial de lodo (kg), carregamentos (kgSST/m^2) e denominação dos leitos utilizados nos experimentos relacionados a secagem natural. Umidade inicial = 74%.

Leito	Massa inicial (kg)	Carga (kgSST/m^2)	Denominação	
I	6,00	21	LD I	LC I
II	8,00	27	LD II	LC II
III	12,00	41	LD III	LC III
IV	16,00	55	LD IV	LC IV
V	20,00	68	LD V	LC V

As caixas, após o carregamento com suas devidas cargas de lodo, ficavam sobrepostas em bancada de madeira a 0,90m do solo, expostas às condições atmosféricas durante o período de 17/02 a 22/07 de 2005, totalizando 155 dias de observações. Sendo “pesadas” diariamente, com balança digital FILIZOLA com precisão de 5 gramas. Verificando-se, assim, a perda de massa d’água do lodo, ao longo do experimento. A radiação solar incidente era medida através de um aparelho chamado radiômetro, que fornece os dados da radiação solar incidente na superfície, em intervalos de 5 minutos, sendo expressa em watts por metro quadrado (W/m^2) em formato analógico que são capturados por um PC através de um conversor, onde se analisa o perfil da radiação ao longo do experimento, no local da pesquisa, tanto diariamente, quanto mensalmente.

A Figura 4.2 mostra o esquema da distribuição dos leitos, sobre a bancada, onde também se encontra o radiômetro, utilizado na quantificação da energia.

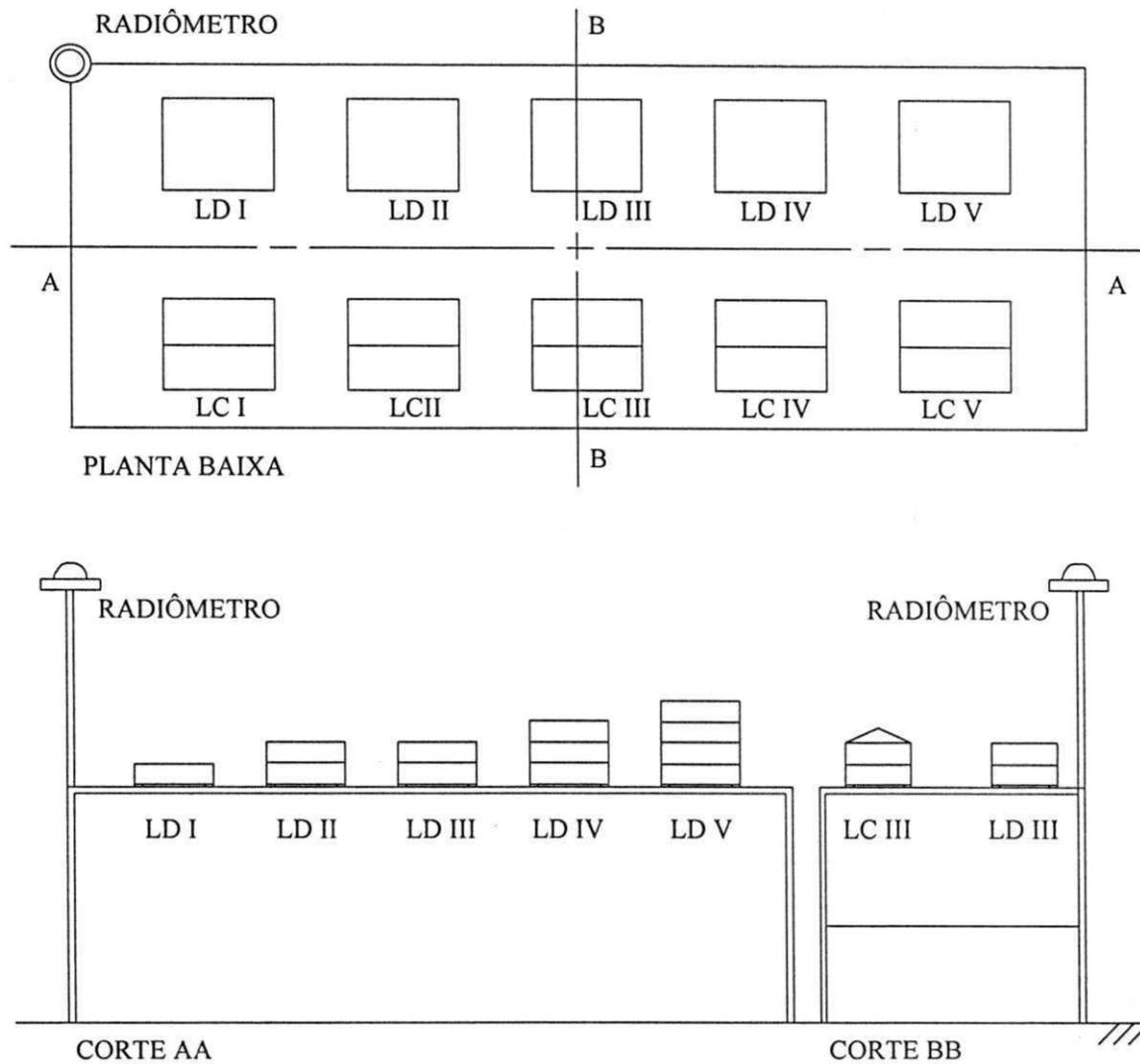


Figura 4.2 Distribuição e denominações dos leitos expostos às condições atmosféricas

Para a medição da radiação solar foi utilizado um radiômetro, que conectado ao PC fornecem dados da radiação solar incidente na superfície, em intervalos de 5 minutos, sendo expressa em watts por metro quadrado (W/m^2). Para os dados cedidos pelo DCA/UFCG o intervalo de aquisição dos dados era de 10 minutos. Através da radiação emitida, calcula-se a energia solar emitida pela seguinte equação:

$$E = R_g \cdot A \cdot t \quad (4.1)$$

E: energia solar (J);

R_g : radiação solar emitida na superfície (W/m^2);

A: área da projeção horizontal (m^2)

T: tempo (s)

Por exemplo, a energia emitida diariamente por metro quadrado numa localidade onde a radiação média seja 200W será 17,28MJ.

Na Figura 4.3 pode ser visto o perfil da radiação solar no dia 1º de março de 2005, no local do experimento, no intervalo de 5h às 18h. Observou-se que a radiação assume valores superiores à 200W a partir de 7h e superior a 1000W, próximo ao meio-dia. Observou-se também que o a nebulosidade provoca o amortecimento da radiação.

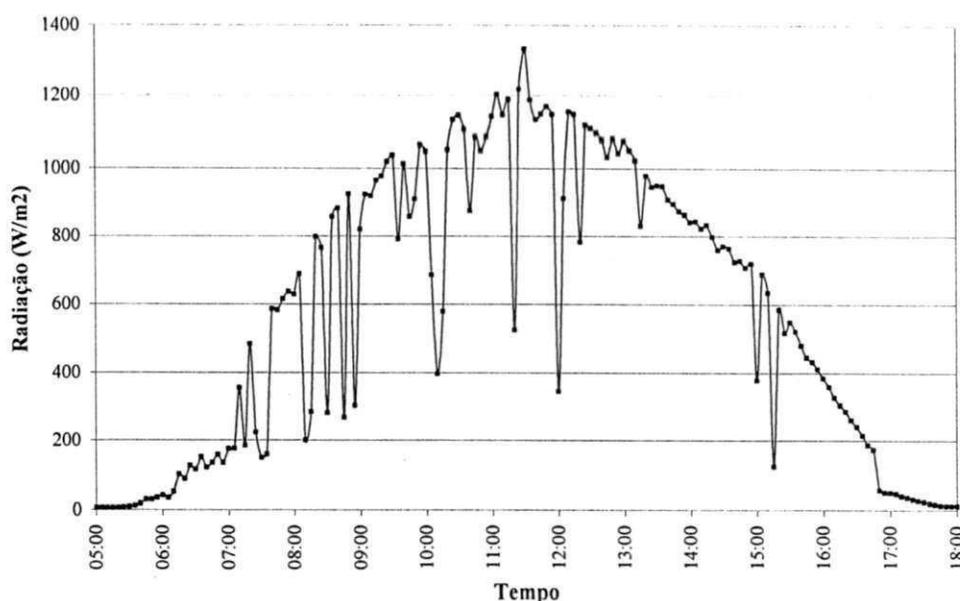


Figura 4.3 Radiação solar (W/m^2) no dia 1º de março de 2005 das 5h às 18h

Foram construídos, além dos gráficos que representam a potência solar média diária, gráficos que determinam a radiação média em intervalos de hora, para os meses de março à junho de 2005, como também foram pesquisados fatores climatológicos referentes ao ano de 2005, como a temperatura do ar, umidade do ar, e precipitações ocorridas na Estação Meteorológica Automática da UFCG – Campus I.

Esse trabalho associa radiação solar emitida e a umidade do lodo. Quanto maior a radiação maior será a energia emitida, portanto, menor tempo de exposição. Determinada a energia solar incidente sobre o lodo, e a massa d'água evaporada do mesmo, pode-se calcular a relação entre a energia solar emitida, e a energia utilizada para a mudança de fase da água no lodo, sabendo que a energia utilizada será o produto da massa evaporada pelo calor latente de vaporização da água (2,257MJ/kg).

O terceiro experimento determinou o efeito de precipitações de 10mm sobre leitos de secagem de lodo. Para tanto foram simuladas duas cargas: 20 e 40 kgSST/m². Ambas as cargas possuíam lodos com diferentes umidades, como mostra a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Umidade do lodo nos leitos de secagem para cargas de 20 e 40 kgSST/m²

Carga (kgSST/m ²)		Umidade (%)					
20	45	50	55	60	65	70	75
40	45	50	55	60	65	70	75

Tal qual os dois primeiros experimentos, os lodos ficaram dispostos sobre bancada de madeira, mas protegidos da radiação e das chuvas, em abrigo. Os leitos utilizados neste experimento foram os mesmos usados nos experimentos anteriores (Figura 4.1).

Os lodos foram preparados de modo a representar os carregamentos reais, ou seja, tinham inicialmente umidade de 75%. De posse da massa de sólidos, determinou-se à massa de lodo úmido para as cargas desejadas, esperando que as mesmas alcançassem as massas determinadas para as umidades encontradas na Tabela 4.2.

As precipitações foram simuladas com o auxílio de um regador de jardim, com intensidades controladas. Como os leitos possuíam uma área de 0,075m² (0,25 x 0,30m) então para se obter uma altura precipitada de 10mm foram adicionados 750g de água.

Visando determinar a fração retida da água precipitada para cada leito foi determinada a diferença da massa antes das precipitações. Foram realizadas três precipitações de 10mm, com curta duração, com intervalos de recorrência de 24 horas, totalizando num período de três dias uma precipitação de 30mm. Para a análise do efeito provocado foram realizadas “pesagens” após a primeira hora da precipitação. O acompanhamento das massas se fez com a mesma balança utilizada nos experimentos anteriores.

Com o aumento da massa de lodo úmido, uma vez que a massa de lodo seco não sofria variação, pode-se determinar a parcela da precipitação que ficava retida no lodo como a razão entre o aumento da massa do lodo, que correspondia a uma determinada altura de água, e a altura precipitada.

4.1.2 Leitos de secagem forçada por ar comprimido

Esta etapa da pesquisa foi constituída de duas experiências. A primeira experiência analisou a passagem de ar por uma camada de lodo com umidade de 70%, acomodado em tubos de PVC diâmetro 100mm, com uma camada de 3 cm de areia, que tinha por função distribuir o ar injetado por um nebulizador. Com trajetória ascendente, o ar passava pela camada de areia e posteriormente pela camada de lodo e saindo na extremidade superior por um orifício de 5mm de diâmetro. A remoção da água do lodo se dava pelo processo de absorção da água pelo ar, que era determinada pela diferença de massa do lodo em intervalos subseqüentes de pesagem. A temperatura e a umidade relativa do ar indicariam a capacidade máxima de absorção da água pelo ar.

Para realização desta etapa da pesquisa foram simulados três carregamentos distintos, com alturas iniciais de lodo de 0,25m, 0,50m e 1,0m. A Tabela 4.3 mostra as características dos leitos, e seus carregamentos.

Tabela 4.3 Caracterização dos leitos de secagem forçada

LEITOS	I	II	III
Altura (cm)	25	50	100
Área (cm ²)	73,9	73,9	73,9
Umidade inicial do lodo (%)	70	70	70
Massa do leito (kg)	0,855	1,020	1,550
Massa do lodo úmido (kg)	1,980	4,090	7,595
Carga (kgSST/m ²)	81,6	168,5	312,8
Vazão do ar (m ³ /dia)	7,62	10,8	10,8
Denominação	LT I	LT II	LT III

Após devidamente carregados, os leitos ficavam sobrepostos em uma bancada de madeira, protegidos das condições atmosféricas, o ar afluyente possuía características ambientes. O acompanhamento da perda de massa era realizado através da mesma balança utilizada anteriormente, a temperatura do ar e a umidade relativa do ar por um termohigrometro digital, situado sobre a bancada. O modelo e o esquema da disposição dos leitos encontram-se na Figura 4.4, onde os círculos representam os nebulizadores, e as setas indicam o sentido do fluxo de ar, que atravessa uma camada de lodo.

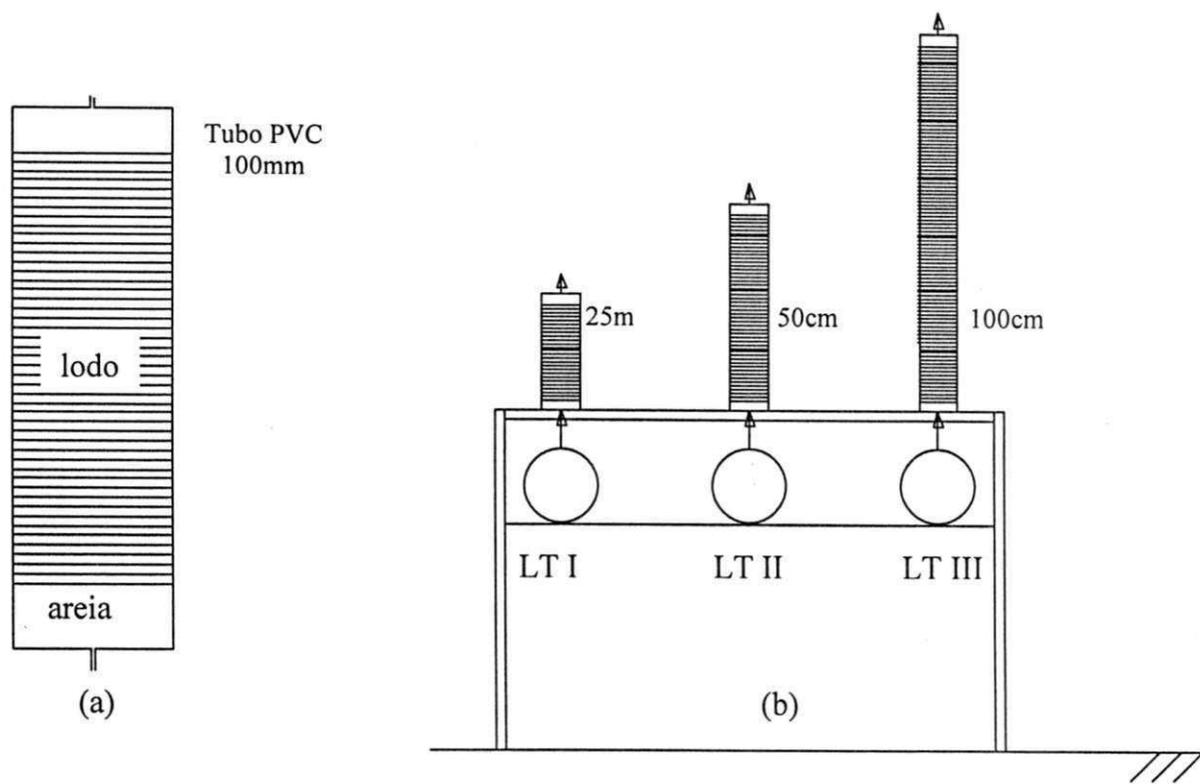


Figura 4.4 Leitos de secagem forçada: (a) modelo dos leitos, (b) disposição dos leitos.

Para que se possa levantar a curva de evaporação destes leitos, é necessário que haja o acompanhamento da perda de massa. Relaciona-se a taxa de evaporação com a vazão injetada de ar, temperatura e a umidade relativa do ar. A Figura 4.5 mostra a concentração de água no ar em relação à temperatura sob condições de saturação. Cada metro cúbico de ar pode reter até 196g, a 70 °C e 588g a 100 °C.

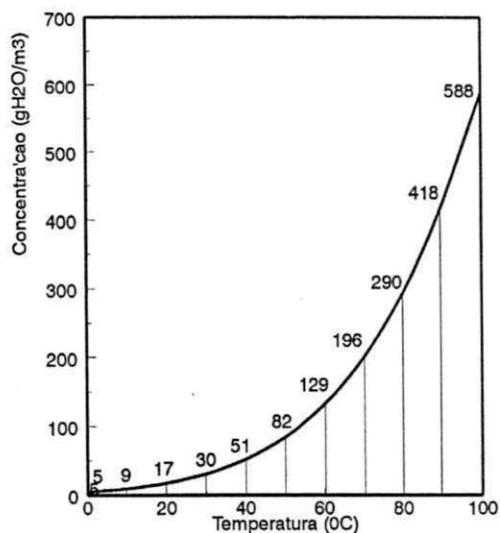


Figura 4.5 Concentração de água por m³ de ar saturado em função da temperatura
Fonte: Pedroza *et alii.* (2006)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo da distribuição da radiação solar, e seu aproveitamento no processo de secagem natural de lodo estabilizado se fez de modo a conhecer o potencial energético solar da região e determinar a parcela da energia efetiva aproveitada no processo de evaporação do lodo. Para tanto se fez necessária uma quantificação da energia cedida ao longo do dia, para os meses de março a junho de 2005. Conforme são apresentados a seguir.

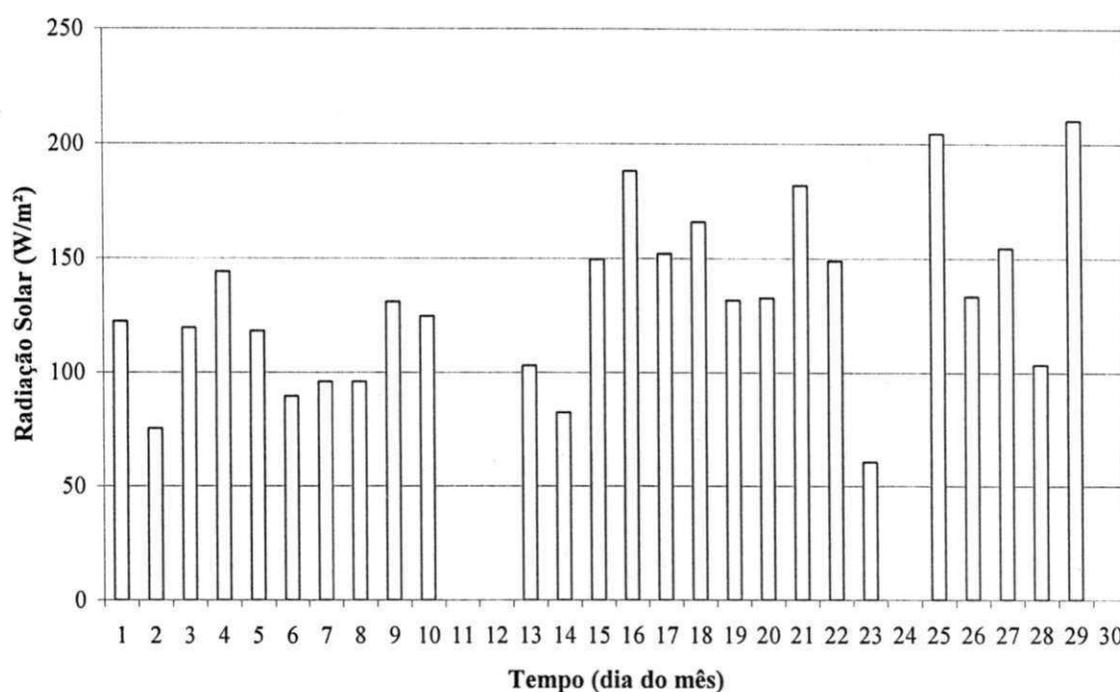


Figura 5.1 Radiação solar média em junho de 2005 em Campina Grande - PB

A energia solar apresenta diferentes valores ao longo do dia e dos dias, a Figura 5.1 fornece os valores da potência solar média diária que chega até a superfície, expressa em watts por metro quadrado (W/m^2) no mês de junho de 2005. Resulta da média da energia radiada entre as 05h e 17h, que é medida através de um radiômetro, que conectado ao PC gera um arquivo com os dados referentes à radiação do instante em que foi requisitado até as últimas 72 horas, com intervalos entre as leituras de 5 minutos.

Apresentando uma radiação média para o mês de junho de $130W/m^2$, ocorreram dois dias com radiação superior a $200W/m^2$, e o dia 23 chegou apenas a $61W/m^2$, o que caracteriza um dia nublado de inverno.

A Figura 5.2 mostra os valores médios da radiação em intervalos de hora, para o mesmo período apresentado anteriormente. A radiação média máxima ocorre entre 11h e 12h assumindo um valor de 489W/m^2 , sendo que a média instantânea máxima 557W/m^2 ocorreu às 11h10min e a mínima de 405W/m^2 às 11h45min.

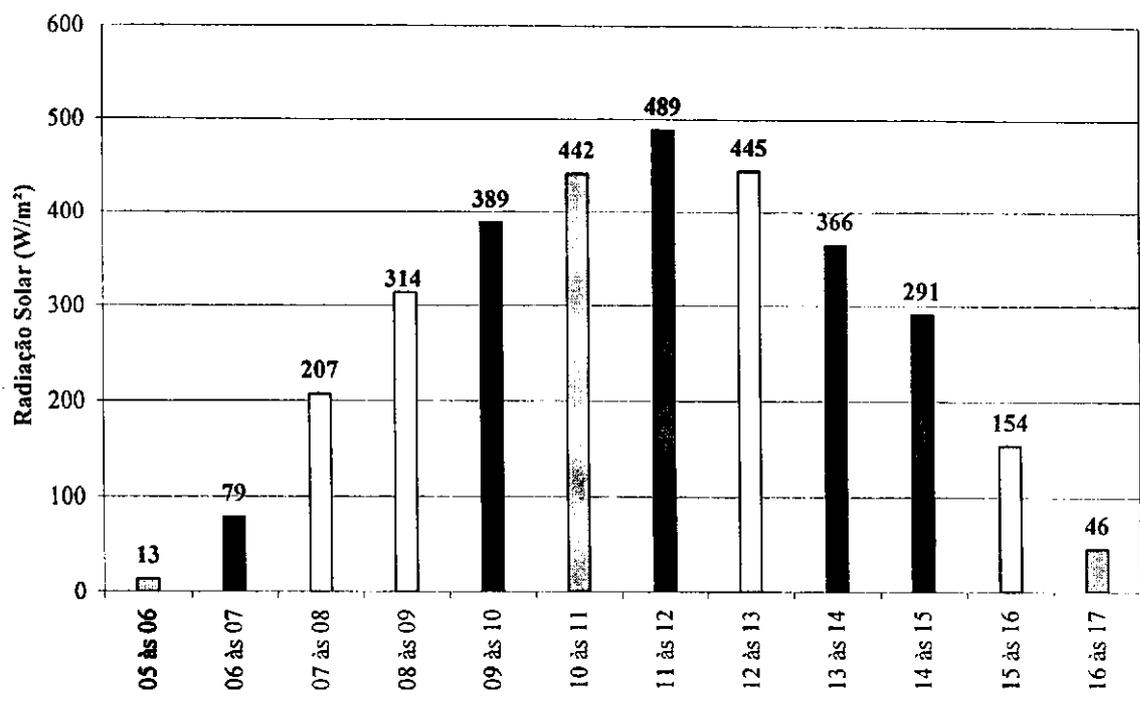


Figura 5.2 Distribuição horária da potência solar (W/m^2) em junho de 2005.

A radiação máxima, geralmente ocorre próximo do meio dia. A Figura 5.3 mostra o perfil de um dia, representando a média instantânea da radiação solar nos dias pesquisados em junho. Com uma radiação média que fornece uma energia de $11,25\text{MJ/m}^2$, junho foi o mês que apresentou a menor radiação para o período em estudo.

Como consequência da baixa radiação ocasionada pela nebulosidade é de se esperar que a produtividade de secagem em junho seja inferior aos outros meses, haja vista que a evaporação depende principalmente da energia recebida pela superfície de lodo; como a emissão da energia é menor, logo a recepção desta energia, que indica quanto de água evapora também será, promovendo assim uma baixa evaporação. Evitar a descarga nesse período seria a melhor opção, devido não só a baixa radiação, mas também a ocorrência de chuvas nesse mês ser superior aos demais.

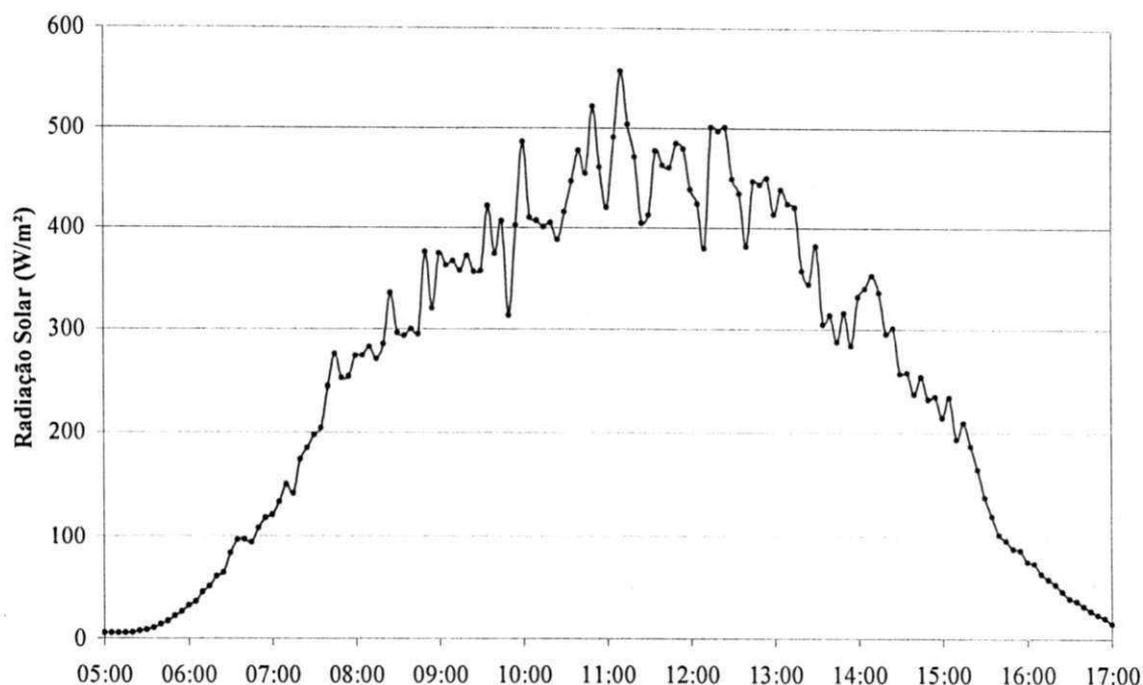


Figura 5.3 Potência solar instantânea média (W/m^2) no mês de junho de 2005.

Os pontos da Figura 5.3 representam a média da potência solar ao longo do dia, para os dias pesquisados no mês de junho de 2005, indicados na Figura 5.1, sendo o intervalo entre as leituras de 5 minutos. As quedas da radiação entre 9h e 14h, indicam a passagem de nuvens, o que dificultando a passagem dos raios solares, ocasionando uma diminuição da radiação, no entanto, valores superiores a $300W/m^2$ foram encontrados neste intervalo. Radiações superiores a $200W$ são encontradas a partir das 7h30min até às 15h, passando por um máximo próximo de $500W$ entre 11h e 12h.

Março foi o mês que apresentou maior radiação, sendo o dia 1º de março o que ocorreu o maior fornecimento de energia solar, sendo à média máxima para esse intervalo de $887W/m^2$ às 10h50min, e a mínima de $682W/m^2$ às 10h. Valores de $200W$ podem ser encontrados às 7h, enquanto que em junho essa radiação só ocorrerá após as 7h30min.

A Figura 5.4 mostra a distribuição da radiação solar para o mês de março, podendo ser verificado que a radiação máxima de $773W/m^2$ ocorreu entre 10h e 11h. Radiações de $300W/m^2$ podem ser encontradas facilmente entre as 7h e 16h.

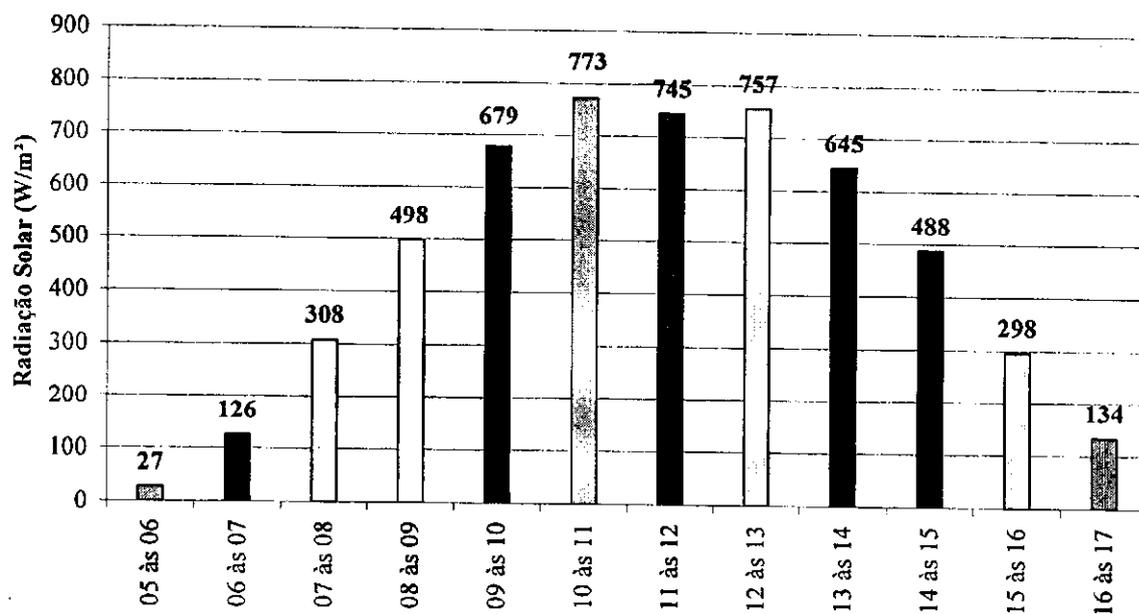


Figura 5.4 Distribuição horária da potência solar (W/m^2) em março de 2005

Com uma radiação média de $236W/m^2$, apresentando sob condições de céu limpo, valores superiores a $1000W/m^2$ e chegando até $1258W/m^2$ no dia 05 às 11h40min. A Figura 5.5 mostra que a radiação máxima de $310W/m^2$, que corresponde a uma energia de $26,80MJ/m^2$, aconteceu no dia 1º, e a mínima de $131W/m^2$ no dia 26.

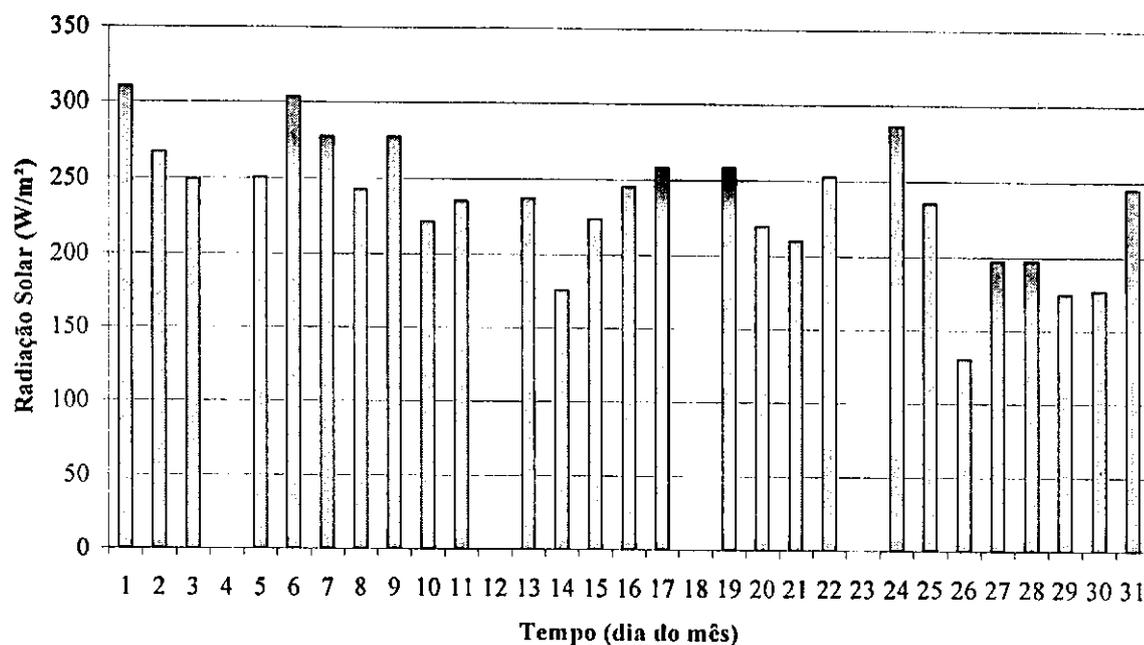


Figura 5.5 Potência solar diária em março de 2005 em Campina Grande – PB.

Visando uma comparação entre radiações emitidas no período em estudo, foi construído um gráfico de dispersão com os valores médios das radiações instantâneas, como mostra a Figura 5.6, percebendo-se que a radiação assume um aspecto decrescente de março a junho.

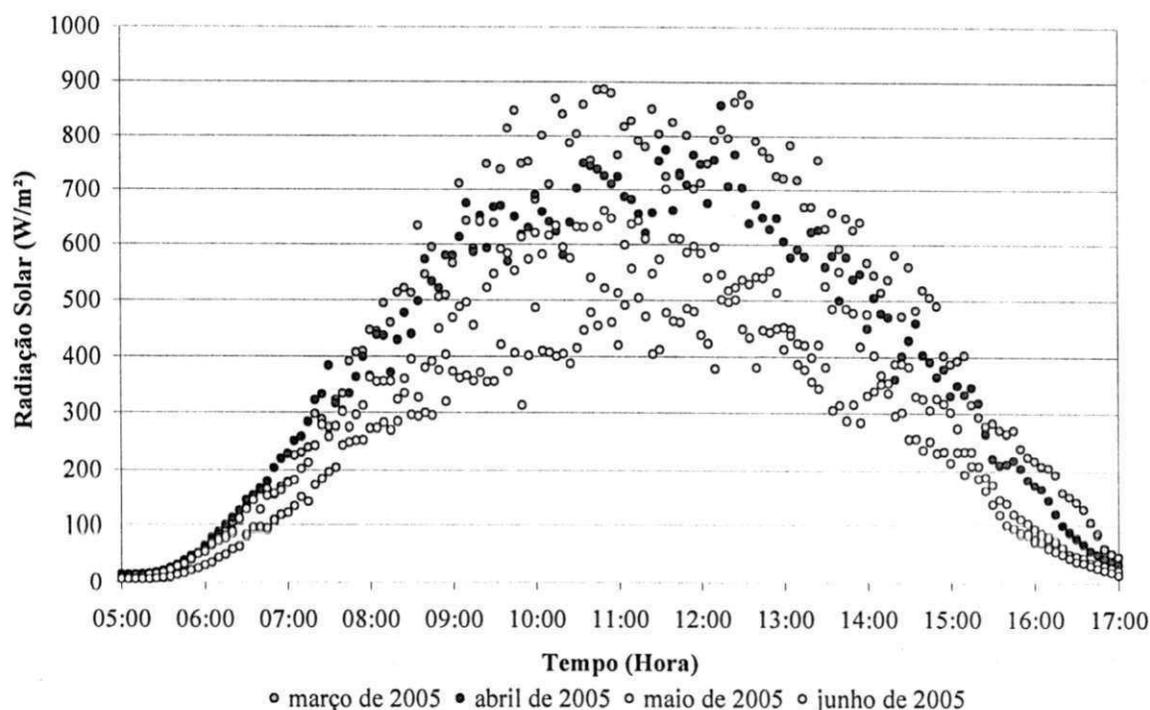


Figura 5.6 Gráfico de dispersão da radiação solar instantânea média de março a junho de 2005 em Campina Grande - PB

Há uma superioridade em termos energéticos do mês de março em relação aos outros meses, destacando-se em relação a junho, com uma potência 81% maior. A energia emitida em 20 dias no mês de junho em média corresponde à energia emitida em 11 dias em março, 13 dias em abril, e 15 dias em maio.

A radiação chega a valores de 900W/m^2 em março, próximo de 11h, caindo para 800W/m^2 próximo de 12h, diferença essa causada pela ocorrência de nuvens. Enquanto em junho chega 550W/m^2 , próximo das 11h. Para o mês de abril a máxima ocorreu às 12h15 com uma média de 858W/m^2 , sendo o período com maior radiação de 10h às 11h com uma média de 773W/m^2 . Em maio a radiação média de 594W/m^2 aconteceu entre 11h e 12h, sendo o seu valor máximo 701W/m^2 ocorrido às 11h35min.

Como a duração do dia no verão é maior que no inverno, era de se esperar que a radiação às 17h fosse maior em março e decrescesse até junho, como realmente ocorreu.

A radiação dos meses de abril e maio está indicada na Figura 5.7, apresentando máximos de 298W/m^2 (11 de abril), 246W/m^2 (02 de maio), e mínimos de 122W/m^2 (09 de abril), 111W/m^2 (19 de maio).

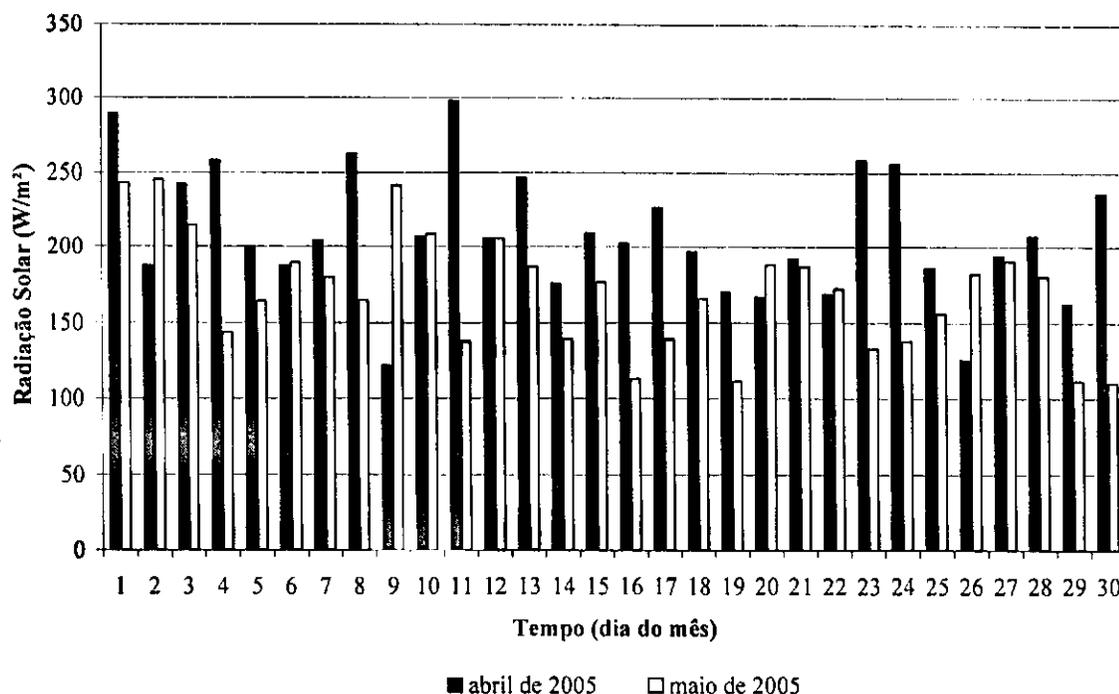


Figura 5.7 Potência solar diária em abril e maio de 2005 em Campina Grande – PB

Para facilitar a compreensão à cerca da distribuição horária da radiação ao longo do dia, para os meses estudados, construiu-se um gráfico mostrando a radiação em intervalos de 1 hora a partir das 05h até às 17h, como mostra a Figura 5.8, concluindo que a energia emitida nos meses de março, abril e maio, no intervalo das 09h às 10h é superior a emitida no mês de junho entre 11h e 12h. Sendo observado ainda que a radiação solar emitida no período de 08h as 09h no mês de março foi superior à emitida em junho entre 11h e 12h.

Ao contrário dos outros meses a radiação solar máxima que chega a superfície em março é máxima entre 10h e 11h. Isso ocorre devido à presença de nuvens entre 11h e 12h, tornando a aumentar entre 12h e 13h, mostrando assim a ocorrência de nuvens no intervalo que antecede o meio-dia.

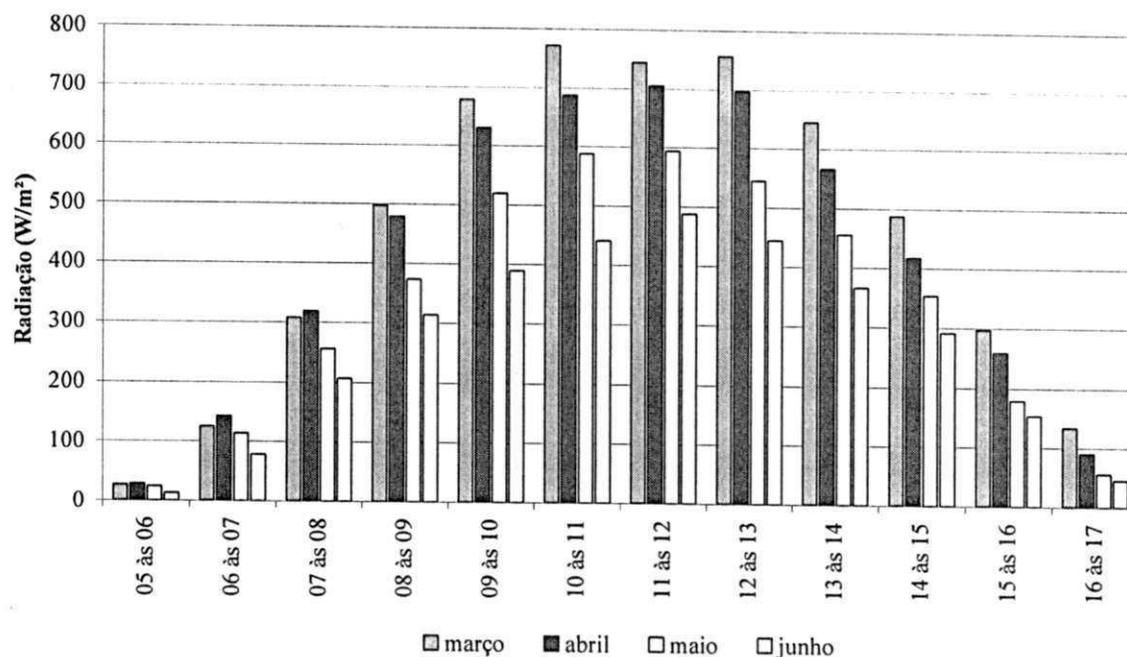


Figura 5.8 Distribuição horária da potência solar (W/m^2) de março a junho de 2005.

No período analisado a radiação média foi de $186W/m^2$, sendo março e abril os meses mais quentes, com radiações superiores à média para o mesmo período. Abril apresentou uma radiação média de $208W/m^2$, enquanto que no mês de maio a radiação foi de $171W/m^2$. Conforme indicado na Figura 5.9

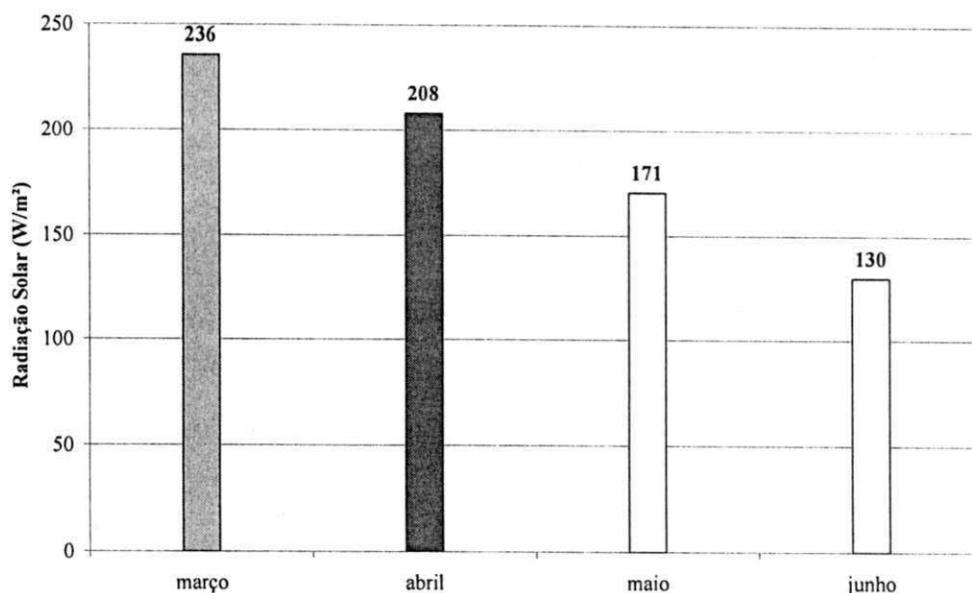


Figura 5.9 Radiação solar de março a junho de 2005 em Campina Grande - PB

Para o período estudado observamos que a radiação tem um caráter decrescente com o tempo de forma aparentemente linear, assumindo valores máximos em março e mínimos em junho, com uma perda mensal de aproximadamente 35W/m^2 .

Como a diferença entre a radiação média entre março e junho foi 106 W/m^2 e a radiação média foi 189W/m^2 , é aconselhável utilizar para cálculos a média mensal para o tempo de exposição do lodo as condições atmosféricas, devido o tempo necessário à secagem poder ser maior, ou seja, a energia necessária para que o lodo atinja o grau de umidade desejado será maior, e o mesmo não secará, caso contrário, com a radiação superior, o lodo secará em um tempo menor que o programado, ocasionando assim uma área maior que a realmente necessária.

Desidratação do lodo

O processo de desaguamento do lodo consiste em separar a parte líquida da parte sólida, por percolação, sendo que para no fim do processo, percolação o lodo tem alcançado umidade próxima a 80%. Depois a separação do líquido se dará de forma lenta, sendo a evaporação o processo que fará a retirada transporte de água do lodo para a atmosfera.

Visando determinar a parcela da energia solar envolvida diretamente no processo de evaporação, e ainda sabendo que a mesma varia com a umidade do lodo, de modo que quanto mais úmido maior será a evaporação, cessando quando o lodo entrar em sua umidade de equilíbrio, que dependerá das condições atmosféricas, no caso de Campina Grande esse valor chegou a 5%, que corresponde a um teor de sólidos de 95%.

A primeira parte do estudo se refere à perda de massa do lodo em um período de 15 dias, de 1 de março a 16 de março de 2005, onde a massa de lodo do leito denominado LC V foi reduzida em 4kg, de 16kg para 12kg, num período de 15 dias, conforme Figura 5.10. Numa área de $0,075\text{m}^2$, esta evaporação equivale a uma massa de 53kg/m^2 , e a uma lâmina d'água equivalente de 53mm, com uma taxa de evaporação de 3,6mm/dia. Enquanto o leito denominado LC I, teve sua massa reduzida em 1,2kg num período de 11 dias, equivalendo a uma altura de água evaporada de 15,9 mm, conseqüentemente com uma taxa de evaporação de 1,4mm/dia. Na Figura 5.11 se encontram os perfis das massas dos lodos dispostos nos leitos descobertos, para o mesmo período.

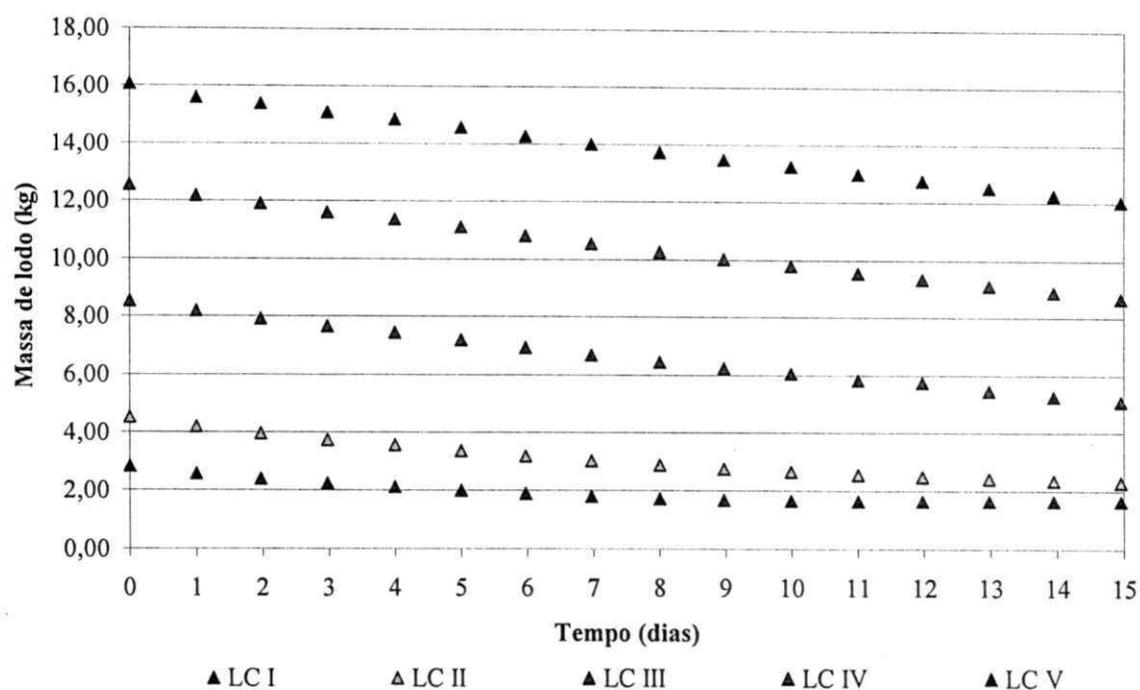


Figura 5.11 Acompanhamento da massa de lodo exposto as condições atmosféricas nos leitos cobertos no período de 01/03/05 a 16/03/05 em Campina Grande-PB

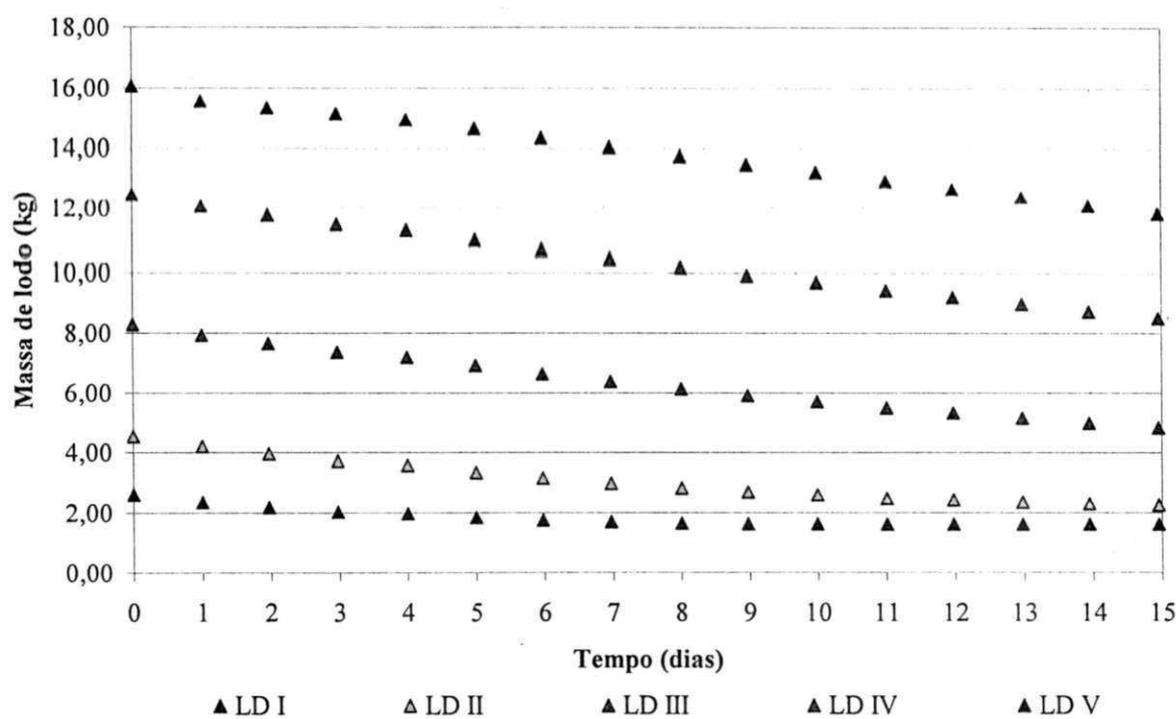


Figura 5.11 Acompanhamento da massa de lodo exposto as condições atmosféricas nos leitos descobertos no período de 01/03/05 à 16/03/05 em Campina Grande-PB

Nota-se que a diferença entre a evaporação nos dois tipos de cobertura não é significativa, ou seja, a cobertura, por ser transparente não impede a passagem dos raios solares, e sua forma possibilita a passagem livre dos ventos. De modo que podemos dizer que a estrutura da cobertura não tem efeito retardador, na secagem do lodo, em períodos de estiagem.

A Figura 5.12 mostra o perfil da umidade para os lodos confinados nos leitos cobertos, que tinham inicialmente a mesma umidade (74%), porém cargas diferentes. Nesse período o leito LC II atingiu uma umidade de 10%, enquanto que o leito LC I permaneceu com a massa estável, ou seja, cessou o processo de evaporação, quando atingiu umidade de 6%. Umidade baixa é um bom indicador de qualidade higiênica do lodo, no entanto em termos econômicos, com uma carga mais elevada, como a aplicada em LC V obtém-se redução maior da massa, acarretando em diminuição no custo do transporte ao destino final.

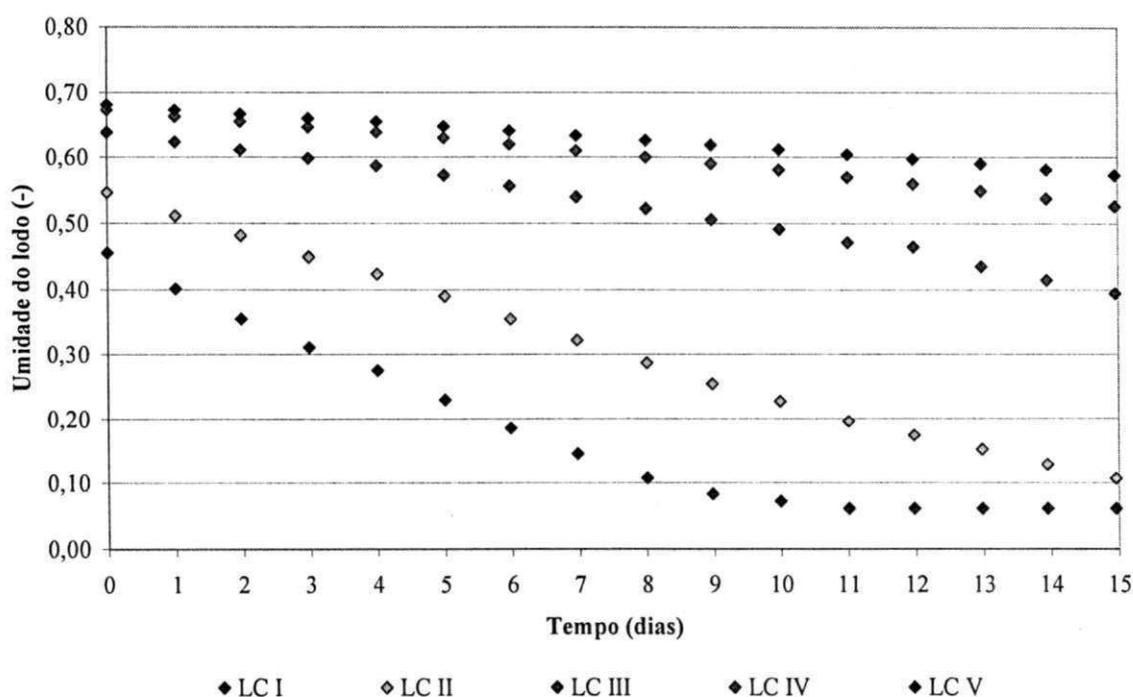


Figura 5.12 Gráfico de dispersão da umidade do lodo para os leitos cobertos no período de 01/03/05 a 16/03/05 em Campina Grande-PB

A partir do “estacionamento” da massa, indicando o fim da secagem, ou seja, quando a umidade do lodo está em equilíbrio com a umidade ambiente, a energia solar será aproveitada apenas na higienização do lodo.

O leito coberto com carga de 21kgSST/m^2 , apresentou uma umidade de equilíbrio de 6% no dia 11 de março, com um período total de exposição de 23 dias, com uma produtividade de secagem de $0,9\text{kgSST/m}^2$ para umidade inicial de 74% e final de 6%. Caso a umidade desejada fosse 10%, o leito LC II (27kgSST/m^2) obteve esta umidade com 27 dias, correspondendo a uma produtividade de 1kgSST/m^2 .

Os leitos descobertos apresentaram uma maior perda de massa, no entanto, pode-se dizer que ambos os experimentos, apresentaram os mesmos resultados. Isso se confirma ao comparar a Figura 5.12 com a Figura 5.13, ilustrada a seguir.

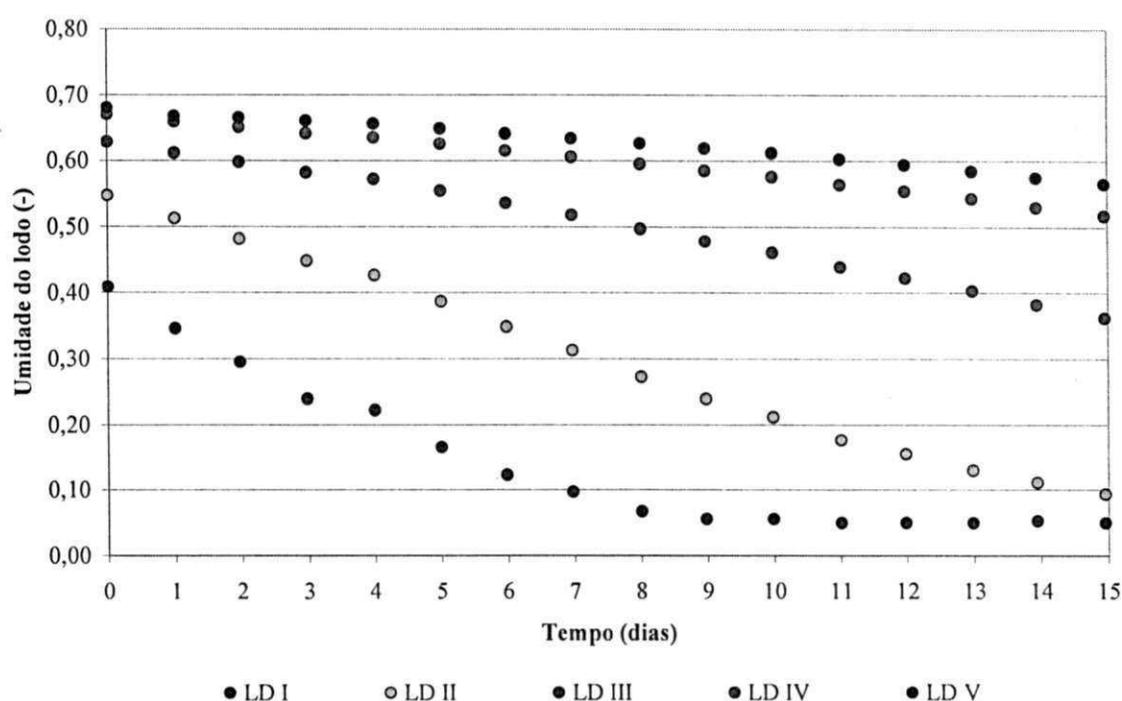


Figura 5.13 Gráfico de dispersão da umidade do lodo para os leitos descobertos no período de 01/03/05 à 16/03/05 em Campina Grande-PB.

Os leitos LC I e LDI obtêm umidade de 10% em 8 dias e 7 dias, respectivamente. A umidade do lodo no início do período era de 45% em LC I e 40% em LDI. Quando a umidade do lodo contido em LC I for 40% o tempo para atingir umidade de 10% é também de 7 dias.

A evaporação foi medida diariamente, resultando da diferença entre a massa do lodo no instante da “pesagem” e a massa anterior em cada leito. A massa evaporada indica a quantidade de energia envolvida no processo de secagem, podendo ser encontrada na Tabela 5.1, para os leitos cobertos e na Tabela 5.2 para os leitos descobertos.

Tabela 5.1 Massa evaporada (kg) diariamente nos leitos cobertos

Data – Hora	Tempo (d)	Massa Evaporada (kg)				
		68 (kg/m ²)	55 (kg/m ²)	41 (kg/m ²)	27 (kg/m ²)	21 (kg/m ²)
1/3/05 9:00	0	-	-	-	-	-
2/3/05 9:00	1	0,380	0,370	0,330	0,320	0,255
3/3/05 8:20	2	0,290	0,285	0,265	0,240	0,185
4/3/05 8:30	3	0,305	0,295	0,255	0,230	0,155
5/3/05 9:00	4	0,235	0,235	0,215	0,170	0,110
6/3/05 9:00	5	0,280	0,275	0,250	0,195	0,125
7/3/05 8:30	6	0,300	0,295	0,260	0,185	0,110
8/3/05 8:20	7	0,275	0,270	0,250	0,155	0,090
9/3/05 9:10	8	0,275	0,270	0,235	0,150	0,075
10/3/05 8:30	9	0,255	0,245	0,215	0,125	0,045
11/3/05 8:50	10	0,235	0,220	0,185	0,095	0,020
12/3/05 9:10	11	0,255	0,250	0,225	0,105	0,020
13/3/05 8:30	12	0,230	0,215	0,070	0,070	0,000
14/3/05 8:30	13	0,230	0,220	0,300	0,065	0,000
15/3/05 7:40	14	0,255	0,225	0,195	0,065	0,000
16/3/05 7:50	15	0,230	0,215	0,175	0,055	0,000
Evaporação Total (kg)		4,030	3,885	3,425	2,225	1,190

Tabela 5.2 Massa evaporada (kg) diariamente nos leitos descobertos

Data – Hora	Tempo (d)	Massa Evaporada (kg)				
		68 (kg/m ²)	55 (kg/m ²)	41 (kg/m ²)	27 (kg/m ²)	21 (kg/m ²)
1/3/05 9:00	0	-	-	-	-	-
2/3/05 9:00	1	0,515	0,395	0,360	0,325	0,250
3/3/05 8:20	2	0,230	0,295	0,270	0,250	0,170
4/3/05 8:30	3	0,210	0,305	0,290	0,240	0,160
5/3/05 9:00	4	0,200	0,195	0,175	0,140	0,045
6/3/05 9:00	5	0,300	0,295	0,280	0,235	0,135
7/3/05 8:30	6	0,300	0,290	0,285	0,195	0,090
8/3/05 8:20	7	0,285	0,260	0,250	0,165	0,050
9/3/05 9:10	8	0,290	0,265	0,255	0,165	0,055
10/3/05 8:30	9	0,270	0,255	0,220	0,125	0,020
11/3/05 8:50	10	0,245	0,210	0,190	0,095	0,000
12/3/05 9:10	11	0,300	0,260	0,220	0,110	0,010
13/3/05 8:30	12	0,275	0,220	0,165	0,065	0,000
14/3/05 8:30	13	0,275	0,225	0,170	0,070	0,000
15/3/05 7:40	14	0,295	0,250	0,180	0,050	-0,005
16/3/05 7:50	15	0,260	0,225	0,155	0,045	0,005
Evaporação Total (kg)		4,250	3,945	3,465	2,275	0,985

A Tabela 5.1 e a Tabela 5.2 mostram a massa evaporada diariamente nos leitos cobertos e nos leitos descobertos, respectivamente, durante um período de 15 dias. Observa-se que não houve diferença significativa para os leitos com mesma carga de sólidos, isto mostra a eficiência da cobertura transparente e sua forma que possibilita a convecção natural. Quanto maior a disponibilidade de água, ou seja, umidade do lodo, maior será a taxa evaporação.

Através da evaporação diária e da radiação média diária para o período de 01 à 16/03/2005, calculou-se a fração R_n da energia solar utilizada na evaporação para cada leito como sendo a razão entre a energia utilizada para a evaporação e a energia cedida pela radiação solar, de modo que:

$$\text{Energia Utilizada} = m_{EV} L_V \quad (5.1)$$

$$\text{Energia Cedida} = R_g A t \quad (4.1)$$

Dividindo a Equação 5.1 pela Equação 4.1 se obtém a Equação 5.2, que determina a fração, ou parcela, da energia cedida, ou radiada pelo Sol, que é aproveitada no processo de secagem do lodo, denominada de R_n . Então:

$$R_n = m_{EV} L_V / (R_g A t) \quad (5.2)$$

Onde R_n : parcela da energia solar emitida que é utilizada na evaporação do lodo.

m_{EV} : massa evaporada (kg)

L_V : calor latente de vaporização da água (2,257MJ/kg)

R_g : radiação global (W/m^2)

A : área da seção horizontal (m^2)

t : tempo (s)

Buscando uma correlação entre a parcela da energia solar utilizada no processo de evaporação do lodo, com a umidade do lodo, foi construída a Tabela 5.3, que indica a energia utilizada na evaporação do lodo para os leitos cobertos. Bastando para isso utilizar a Tabela 5.1, na quantificação da energia, segundo a Equação 5.1. A energia cedida pelo Sol é mensurada a partir da Equação 5.2, utilizando os dados referentes à emissão de energia durante a primeira quinzena do mês de março de 2005, associando a umidade do lodo, segundo a Figura 5.12. Representando assim a exposição de um total de cinco leitos de cada tipo, com diferentes umidades e cargas, expostos às condições atmosféricas.

Tabela 5.3 Energia Utilizada (kJ) no processo de evaporação de lodo em leitos cobertos e a Energia Cedida pelo Sol (kJ)

Tempo (d)	Energia Utilizada (kJ)					Energia Cedida (kJ)
	LC I	LC II	LC III	LC IV	LC V	
1	576	722	745	836	858	1974
2	418	542	599	644	655	1822
3	350	520	576	667	689	1820
4	249	384	486	531	531	1595
5	283	441	565	621	633	1609
6	249	418	588	667	678	1963
7	203	350	565	610	621	1786
8	169	339	531	610	622	1605
9	102	283	486	554	576	1929
10	45	215	418	497	531	1565
11	45	237	508	565	576	1667
12	0	158	158	486	520	1664
13	0	147	678	497	520	1643
14	0	147	441	508	576	1723
15	0	124	395	486	520	1442

O aproveitamento da energia solar será maior quanto mais úmido for o lodo, de modo que ao atingir a umidade de equilíbrio, o processo de secagem cessa.

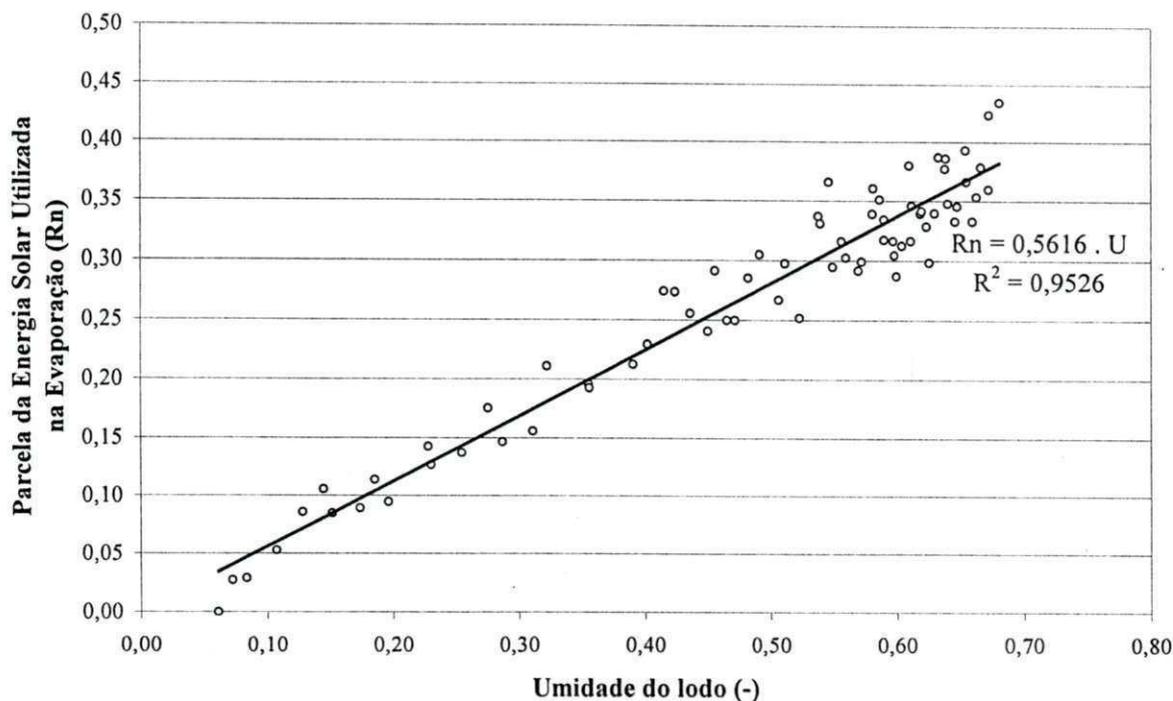


Figura 5.14 Parcela da energia solar utilizada na evaporação do lodo em leitos cobertos

A Figura 5.14 mostra a relação da energia aproveitada para evaporação do lodo em leitos cobertos em função da umidade do lodo, indicando uma tendência linear. A partir destes dados chegamos a seguinte equação:

$$R_n = 0,5616 U \quad (5.3)$$

Com um forte índice de correlação ($R^2=0,95$) podemos dizer que há uma correlação linear da parcela da energia utilizada no processo de evaporação com a umidade do lodo.

A Figura 5.15 apresenta o comportamento da umidade do lodo, dispostos nos leitos de madeira, ao longo de 28 dias, para os dois tipos de leitos e as cinco cargas, mostrando não haver diferença significativa da perda de umidade em relação ao tipo de leito, para um período de estiagem. Desta forma, a Equação 5.3 será válida também para os leitos descobertos. Como os leitos carregados com $21\text{kgSST}/\text{m}^2$ alcançaram a umidade de 10% em 19 dias, o descoberto, e 20 dias o coberto, devido o fato da cobertura tanto refletir como absorver parte da radiação solar é de se esperar que a parcela da energia utilizada na evaporação do lodo nos leitos descobertos seja um pouco maior.

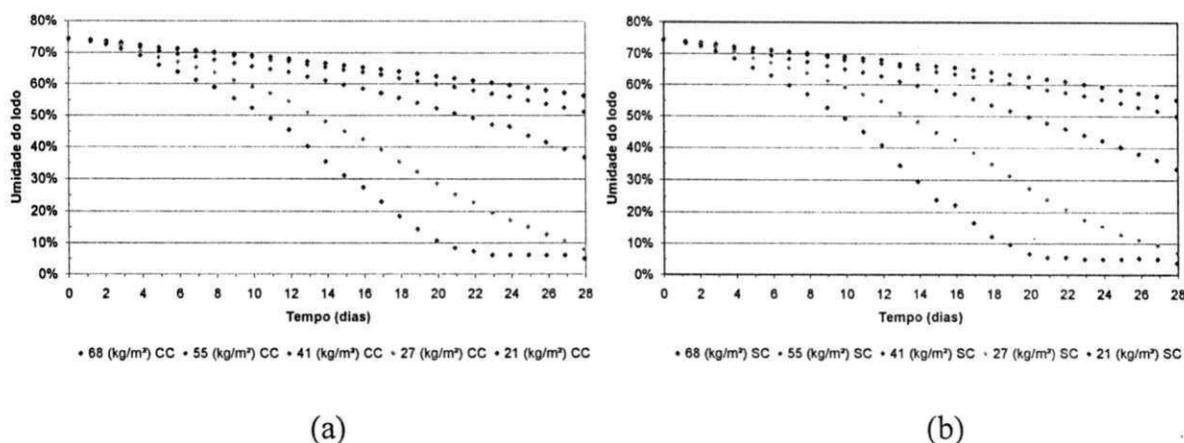


Figura 5.15 Gráfico da dessorção de umidade do lodo para 5 carregamentos distintos e dois tipos de leitos: (a) Cobertos e (b) Descobertos, em um período de 28 dias (4 semanas)

Os leitos carregados com $27\text{kgSST}/\text{m}^2$ apresentaram uma umidade de 10% em 27 dias, conseqüentemente uma produtividade de $1\text{kgSST}/\text{m}^2.\text{dia}$. Já para a umidade de 50% o tempo necessário foi 10 dias, para o leito descoberto, e 11 dias para o leito coberto, ocasionando respectivamente produtividades de 2,7 e $2,6\text{kgSST}/\text{m}^2.\text{dia}$, evidenciando que quanto menor a umidade exigida menor será a produtividade.

O processo de evaporação cessará quando o lodo se encontrar na umidade de equilíbrio, que dependerá da umidade relativa do ar ambiente, podendo ser visualizado na Figura 5.15 que este valor, para a cidade de Campina Grande-PB, está próximo de 5%.

Para uma umidade desejada de 50% o leito com carga de 55kgSST/m² apresentou uma produtividade de 2,0kgSST/m².dia. A Tabela 5.4 indica as produtividades obtidas para umidades desejadas de 10, 20, 30, 40, e 50 e 60%, para umidade inicial próxima de 75%, durante um período de exposição razoável (28 dias), para os dois tipos de leitos, mostrando que o tipo de cobertura utilizado, não impede a passagem dos raios solares, e nem impede a circulação natural dos ventos.

Tabela 5.4 Produtividade da evaporação nos leitos de secagem

Carga	Umidade Final do lodo (%)					
	60	50	40	30	20	10
I	2,6	1,9	1,6	1,3	1,2	1,0
II	2,7	1,9	1,6	1,4	1,2	1,0
III	2,7	2,0	1,5	-	-	-
IV	2,8	2,0	-	-	-	-
V	2,8	-	-	-	-	-

Mesmo com produtividade superior, os leitos com carga V, necessitam de 24 dias para produzir um lodo com umidade 60%, enquanto os leitos com carga I, necessitam de 8 dias. Por exemplo, para uma descarga de 1tonSST, com teor de umidade de 75%, e uma umidade final de 60%, para a carga do leito V seriam necessários aproximadamente 15m², caso fosse escolhida a carga do leito I seria necessária uma área de 48m². Para uma carga de 15 kgSST/m², apesar do tempo ser menor, seriam necessários aproximadamente 70m².

O lodo com umidade inicial de 75% e umidade final desejada de 10%, pode ser obtido num intervalo de 21 dias e 27 dias para as cargas I e II, respectivamente. Caso a frequência dos descartes seja de 27 dias, a carga mais indicada será de 27kgSST/m².

Em uma massa de 28ton de lodo com umidade de 75%, a massa de água contida é de 21ton, e a massa de sólidos é 7ton. Com a redução para 60% a massa de água remanescente é de 10,5ton, Se a umidade final desejada for 10% essa perda será de 20,2ton, restando apenas 800kg de água, remanescendo 7,8ton de lodo, que representa uma redução de 72% da massa a ser transportada para destino final.

Uma redução da umidade do lodo de 75% para 50% representa uma perda de 50% da massa total, então o custo transporte, que é calculado pela tonelada por quilometro transportado, reduzirá também em 50%, mostrando assim a vantagem de se secar o lodo antes de transportá-lo.

Os leitos LC IV e LD IV apresentaram uma produtividade de secagem de $2\text{kgSST}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$ para umidade de 50%, alcançando esta umidade em 28 dias. Enquanto os leitos LC II e LD II com uma produtividade de $1,9\text{kgSST}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$ alcançaram umidade de 50% em apenas 11 dias. Porém a área necessária ao carregamento dos leitos com carga de $27\text{kgSST}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$ é 2,6 vezes maior que para o carregamento do leito II.

Um descarte de 10tonSST com umidade de 75%, proveniente de centrifuga, tem uma massa total de 40ton , sendo 30ton de água. Para uma umidade final de 10%, com a carga IV seriam necessários 182m^2 , em um tempo de 28 dias. Para a carga do leito I seriam necessários 477m^2 em 11 dias. Sendo a massa evaporada no fim da secagem de 29ton , restando apenas 11ton , implicando em uma redução de 72,5% no peso a ser transportado.

Evaporação Média nos Leitos de Secagem

A evaporação nos leitos de secagem é determinada pela perda de massa de água. Para tanto é necessário o acompanhamento da massa de lodo. Determina-se a altura evaporada a partir da diferença de massa num intervalo de tempo.

As Figuras 5.16 e 5.17 mostram a altura evaporada equivalente em milímetros para os leitos descobertos e cobertos, respectivamente, em um no período experimental que compreende 155 dias. Onde se percebe o efeito das precipitações, que alteram a curva da evaporação dos leitos de forma a retardar o processo de secagem. O leito LD V absorveu mais de 40mm de água, enquanto LC V absorveu pouco menos de 30mm , devendo-se isto a ineficiência da cobertura em impedir a passagem da água da chuva para o interior do leito. Este ganho de massa pode ser reduzido, bastando na hora da chuva fecharmos a passagem do ar, de modo que a massa permanecerá constante.

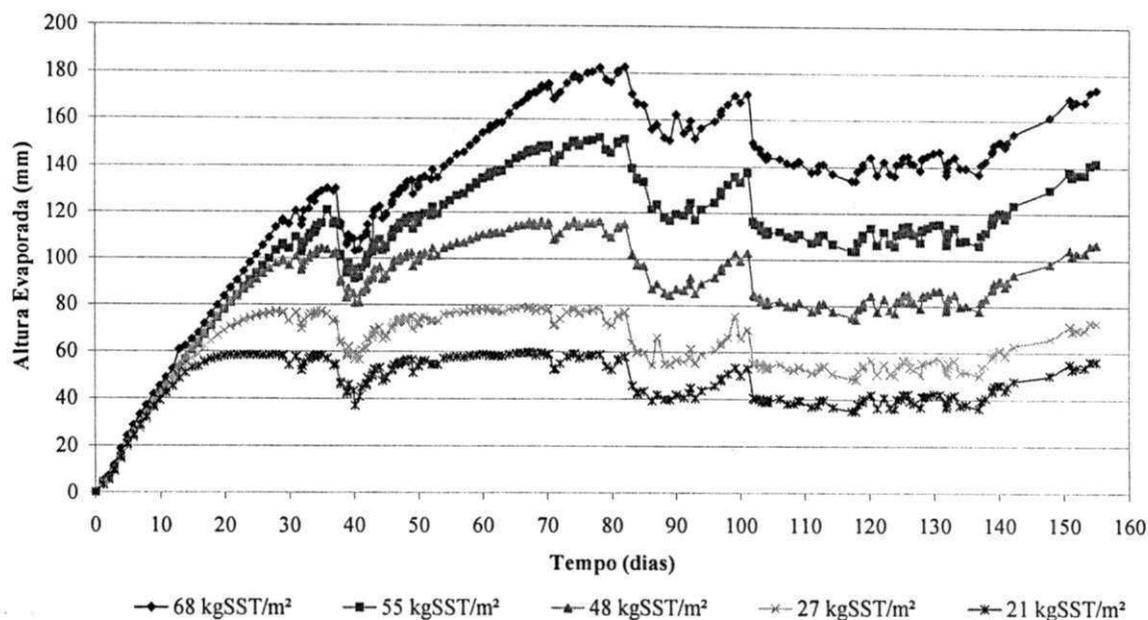


Figura 5.16 Altura evaporada (mm) para os leitos descobertos

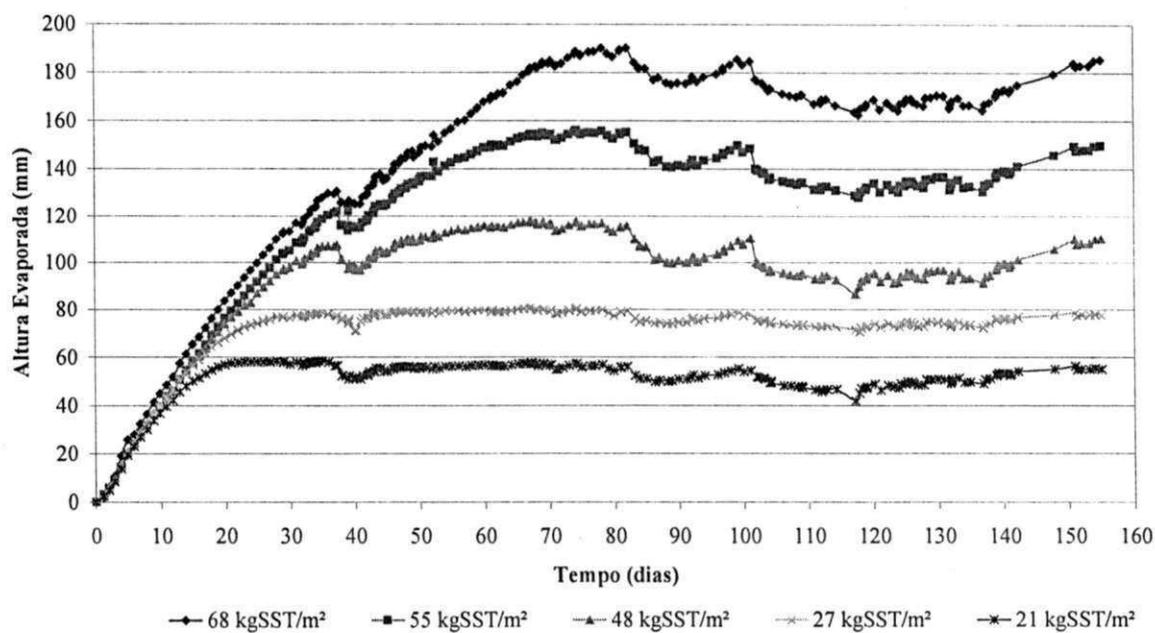


Figura 5.17 Altura evaporada (mm) para os leitos cobertos

Não houve variação significativa da evaporação nos leitos providos de cobertura e os sem cobertura no período que compreende as quatro primeiras semanas (período de estiagem). Para os primeiros 10 dias do experimento a taxa de evaporação foi praticamente igual, para ambos os tipos de leitos, assumindo um valor de 4mm/dia.

A influência da chuva nos leitos de secagem foi analisada num período de 3 dias, onde eram simuladas precipitações de 10mm em cada dia, totalizando 30mm. Para este teste foi utilizado para isto lodo anaeróbio proveniente de UASB, e duas cargas distintas. A Figura 5.18 mostra os resultados obtidos para a fração da precipitação que fica retida na camada de lodo.

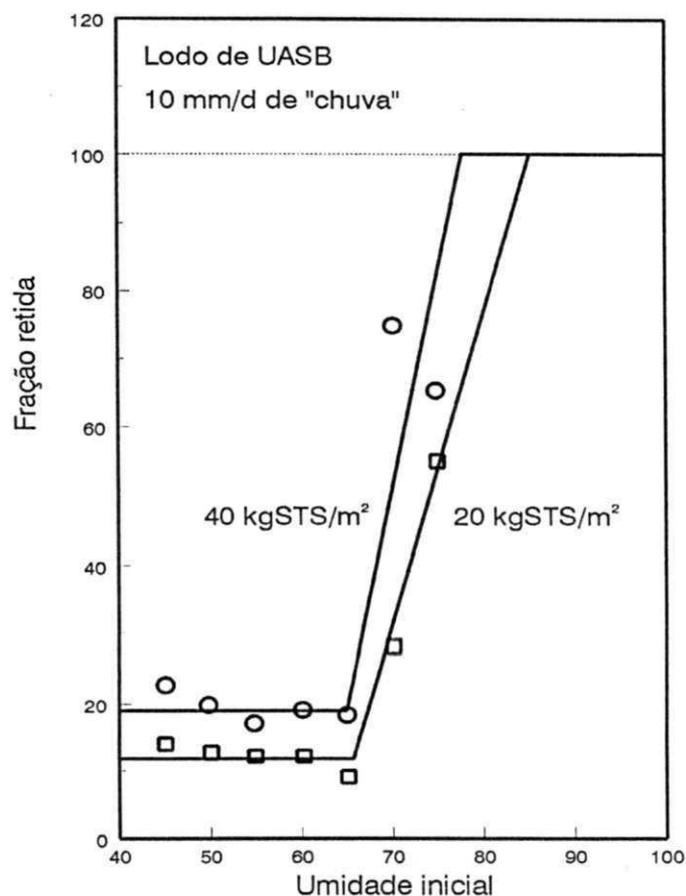


Figura 5.18 Fração retida da precipitação sobre leitos de secagem

Para umidades inferiores a 65% grande parte da precipitação percola, sendo retidas frações de 12% para os leitos com carga de 20kgSST/m², e 18% para os leitos com carga de 40kgSST/m². Quando a umidade se encontra com valores superiores a 65% esta parcela é aumentada, ficando retida grande parte, e para umidades acima de 80% não haverá percolação devido a massa de lodo se encontrar com forma pastosa, sem a presença das fendas, que são os espaços por onde percola a água.

5.1 Parâmetros meteorológicos de Campina Grande no ano 2005

É importante saber como se comporta não só a radiação como também a umidade e a temperatura do ar, e a precipitação, pois estes elementos determinam as condições climatológicas da região, e conseqüentemente o poder de evaporação, no caso em estudo, do lodo estabilizado em reator UASB.

Os dados apresentados a seguir se referem à cidade de Campina Grande, no ano de 2005, sendo valores médios, com intervalos de leitura de 10 minutos, para a radiação global (R_g), a temperatura do ar (T_{AR}), e a umidade relativa do ar (f), e a precipitação como sendo o somatório para cada mês. Já a energia foi calculada pela integração da radiação, sendo então convertida para kWh.

Tabela 3.0 Parâmetros meteorológicos de Campina Grande no ano 2005

MESES	R_g (W/m ² dia)	f (%)	T_{AR} (°C)	Precipitação (mm)	Energia Radiada (MJ/m ² dia) (kWh/m ² dia)	
Janeiro	249	69,81	25,4	51,20	21,51	5,98
Fevereiro	236	73,35	25,3	20,00	20,39	5,66
Março	249	73,48	25,6	100,20	21,51	5,98
Abril	212	77,34	24,7	24,70	18,32	5,09
Maio	177	83,10	23,4	189,30	15,29	4,25
Junho	137	88,79	21,6	211,70	11,84	3,29
Julho	183	82,30	21,2	36,20	15,81	4,39
Agosto	176	84,38	20,9	115,10	15,21	4,22
Setembro	230	76,88	22,3	9,90	19,87	5,52
Outubro	230	72,46	23,4	9,50	19,87	5,52
Novembro	253	70,28	24,3	1,00	21,86	6,07
Dezembro	243	72,67	24,3	13,70	21,00	5,83

O mês que apresentou maior disponibilidade energética foi novembro com uma radiação média de 253Wm⁻², que corresponde a uma energia de 6,07 kWh por dia, e umidade relativa do ar de aproximadamente 70%. Janeiro apresentou a menor média da umidade relativa do ar de 69,81%, porém o dia 7 de março foi o dia que apresentou maior

temperatura (34°C), às 16h, sendo a umidade relativa do ar mínima nesse instante (27,8%), conforme visto na Figura 5.19.

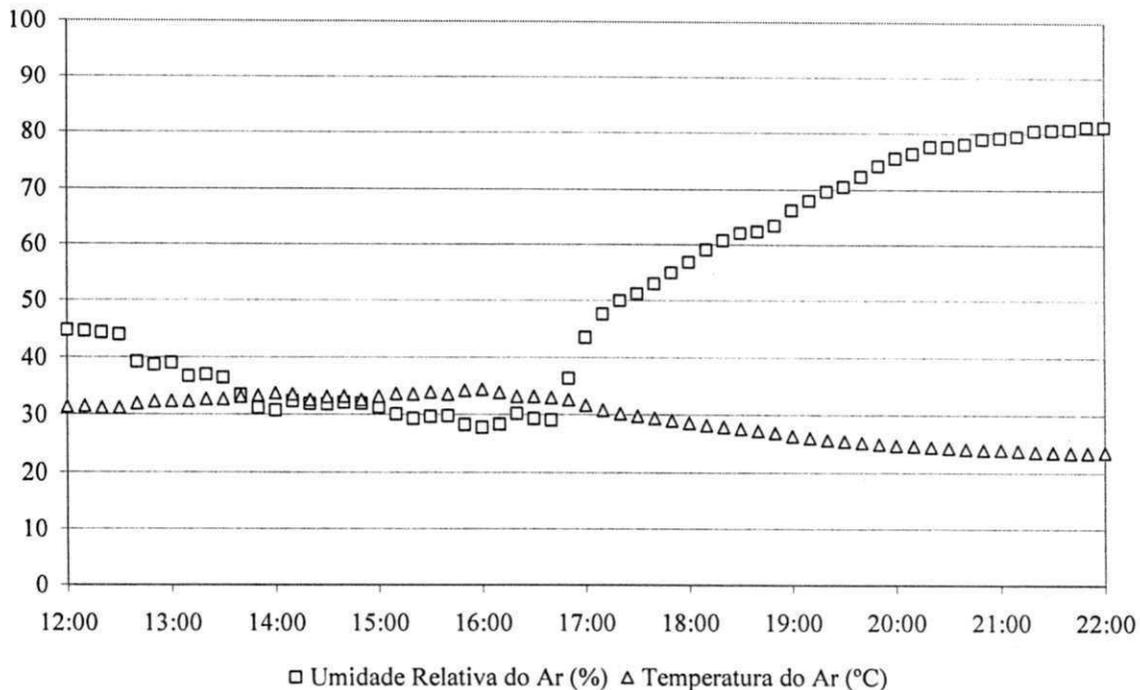


Figura 5.19 Umidade Relativa do ar, e temperatura do ar no dia 7 de março de 2005

Para podermos compreender o que ocorre com a umidade no momento da chuva, foi construído o gráfico do dia 2 de maio, que foi o dia com maior precipitação no período de 10 minutos, 13,8mm, em um total precipitado no dia de 28,7mm. A Figura 5.20 mostra que a umidade fica bem próxima de 100%, devido a precipitação, mostrando que quando do início da chuva há um aumento rápido da umidade relativa e uma diminuição brusca da temperatura.

Junho foi o mês com maior precipitação, sendo responsável por 27% de todas precipitações anuais, que chegou a 782mm, já o mês de novembro se apresentou o mais seco, praticamente sem chuvas. A Figura 5.21 mostra a distribuição das precipitações para o ano de 2005, na estação automática da UFCG, situada no Campus I. A partir de setembro as chuvas são difíceis de acontecer, então se espera uma maior produtividade nos meses de estiagem. As precipitações ocorreram com maior intensidade no ano de 2005 nos meses de junho a agosto. Os meses que chovem a umidade relativa do ar chega a valores superiores a 83% que é o período que compreende maio à agosto.

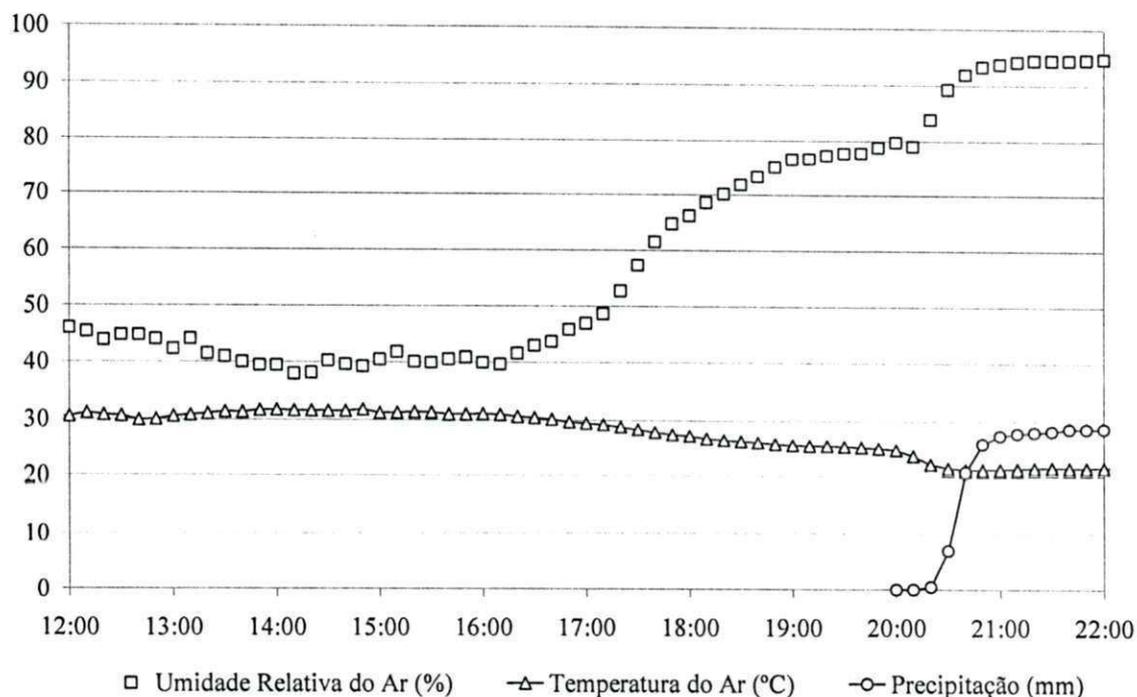


Figura 5.20 Umidade Relativa do ar, temperatura do ar e precipitação no dia 02/05/2005.

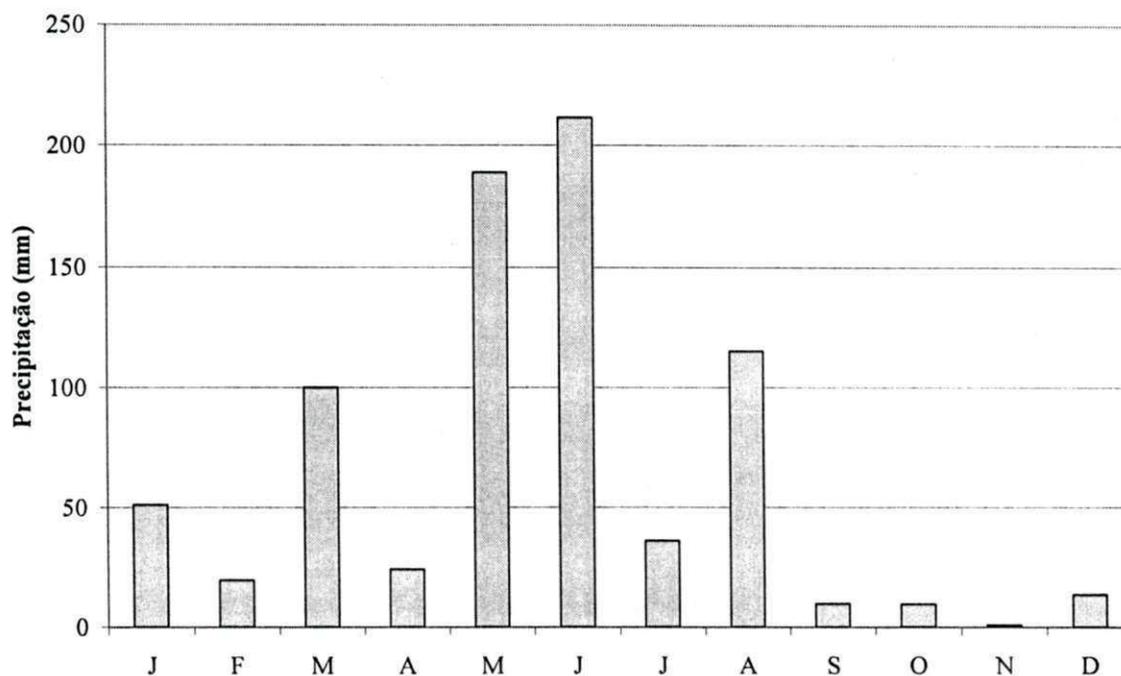


Figura 5.21 Precipitações (mm) na cidade de Campina Grande no ano de 2005.

Os meses de maio e junho foram os que apresentaram precipitações mais expressivas, sendo estes dois meses responsáveis por 51% de toda precipitação anual. Podendo dizer que a estação chuvosa começa em março e a partir de setembro as chuvas são menos significativas.

5.2 Modelagem Matemática

No processo de secagem natural a evaporação depende de fatores climatológicos tais como, a radiação solar, umidade relativa do ar, temperatura do ar, velocidade e direção do vento, nebulosidade e das precipitações.

Esta modelagem consiste inicialmente em associar dois fatores: (1) radiação solar; e (2) umidade do lodo, para estimar a massa evaporada em um dia. O tempo necessário para evaporação dependerá ainda, da carga e da umidade final desejada. Quanto maior a radiação, e a umidade do lodo, maior será a evaporação. As chuvas causam um aumento na massa do lodo, de modo a aumentar a altura d'água equivalente no lodo.

A altura equivalente de água no lodo é um parâmetro que compara a massa d'água contida no lodo, com uma lâmina de água pura. A Figura 5.22 indica a altura equivalente de água para diferentes cargas.

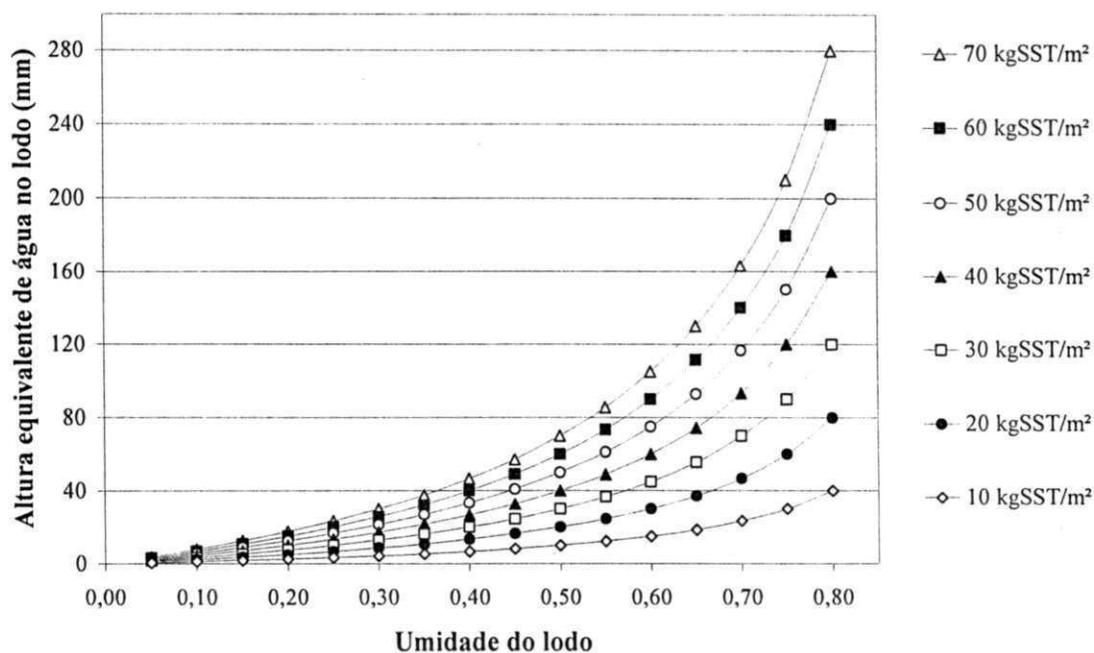


Figura 5.22 Altura equivalente de água no lodo (mm) em função da umidade para cargas de lodo variando de 10 a 70kgSST/m².

A massa d'água evaporada no lodo pode ser estimada, como sendo a razão entre uma parcela da energia radiada, a energia efetiva utilizada para evaporação, e o calor latente de vaporização da água:

$$m_{EV} = R_n (R_g \cdot A \cdot t) / L_v \quad (5.4)$$

Como a radiação global (R_g) é medida em W/m^2 e a parcela efetiva da energia depende da umidade no lodo, conforme equação 5.3, então para 1 dia (86.400 s), a massa evaporada por metro quadrado, será:

$$m_{EV} = 0,021RU \quad (5.5)$$

onde, m_{EV} : massa de água evaporada (kg/dia);

R : radiação global (W/m^2);

U : umidade do lodo.

Considerando a massa específica da água $1000kg/m^3$, tem-se que a evaporação de 1kg de água, em um metro quadrado, equivale a uma altura de 1mm, podendo assim ser estimada como:

$$h_{EV} = 0,021RU \quad (5.6)$$

sendo, h_{EV} : Altura equivalente de água evaporada (mm/dia).

Num determinado período, a massa evaporada diariamente, assume caráter decrescente para uma mesma radiação, a evaporação média diária, nesse período:

$$\bar{h} = 0,021R_m \left(\frac{H_f + H_i}{2} \right) \quad (5.7)$$

onde, \bar{h} : evaporação média (mm/dia);

R_m : radiação média no período (W/m^2);

H_f e H_i : umidade final e umidade inicial do lodo.

O tempo necessário para evaporar uma determinada altura de água no lodo será o quociente dessa altura pela evaporação média diária. Esse tempo dependerá da umidade inicial e da umidade desejada, da carga, e da radiação solar, podendo ser expresso como sendo:

$$T_S = \frac{h_o - h_f}{h} \quad (5.8)$$

onde, T_S : Tempo de secagem (dia);

h_o : Altura inicial de água no lodo (mm);

h_f : Altura final de água no lodo (mm).

A partir da Figura 5.22 que apresenta a altura equivalente de água para cargas de 10 a 70kgSST/m², determina-se a altura inicial e a altura final de água no lodo, mas como essas alturas dependem da umidade inicial e final, e da carga, como segue:

$$h_o = CsH_i/(1-H_i) \quad (5.9)$$

$$h_f = CsH_f/(1-H_f) \quad (5.10)$$

com a substituição das equações (5.9), (5.10) e (5.7) na equação (5.8), resulta que o tempo de secagem pode ser estimado como:

$$T_S = 46,5 Cs \left(\frac{U_i/(1-U_i) - U_f/(1-U_f)}{R_m \left(\frac{U_i + U_f}{2} \right)} \right) \quad (5.11)$$

Deste modo o tempo necessário para secar uma carga de lodo de 30kgSST/m², com 80 % de umidade para 50%, numa região onde a radiação solar média seja 200W/m² será:

$$T_S = 46,5 \times 30 \left(\frac{0,80/(1-0,80) - 0,50/(1-0,50)}{200 \left(\frac{0,80 + 0,50}{2} \right)} \right) = 32 \text{ dias}$$

Para a mesma carga aplicada (30kgSST/m²), e uma radiação de 250W o tempo seria reduzido para 25 dias, uma diferença de 7 dias, aumentando assim a produtividade de secagem de 0,94 para 1,2 kgSST/m².dia.

A produtividade de secagem dos leitos de secagem é afetada pela radiação e pela umidade inicial. Na Figura 5.23 encontra-se a produtividade (kgSST/m².dia) dos leitos em função da umidade final desejada, para umidades iniciais de 70, 75 e 80%, em uma região onde a radiação solar média é de 200W.

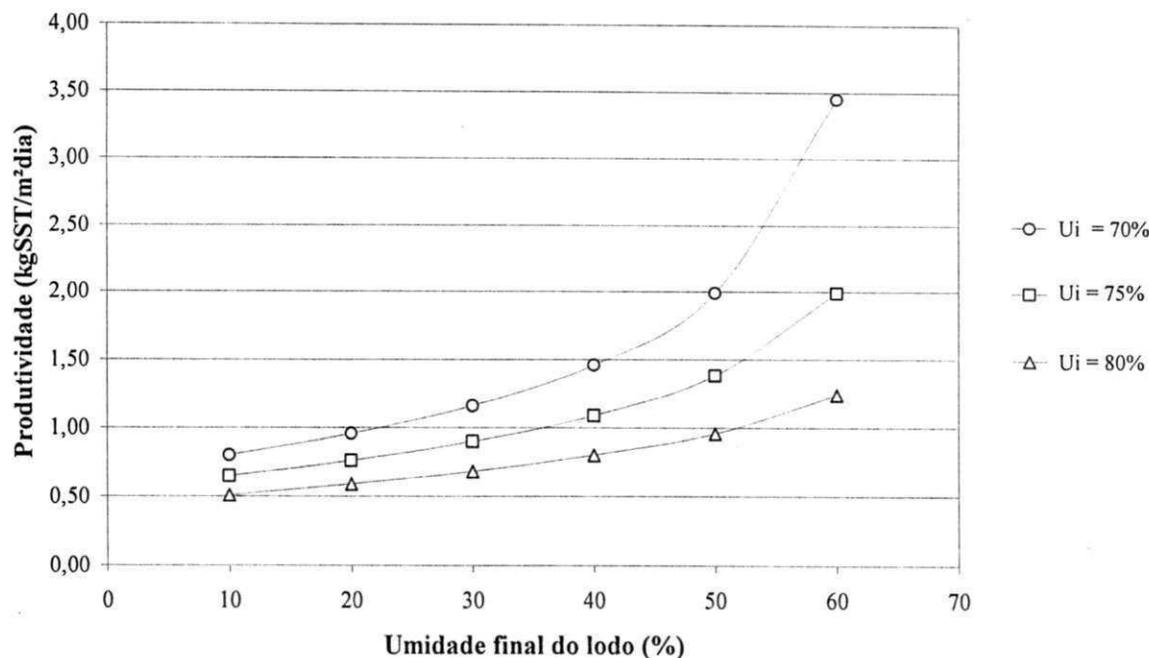


Figura 5.23 Produtividade de Leitos de Secagem (kgSST/m².dia) para umidades iniciais de 70, 75 e 80% para um radiação solar diária de 200W.

Percebe-se que a produtividade de secagem para umidade final de 50% chega a dobrar, quando comparadas as umidades iniciais de 80% e 70%, ocasionando assim em uma redução de área de 50%.

A radiação solar assume valores diários diferentes ao longo do ano, no caso da localidade em estudo, conforme Figura 5.9, em março de 2005 a média mensal foi de 236W, enquanto em junho de 2005 foi apenas 130W. A produtividade nos leitos de secagem será maior no mês de março. A produtividade do leito dependerá não só da carga, mas da umidade inicial, umidade final e da radiação solar.

Fazendo uso da modelagem, foi simulada a curva da produtividade partindo de uma umidade inicial de 80% para radiações de 150 a 250W, como se vê na Figura 5.24, na qual pode ser visto que a produtividade tem caráter crescente com a radiação. Para umidade final de 10% a produtividade foi estimada em 0,4, 0,5 e 0,6 kgSST/m².dia para radiações de 150, 200 e 250W, respectivamente.

A importância de se conhecer o perfil da radiação solar ao longo do ano consiste na possibilidade de se determinar também uma curva de produtividade, de modo a determinar o período necessário à secagem, estando ainda relacionada ao regime de chuvas de cada localidade.

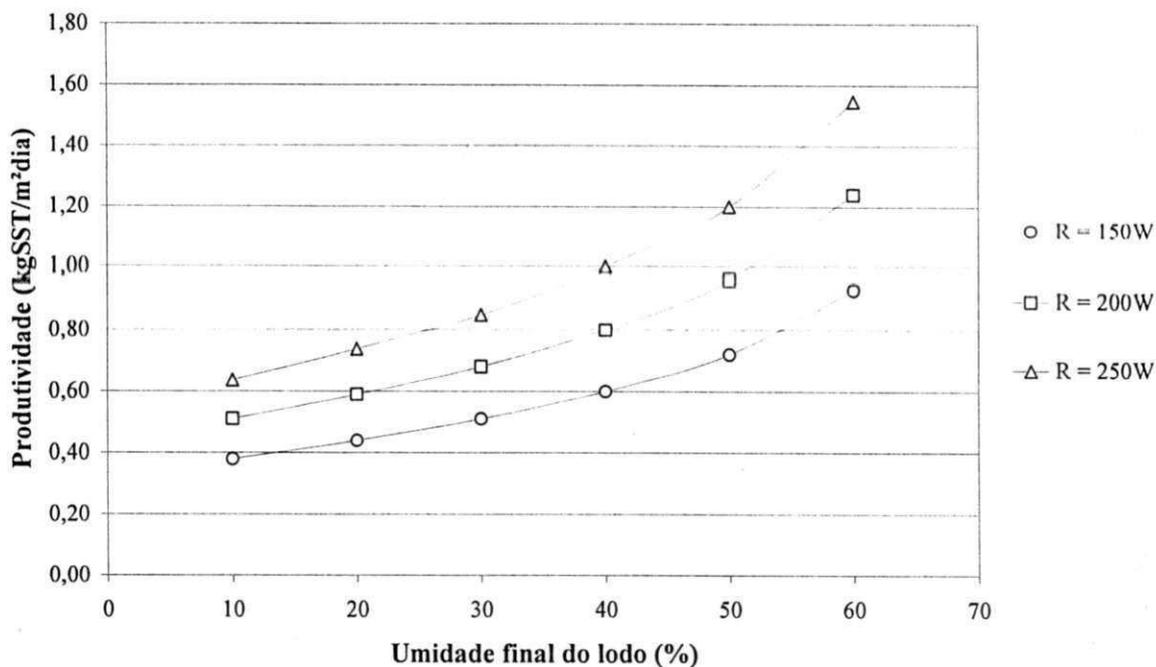


Figura 5.24 Produtividade em leitos para radiações distintas e umidade inicial de 80%

Para uma radiação de 200W e uma umidade final de 10% a produtividade em leitos chega a 0,5kgSST/m².dia, e 0,8kgSST/m².dia para umidade de 40%. Caso a radiação seja 250W a produtividade pode assumir valores de 1,0, e 1,2 kgSST/m² para umidades finais de 40% e 50% respectivamente. Podendo-se notar que a produtividade de secagem dependerá do grau de secagem e também das condições atmosféricas da localidade, variando ainda com o tempo, de modo que determinados meses do ano apresentam uma produtividade maior.

A taxa de evaporação diária decresce com a umidade, de modo que lodos secos têm a taxa de evaporação inferior a lodos úmidos. De posse da perda de massa, estimada pela equação (5.4), pode-se simular a curva de dessorção da umidade do lodo. A Figura 5.25 mostra a evolução da perda de massa, através da curva de evaporação. Na Figura 5.26 encontra-se a curva da dessorção da umidade do lodo, para uma umidade inicial de 80% e radiação de 200W, para cargas de 15 a 35 kgSST/m².

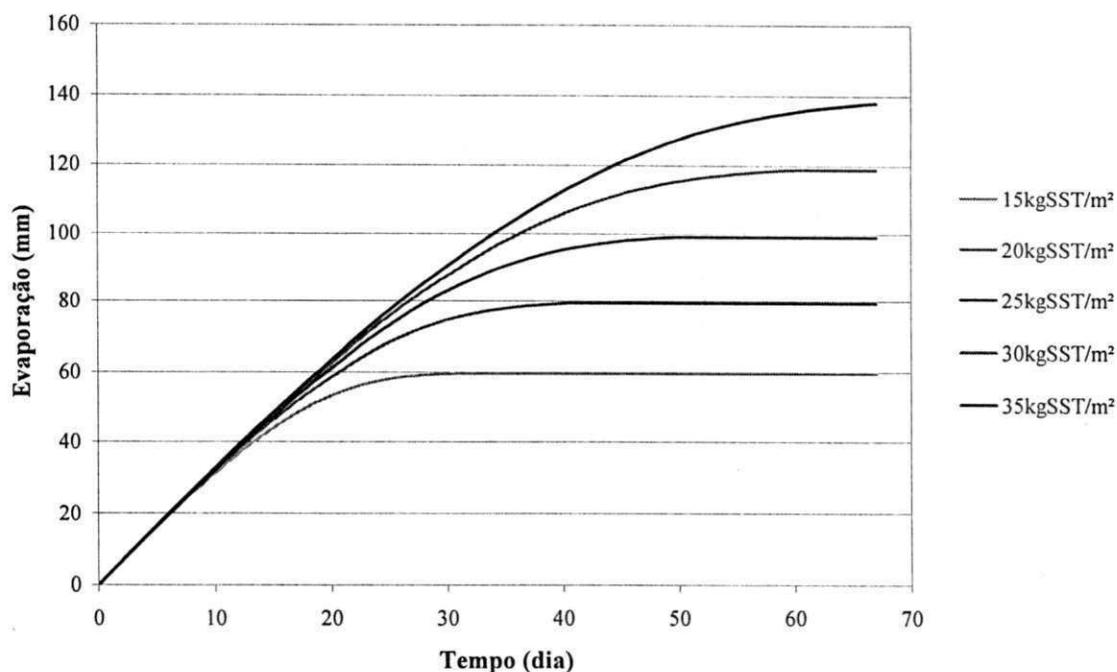


Figura 5.25 Curva da evaporação para cargas de 15 a 35kgSST/m²

O processo de secagem cessará quando o lodo tiver sua umidade em equilíbrio com o meio ambiente, o que dependerá da umidade relativa do ar. Não havendo evaporação para essa umidade, o lodo permanecerá com sua altura evaporada constante. No caso do leito com carga de 15kgSST/m², a evaporação tem seu fim em 30 dias, correspondendo a uma altura evaporada de água de 60mm.

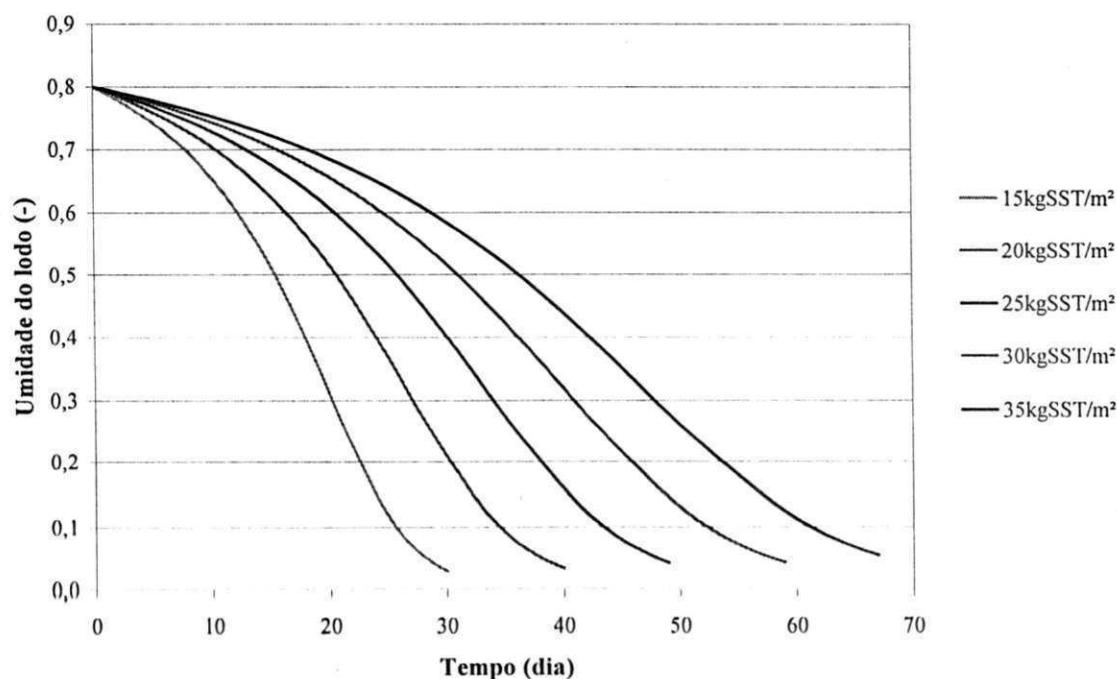


Figura 5.26 Curva da dessorção da umidade do lodo para cargas de 15 a 35kgSST/m²

As Figuras 5.27 e 5.28 representam os valores obtidos experimentalmente para os leitos descobertos referentes ao período de 17 de fevereiro a 17 de março de 2005, para a umidade e a altura evaporada, respectivamente. Nessas figuras os pontos representam os valores obtidos experimentalmente e a curva representa os valores obtidos segundo a modelagem.

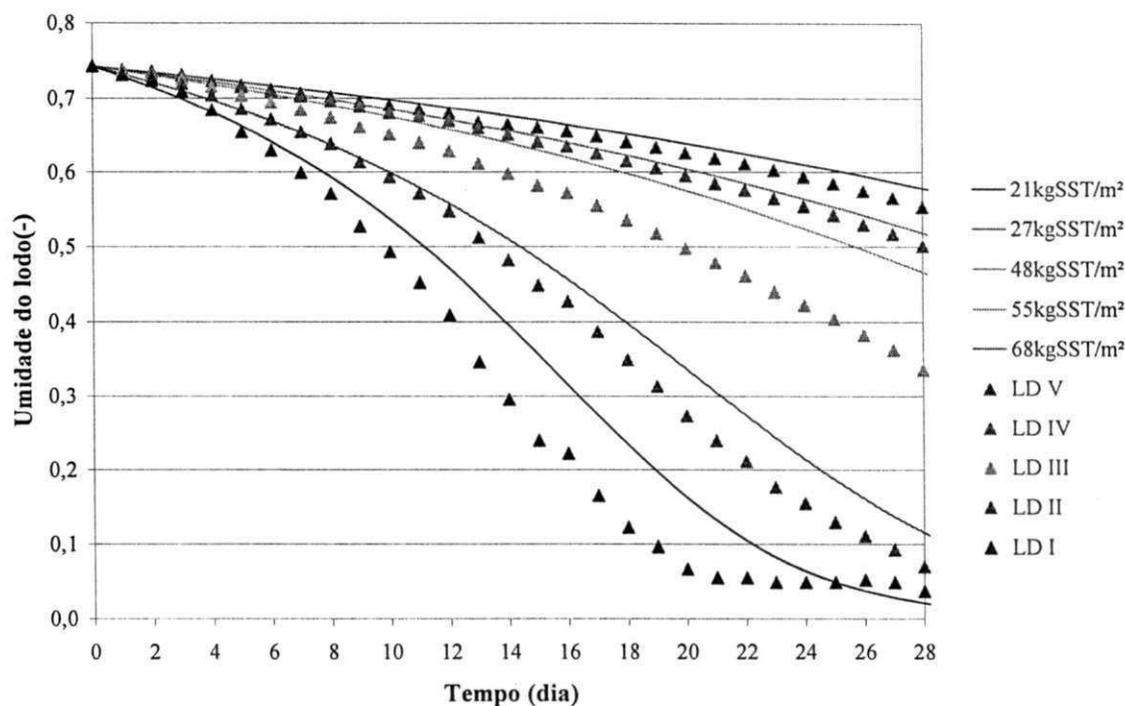


Figura 5.27 Dessorção da umidade do lodo nos leitos descobertos, e suas aproximações.

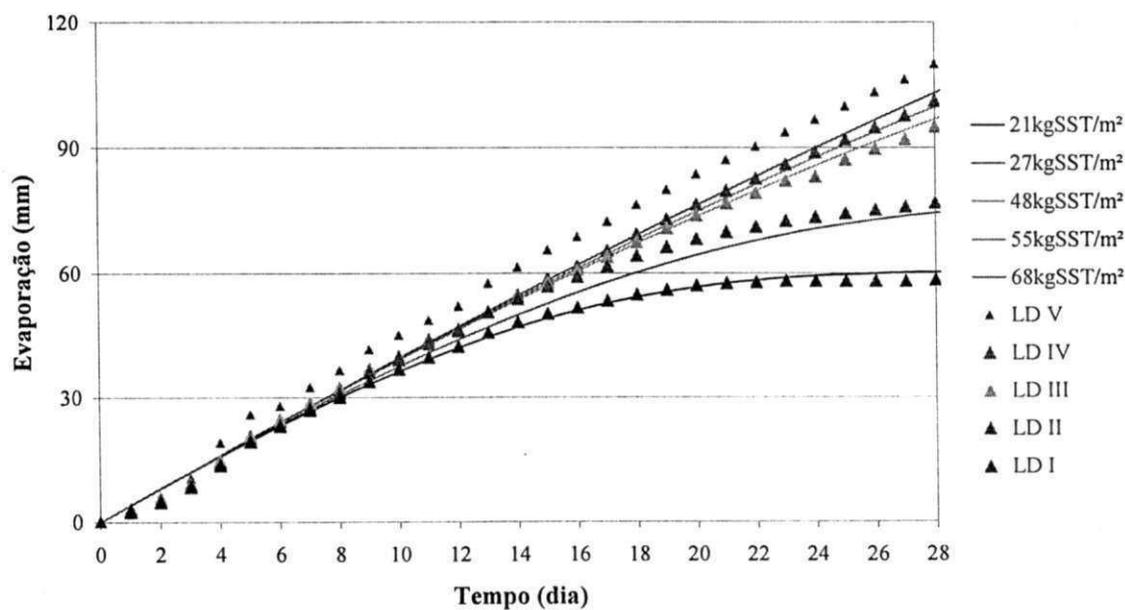


Figura 5.28 Altura evaporada (mm) nos leitos descobertos, e suas aproximações.

5.3 Secagem por ar comprimido

Tendo como objetivo estudar a desidratação do lodo anaeróbio proveniente de reator UASB, analisou-se o efeito causado pela passagem forçada, ascensional de ar, sobre uma camada de lodo, já percolado com umidade inicial próxima a 70%. O ar efluente tende a ser saturado, de modo que quanto maior a temperatura do ar, e menor a umidade do ar afluente, maior será a retirada d'água do lodo, sendo esta sob a forma de vapor. Num período de 45 dias a taxa de evaporação média foi de 3,6mm/dia para o leito com carga de 82 kgSST/m² (0,25m), 4,6mm/dia para o leito com carga de 168 kgSST/m² (0,50m) e 5,6mm/dia para o leito com carga de 312 kgSST/m² (1,00m). A Figura 5.29 mostra a evolução da dessorção do lodo para os três leitos.

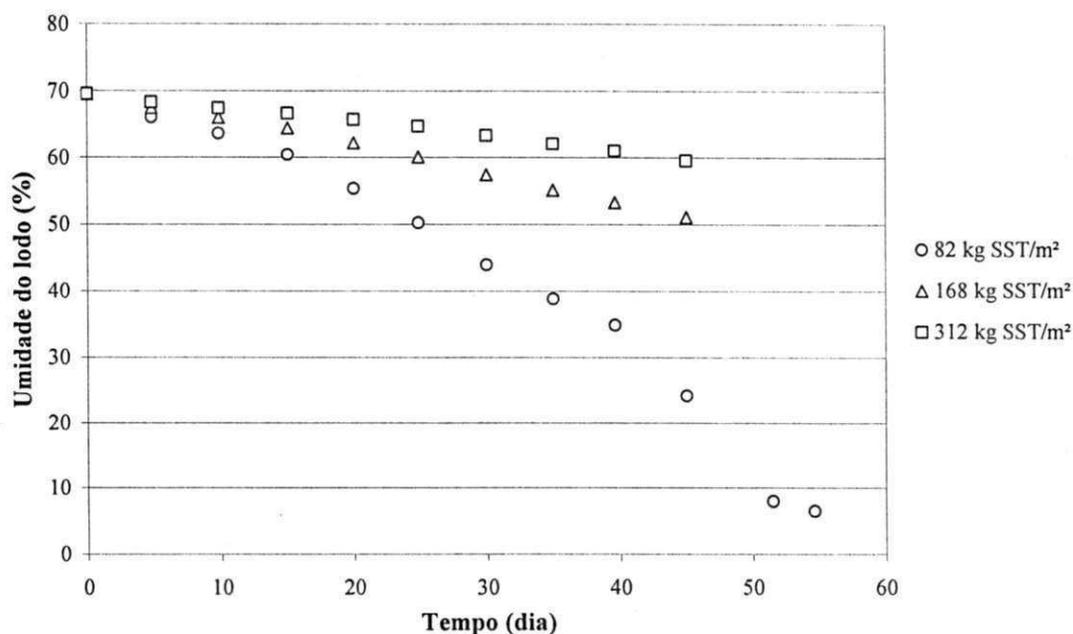


Figura 5.29 Curva de dessorção da umidade do lodo nos leitos tubulares.

Ao fim do experimento o leito com carga de 25cm de lodo, atingiu umidade de 7%, tornando-se um torrão bastante rígido. O mesmo não ocorreria em regiões onde a umidade relativa do ar fosse superior a 75%, onde se estabelece um equilíbrio entre as umidades, sendo, portanto, o valor máximo do teor de sólidos inferior a 93%, ou seja, umidade mínima será maior que 7%. Embora o tempo seja longo, o lodo atingiu umidade de 10% num período de 50 dias, de modo que a produtividade de secagem foi de 1,6kgSST/m².dia. Nos leitos expostos às condições atmosféricas, conforme Tabela 5.4, esse valor foi 1,0 kgSST/m².dia, para os leitos carregados com 21 e 27kgSST/m².

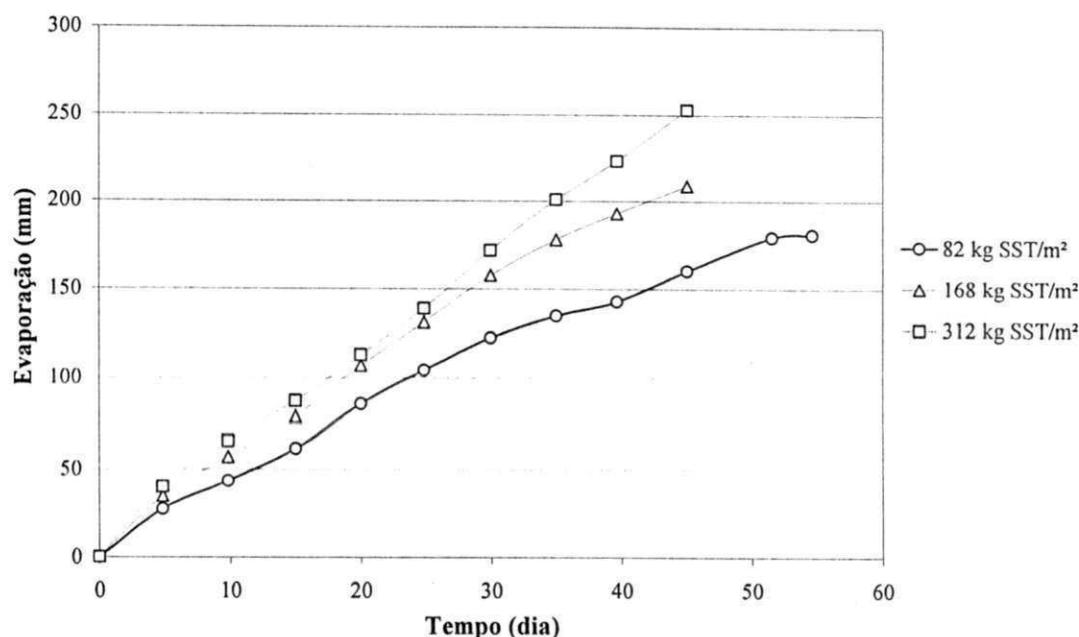


Figura 5.30 Curva de evaporação dos leitos tubulares

Para a mesma vazão de ar insuflada houve uma diferença na redução da massa do lodo. Com uma evaporação de 250mm, o leito com carga de 312kgSST/m², conseguiu atingir uma umidade de 60%. Enquanto o leito carregado com 168kgSST/m², evaporou 210mm, e teve sua umidade reduzida para 50%. A passagem do ar pelo lodo foi capaz de remover uma determinada quantidade de água, através de absorção, tendo, além da vazão, a temperatura e a umidade relativa do ar como principais fatores que determinam a quantidade de água que pode ser absorvida pelo ar.

A remoção de água do lodo dependerá de fatores climatológicos, de modo que, será mais eficiente durante o dia, pois a temperatura elevada e a umidade relativa do ar baixa propiciam uma maior absorção da água pelo ar. O contrário ocorre à noite; temperatura baixa e umidade relativa do ar alta implicam numa menor absorção da água pelo ar.

Quanto maior a temperatura do ar, maior a sua capacidade em reter água, de modo que 1m³ de ar com umidade relativa de 75% e temperatura de 25°C, quando saturado, tem sua massa de água aumentada de 16g para 21g. Para a mesma umidade e a temperatura de 30°C essa massa seria aumentada de 20g para 27g. Ainda para a mesma umidade e a temperatura de 70°C a massa aumentaria de 136g para 181g, removendo assim 45g em cada metro cúbico de ar. Para uma temperatura de 100°C e uma umidade relativa do ar de 60%, o ar tem a capacidade de absorver cerca de 302g em cada metro cúbico, caso a

umidade do ar fosse 10% a remoção poderia chegar a 679g. Daí a vantagem do ar seco, na entrada do sistema.

Em Campina Grande, onde a umidade relativa do ar está próxima de 70%, e temperatura média do ar é de 25°C, a passagem do ar através do lodo é capaz de remover no máximo 6,35g em cada metro cúbico de ar insuflado. A Figura 5.31 mostra os parâmetros umidade relativa do ar (%) e temperatura do ar (°C), durante o período do experimento, iniciado em 24/05/2005 e tendo seu término em 18/07/2005.

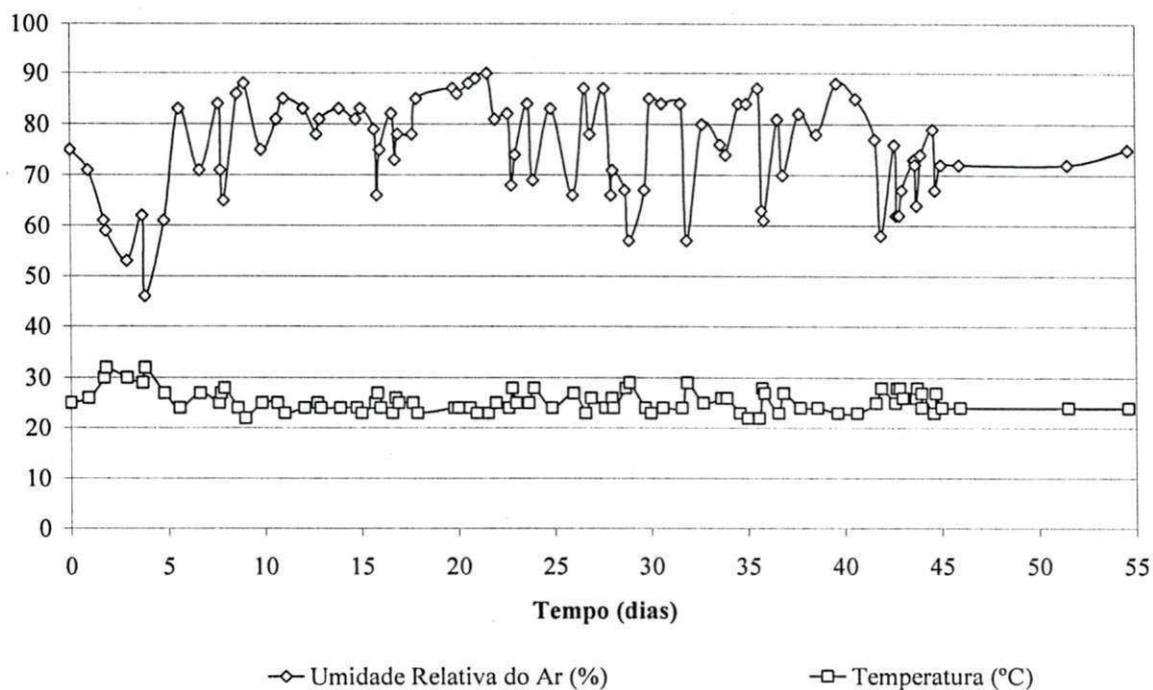


Figura 5.31 – Umidade relativa do ar (%) e temperatura do ar (°C) no período de 24/05/05 a 18/07/05 em Campina Grande – PB

Secagem por ar comprimido e aquecido

Continuando como objetivo estudar a desidratação do lodo anaeróbio proveniente de reator UASB, foi analisado o efeito causado pela passagem forçada, ascensional de ar, sobre dois leitos carregados com 50cm de lodo com umidade de 73,3%, correspondendo a uma carga de 116kgSST/m², sendo o ar aquecido a 70°C em um dos leitos e o outro sem aquecimento.

O leito provido de sistema de aquecimento conseguiu um lodo com umidade inferior a 10% em 35 dias, enquanto o leito desprovido de aquecimento só atingiu umidade

inferior a 10% em 86 dias. No caso dessa carga de lodo, a altura evaporada foi de aproximadamente 300mm. A produtividade para umidade de 10% foi $1,35\text{kgSST}/\text{m}^2\text{dia}$ para o leito sem aquecimento e $3,31\text{kgSST}/\text{m}^2\text{dia}$ para o leito com sistema de aquecimento, o que mostra a vantagem do aquecimento do ar.

A evolução da evaporação nos dois leitos pode ser vista na Figura 5.32, sendo percebida uma maior inclinação na curva, para o leito com sistema de aquecimento, o que determina uma maior taxa de evaporação.

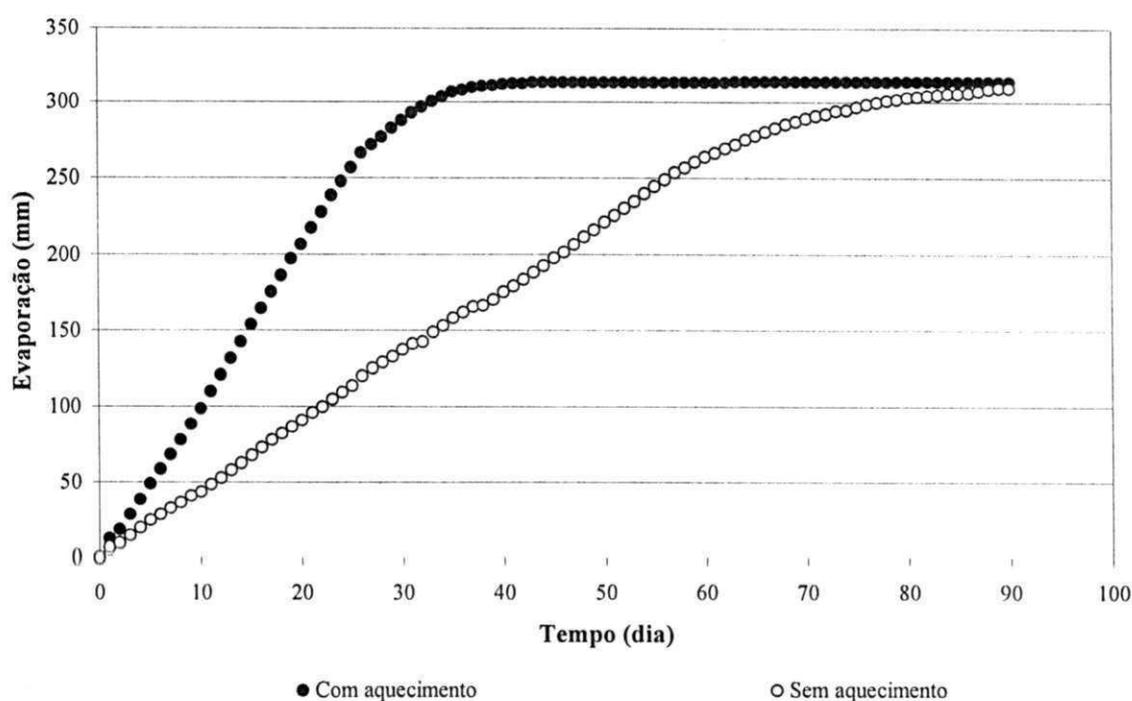


Figura 5.32 Curva de evaporação (mm) para leitos carregados com $116\text{ kgSST}/\text{m}^2$

O aquecimento do ar aumenta a concentração de água no ar efluente do leito, diminuindo assim o tempo necessário à secagem. Podendo ser notado que, para uma evaporação de 300mm, foi necessário um período de 30 dias enquanto o leito sem aquecimento atingiu essa evaporação em mais de 80 dias.

Existe a possibilidade de secar lodo através da passagem forçada de ar por uma camada de lodo. Para uma mesma vazão de ar insuflado, a remoção d'água será maior quanto maior for a temperatura e menor a umidade relativa do ar. A determinação desses parâmetros indica a remoção d'água do lodo, sendo observado que a parte inferior da camada de lodo seca primeiro que a superior, de modo que a remoção de lodo seco deve ser feita na parte inferior, e alimentado pela parte superior.

6. CONCLUSÕES

No dimensionamento de leitos de secagem natural de lodo devem ser considerados quatro fatores: a quantidade produzida de lodo, a frequência de descarte, condições climáticas e área disponível para o tratamento.

Os principais fatores que proporcionam a evaporação natural do lodo são os climatológicos, a umidade relativa do ar e a radiação solar. Portanto o dimensionamento e a otimização de leitos de secagem estão ligados diretamente a estes fatores.

Para determinar alguns parâmetros, tais como radiação solar e umidade final de uma carga de lodo, usou-se a modelagem matemática associada aos estudos de laboratório que proporcionaram explicitar estas grandezas em linguagem matemática e forneceram as seguintes conclusões dos diversos tipos de leitos e cargas.

Para os leitos cobertos:

- A cobertura transparente proporcionou um perfil de secagem igual aos leitos descobertos, durante um período de estiagem.
- A evaporação será maior quanto maior for a umidade do lodo e a radiação solar.
- Quanto maior a carga maior a evaporação, para cargas com mesma umidade inicial de lodo sob as mesmas condições atmosféricas.
- A evaporação cessa gradualmente ao longo do período de acordo com a graduação da carga, i.e., quanto maior a carga maior será o tempo de secagem.
- Portanto a carga de 48kgSSTm^{-2} é a melhor carga para um período de 30 dias, aproximando-se de seu ponto de equilíbrio.
- Caso o desejado seja apenas remoção de massa e não de umidade, deve-se utilizar a carga de 68kgSSTm^{-2} , porque enquanto maior a carga maior a evaporação, devido a diminuição da umidade ser mais lenta em cargas mais elevadas.

Para os leitos descobertos:

- O perfil da secagem segue o mesmo procedimento dos leitos cobertos, só que a pluviosidade é um problema crucial, porque repõe parte da água evaporada. Num período chuvoso não se deve utilizar este tipo de leito, porque a umidade do ar é

muito elevada e não ocorre praticamente evaporação, podendo no fim do período estimado o lodo ter umidade superior a inicial.

- As precipitações afetam de forma negativa a evaporação, de modo que para umidade do lodo superior a 65% é mais acentuada, ficando retida grande parte, enquanto para lodo com umidade inferior a este limite a água da chuva tende a percolar.

Portanto entre um tipo e outro, deve-se usar os leitos cobertos, pois apesar de manterem o mesmo perfil da secagem dos leitos descobertos, diminuem o efeito das precipitações, podendo ainda absorver umidade do ar. De modo que o ideal seria uma cobertura móvel, capaz de isolar o lodo e a atmosfera no momento da chuva. Obviamente este tipo de leito deve ser utilizado por ETEs que tratem os esgotos de uma população equivalente de 20000 habitantes.

A secagem artificial pode ser utilizada quando não há disponibilidade de terreno, podendo a mesma produzir lodo com umidade inferior a 5%, dependendo da umidade relativa do ar no momento da secagem. Detectou-se que:

- Quanto mais elevada a temperatura do ar, e mais seco for o ar, maior será a evaporação, devido sua capacidade de absorção da água do lodo.

- A secagem será otimizada quando o ar efluente for saturado.

Este tipo de secagem pode ser acelerado com o aproveitamento da energia solar no aquecimento do ar afluente, funcionando apenas durante o dia, pois durante a noite ocorre uma diminuição da temperatura do ar e uma elevação na umidade relativa do ar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS. Projetos de Estações de Estação de Tratamento de Esgoto Sanitário – NB570, 1989.

ACEPB – Atlas Climatológico do Estado da Paraíba. UFPB. 2ª ed. Campina Grande, 1987.

ADEME. *Connaissance et maîtrise des aspects sanitaires de l'épandage des boues d'épuration des collectivités locales*. 1998

ALÉM SOBRINHO, P. Tratamento de esgoto e geração de lodo. In: Bissólidos na agricultura. Capítulo 7. Sabesp. Escola Politécnica-USP, ESALQ-USP/Nupegel, UNESP – Jaboticabal. São Paulo, 2001.

ANDREOLI, C. V; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias; 6. Lodo de Esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001.

AYOADE, J. O. Introduction to climatology for the tropics. Department of geography. University of Ibadan. John Wiley & Sons. New York, 1983.

BEZERRA, S. M. C. Influência do tempo de detenção hidráulico sobre auto inoculação na partida de um reator UASB tratando esgoto sanitário. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. UFPB. Campina Grande, 1998.

CAMPOS, J. R.; *et alii*. Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo, PROSAB, ABES. Rio de Janeiro, 1999.

FILHO, C. F. M. Efeito da variação temporal da vazão sobre o desempenho de um reator UASB. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. UFPB. Campina Grande, 2000.

FRANCI, R. Gerenciamento de lodo de lagoas de estabilização não mecanizadas. PROSAB, 1999.

GUJER, W; ZENDHER, A. J. B. Conversion process in anaerobic digestion. Wat. Sci. Tech., Vol. 15. 1983.

JORDÃO, E. O; PESSOA, C. A. Tratamento de esgotos domésticos. Vol.1. 2ª edição. Cetesb. São Paulo, 1982.

MARA, D. D. Sewage treatment in Hot Climates – John Wiley e Sons Ltda. Chichester, England, 1976.

MEDEIROS, E. J. S. Estratégia para determinar a frequência e a magnitude de descargas de lodo de excesso de reatores UASB. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. UFPB. Campina Grande, 2000.

METCALF & EDDY. Wasterwater engineering: treatment, disposal and reuse. Metcalf & Eddy Inc, MacGraw-Hill. New York, 1991.

NASCIMENTO, R. S. Avaliação da remoção de matéria orgânica em reservatório profundo de estabilização. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. UFPB. Campina Grande, 1996.

O'ROURKE, J. T. Kinetics of anaerobic treatment at reduced temperature. Tese de PhD. Universidade de Stanford – Estados Unidos. Califórnia, 1968.

OMS. Health guidelines for the use of wasterwater in agriculture and aquaculture. Technical Report Series 778. World Helth Organization. Genevava, 1989.

PEDROZA, E. C. L.; *et alii*. Alternativas de uso de resíduos do saneamento. In: Aplicação de leitos de secagem de lodo gerado em estações de tratamento de esgoto. ABES. Rio de Janeiro, 2006.

QUADROS, S. A. Termodinâmica e a invenção das máquinas térmicas. Editora Scipione, São Paulo, 1996.

SAWYER, C. N; McCARTY, P. L.; PARKIN, G. F. Chemistry for environmental engineering. 4ª edição, McGraw-Hill. Singapore, 1994.

THOMAZ-SOCOOL, V.; PAULINO, R. C.; CASTRO, E. A. Metodologia para análise de parasitológica em lodo de esgoto. In: Manual de métodos para análises microbiologias e parasitológicas em reciclagem agrícola de lodo de esgoto. Andreoli & Bonnet. 2ª ed. Curitiba, 2000.

TIPLER, P. A. Física para cientistas e engenheiros. Volume 2 - Gravitação, Ondas e Termodinâmica. Editora Guanabara Koogan, 3ª edição. Rio de Janeiro 1994.

TSUTIYA, M. T. Características de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgoto. In: Biossólidos na agricultura. Capítulo 4. Sabesp, Escola Politécnica-USP, ESALQ-USP/Nupegel, UNESP-Jaboticabal. São Paulo, 2001.

TUBELIS, A; NASCIMENTO, J. L. Meteorologia descritiva – Fundamentos e aplicações brasileiras. Editora Nobel, São Paulo, 1980.

VAN HAANDEL. A. C; LETTINGA, G. Tratamento anaeróbio de esgotos. Um manual para região de clima quente. Campina Grande, 1994.

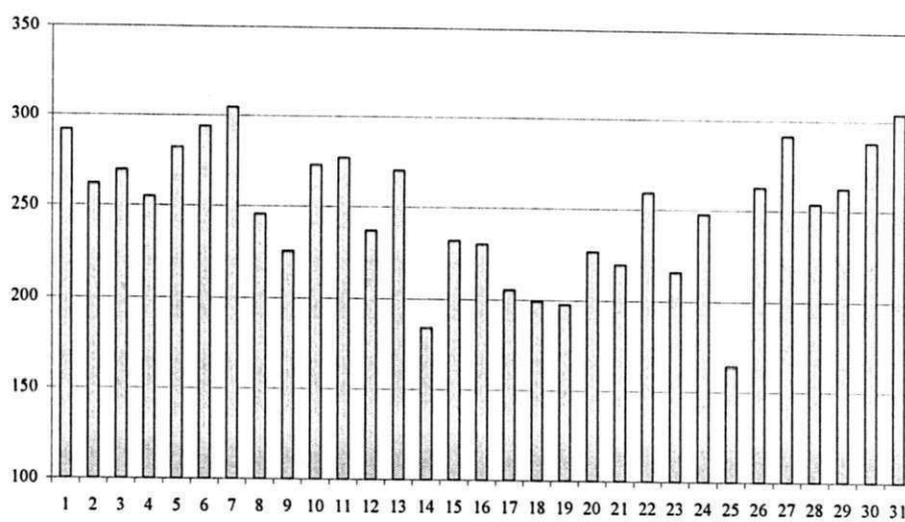
VAN HAANDEL. A. C; MARAIS, G. O comportamento do sistema de lodo ativado. Teoria e aplicação para projetos e operação. Campina Grande, 1999.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. Meteorologia básica e aplicações. UFV. Viçosa, 1991.

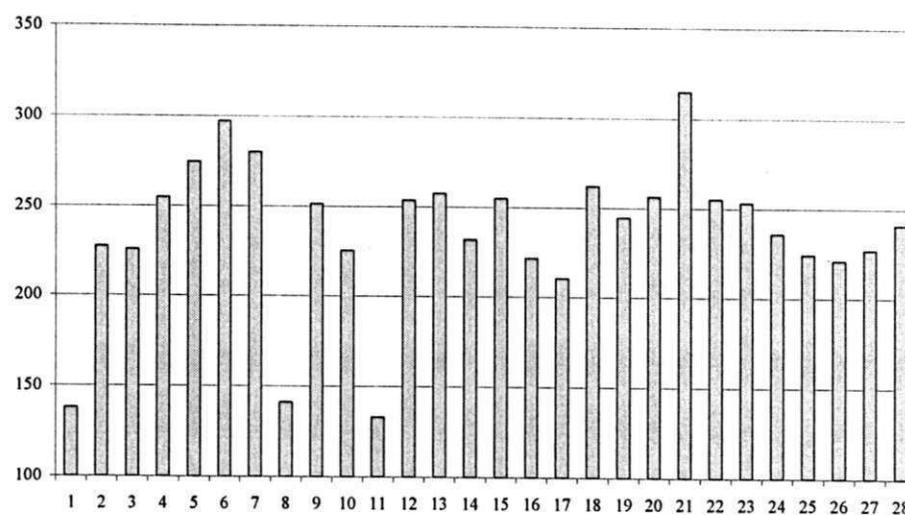
WEF – Water Environment Federation. Operation of municipal wastewater tratment plants. Manual of pratic. 5ª ed. Alexandria, 1991.

Anexo 1

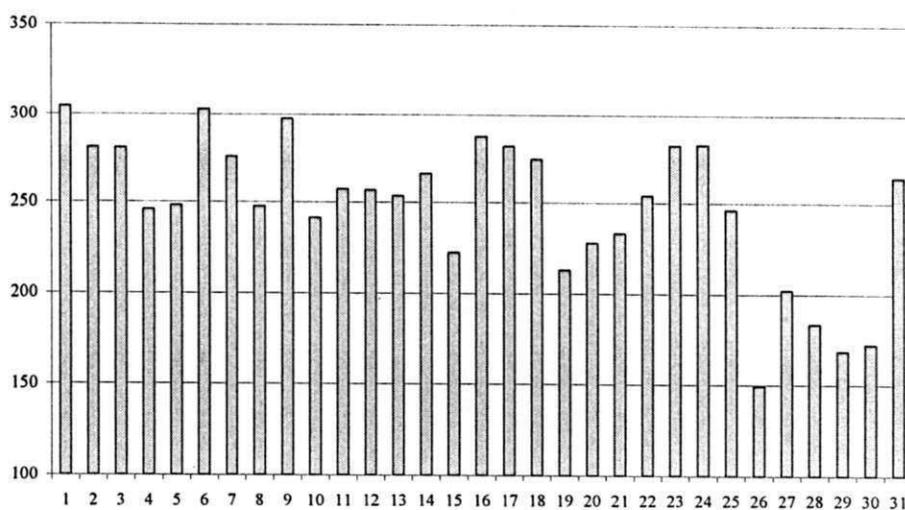
Potência Solar Diária (W/m^2) do 1º trimestre de 2005 na cidade de Campina Grande – PB



Janeiro



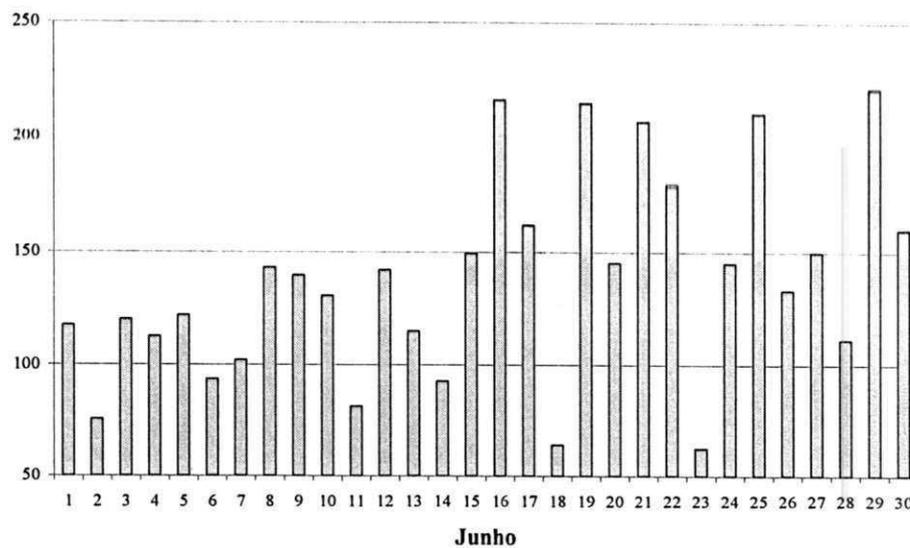
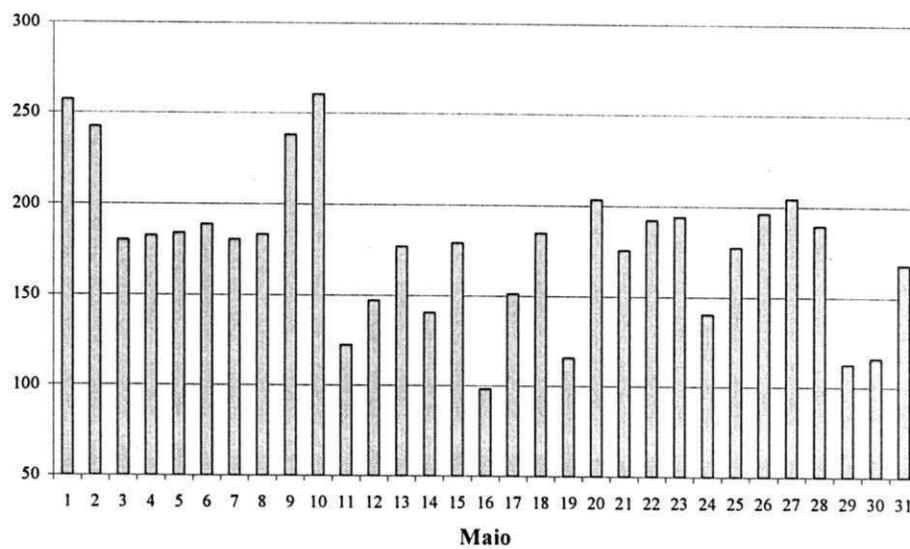
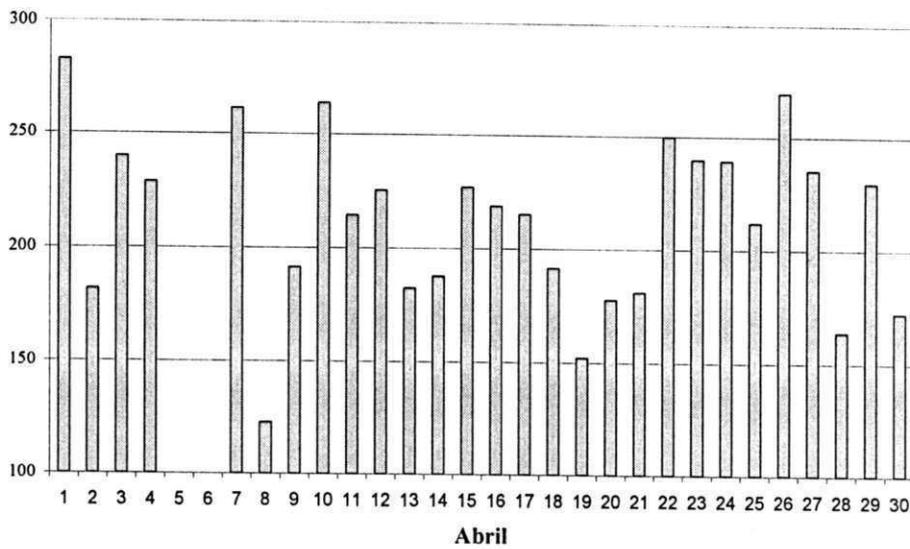
Fevereiro



Março

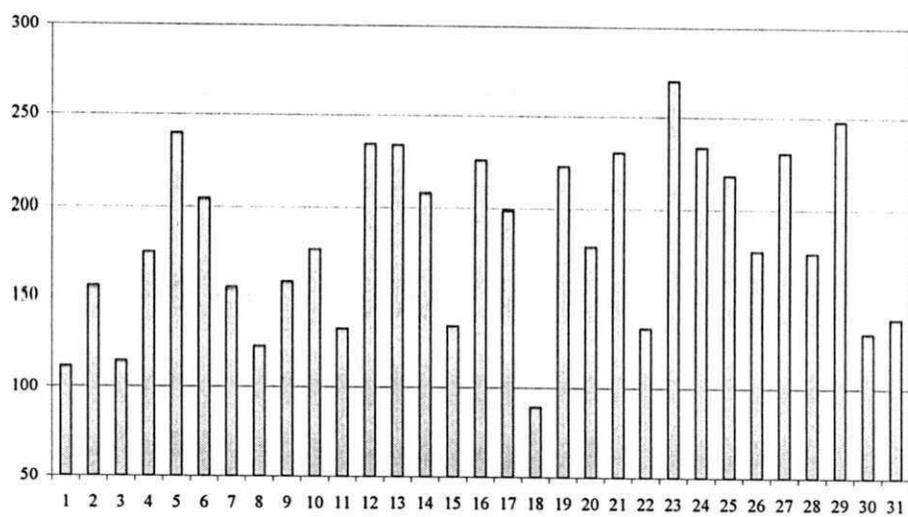
Anexo 2

Potência Solar Diária (W/m^2) do 2º trimestre de 2005 na cidade de Campina Grande – PB

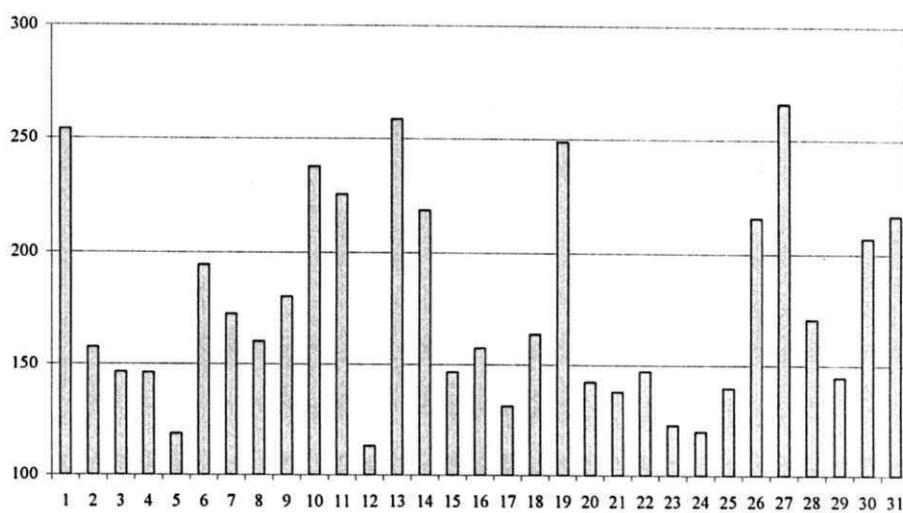


Anexo 3

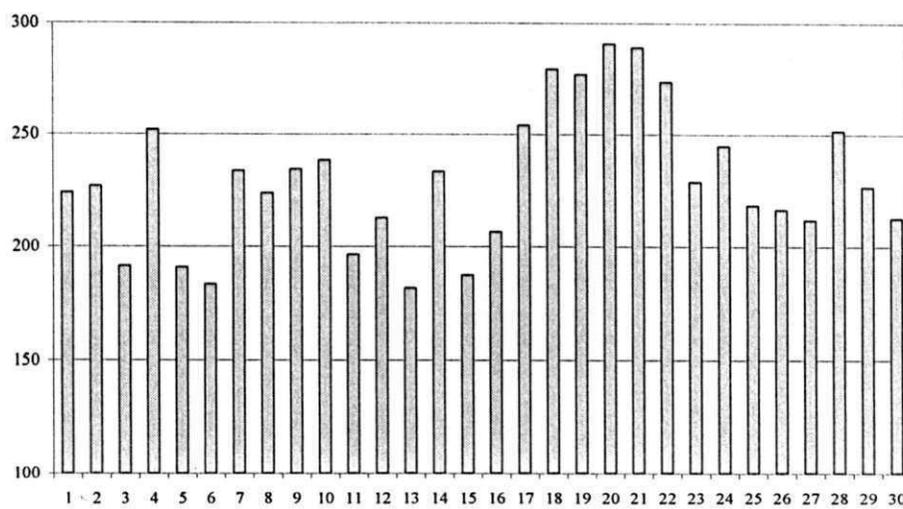
Potência Solar Diária (W/m^2) do 3º trimestre de 2005 na cidade de Campina Grande – PB



Julho



Agosto



Setembro

Anexo 4

Potência Solar Diária (W/m^2) do 4º trimestre de 2005 na cidade de Campina Grande – PB

