



**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA ACADÊMICA
COORDENAÇÃO GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS
AMBIENTAIS**

Adilson Bezerra da Silva

**PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E MODELAGEM
ESTATÍSTICA DO EFEITO DO USO DO LODO
DE ESGOTO EM SOLOS**

Recife

2008

**PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E MODELAGEM
ESTATÍSTICA DO EFEITO DO USO DO LODO
DE ESGOTO EM SOLOS**

Adilson Bezerra da Silva

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais da Universidade Católica de Pernambuco, como pré-requisito para obtenção do título de **Mestre em Desenvolvimento de Processos Ambientais**.

Área de Concentração: Desenvolvimento em Processos Ambientais

Linha de Pesquisa: Modelagem e Otimização de Processos.

Orientador: Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos

Co-orientadora: Profa. Dra. Arminda Saconi Messias

Recife

2008

X nnnx Silva, Adilson Bezerra

Planejamento Experimental e Modelagem Estatística do Efeito do Uso do Lodo de Esgoto em Solos / Adilson Bezerra da Silva; orientador Valdemir Alexandre dos Santos; co-orientadora Arminda Saconi Messias, 2008.

54 f.: il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Católica de Pernambuco. Pró -reitoria Acadêmica, 2008.

1. Reaproveitamento agronômico. 2. Solos. 3. Modelagem estatística. 4. Otimização de experimentos. I. Santos Valdemir Alexandre dos. II. Messias Arminda Saconi. III. Título.

CDU xxx.xxx

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos - Orientador
Universidade Católica de Pernambuco, Recife - PE

Profa. Dra. Lucia Helena da Silva Maciel Xavier
Fundação Joaquim Nabuco, FUNDAJ, Brasil.

Profa. Dra. Eliane Cardoso de Vasconcelos
Universidade Católica de Pernambuco, Recife - PE

DEDICATÓRIA

A Deus, o grande construtor do universo,
minha família a base de meu ser e
todos que direta ou indiretamente me auxiliaram nessa trajetória.

“O sentido pleno da alma está na realização do ser, quando conquistas se concretizam como um conjunto de valores que comungam entre si para obtenção do êxito”.

(Silva, A. B.)

AGRADECIMENTOS

Ao Grande Pai da Criação.

Ao Vodun Ayrá.

À minha família.

Ao meu orientador Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos.

À minha co-orientadora Profa. Dra. Arminda Saconi Messias.

À Coordenadora do Mestrado Profa. Dra. Galba Maria de Campos Takaki e aos professores Kaoru Okada, Eliane Vasconcelos, Beatriz Ceballos, Elias Tamborgi.

Ao meu grande amigo Clodomir Ferreira (Pejigan Clô D'Ogyian) e família.

À Josinete Lapa (Jô), Sebastiana Ferreira da Silva (Bá) pelo carinho e cuidado comigo.

Ao Instituto Nacional da Tradição e Cultura Afro-Brasileira Coordenação de Pernambuco - INTECAB-PE.

Aos funcionários da Universidade Católica de Pernambuco, sobretudo, da Secretaria do Mestrado (Nicéas, Inácio, Carlos), da Prac (Prof. Jorge, Prof. Dr. Junot, Nadjanara, Zaidiana, Letícia), da Biblioteca, e a equipe de apoio (manutenção).

À Prefeitura Municipal de Paulista, onde sou funcionário, pela enorme contribuição dispensando-me para as atividades acadêmicas.

Às professoras Maria Junqueira Hommem de Melo (Iyálórixá Pimpa D'Òxálá), Claudia Maria de Assis Rocha Lima (Iyálórixá Claudia de Òxun) Marlene Germano, Ana Sandra, Diana Daniele, Andrea Karla, Genilda Correia Pontes, Valeria Gomes Costa, Aida Ester Sarduy Bueno, Aleida Sanabria, Lucineia, pelo grande incentivo nos momentos de dúvidas e incertezas.

Aos professores Dinaldo Barbosa da Silva Junior, Manoel Valentin, Anchieta, Jackson, Élvio, Benjamim.

AOS AMIGOS: Babalórixá Japi de Òxun, Babalórixá Junior de Ayrá, Iyálórixá Luiza de Òxun, Iyálórixá Sara de Òxun, Iyálórixá Maria Jose (Zeza de Oyá) Maria do Carmo Castro, Thais Castro, Ercilia Castro, Fátima Castro, Rita Castro, Nelito, Manoela, Thiago, Teresinha Fragôso, Ana Maria Fragôso, Clausanir Ferreira Sales, Fernando Tavares.

IN MEMORIAM:

Maria do Nascimento de Jesus (mãe Ia) Maria das Neves Correia, (tia madrinha), Babalórixá Fausto José da Silva (Pai Fausto – Vodun Azeri), Babalórixá Dário de Òxun, Babalórixá Mercival de Iyémonjá, Babalórixá Petrucio de Xangô, Iyalórixá Santana de Iyémonjá, Iyalórixá Nidinha de Òxálá.

À Rede CCI/FIUC, pela oportunidade de desenvolver o projeto.

A todos que acreditam que é através da educação, que conseguiremos libertar o homem, para uma vida digna e vitoriosa.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	vii
SUMÁRIO	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xi
RESUMO	12
ABSTRACT	13
RÉSUMÉ	14
CAPÍTULO 1	15
1.1 Introdução	15
1.2 Objetivos	18
1.2.1 Objetivo Geral	18
1.2.1 Objetivos Específicos	18
1.3 Revisão de Literatura	19
1.3.1 Lodo de esgoto	19
1.3.2 Modelagem estatística do uso do lodo de esgoto em solos	22
1.3.3 Planejamento Fatorial	25
1.4 Referências	28
CAPÍTULO 2	
ASPECTOS ESTATÍSTICOS RELACIONADOS À FIXAÇÃO DE COBRE, ZINCO, CÁDMIO E FERRO EM SOLOS TRATADOS COM LODO DE ESGOTO	31
Resumo	31
Summary	32
Introdução	33
Material e Métodos	35
Resultados e Discussão	37
Conclusões	45
Literatura Citada	47
ANEXOS.....	50
Instruções Aos Autores da Revista Brasileira de Ciência do Solo (ISSN 100-0683	50

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 Tubos de PVC para lixiviação.....	35
Figura 2 Valores médios simulados para a variável Cd.....	38
Figura 3 Valores médios simulados para a variável Cu.....	38
Figura 4 Valores médios simulados para a variável Fe.....	39
Figura 5 Valores médios simulados para a variável Zn.....	39
Figura 6 Diagrama de Pareto para a variável Cd.....	41
Figura 7 Diagrama de Pareto para a variável Cu.....	41
Figura 8 Diagrama de Pareto para a variável Fe.....	42
Figura 9 Diagrama de Pareto para a variável Zn.....	42
Figura 10 Variável Cd em função da concentração de LE e da posição..	43
Figura 11 Variável Cu em função da concentração do LE e da posição..	44
Figura 12 Variável Fe em função da concentração de LE e da posição..	44
Figura 13 Variável Zn em função da concentração de LE e da posição..	45

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 Valores associados aos níveis para o planejamento fatorial adotado.....	36
Tabela 2 Matriz de planejamento em termos das variáveis escalonadas.....	37

RESUMO

Foram utilizados os métodos de planejamento fatorial e de análise de superfície de resposta para obtenção e validação experimental de modelos estatísticos que simulam os efeitos dos elementos Cd, Cu, Fe e Zn contidos em um lodo de esgoto, utilizado na melhoria das condições de cultivo em solos. O lançamento de poluentes no ambiente tem estado sob severo controle nos países desenvolvidos, e vem crescendo a importância dada ao problema nos países em desenvolvimento, como o Brasil. O maior volume desses resíduos tem origem no lixo doméstico e no tratamento de esgotos. Lodo de esgoto (LE) ou bio sólido é uma denominação genérica para o resíduo sólido gerado pelos sistemas de tratamento de águas residuárias. O LE pode apresentar, em sua composição, elementos químicos e biológicos indesejáveis do ponto de vista ambiental, ou seja, pode conter elementos que, em contato com o homem e/ou com a fauna e a flora, causem doenças e contaminações diversas. Portanto, qualquer decisão sobre um destino final mais apropriado para o LE depende da avaliação e minimização dos riscos de contaminação do ambiente e do homem. Neste trabalho, realizou-se experimento com a adição de concentrações diferenciadas de LE a um solo proveniente da Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil. Procedeu-se a lixiviação do solo contendo teores diferenciados de LE para simular a ocorrência de chuvas durante o período dos experimentos. Através da análise da variância das medidas de concentração de Cd, Cu, Fe e Zn, retidos no solo, foram testadas as validades de modelos estatísticos para simular a retenção desses elementos do LE. Os resultados demonstraram que a modelagem estatística de análise de resposta constitui-se ferramenta indispensável e, desde que não se conheça bem o fenômeno estudado, a modelagem estatística pode reforçar o papel dos modelos empíricos na análise preliminar de qualquer fenômeno.

Palavras-chave: Reaproveitamento agronômico, solos, modelagem estatística, otimização de experimentos.

ABSTRACT

Optimized mathematical models relative to the effects of the use of sewage sludge in the cultivation in the soils, Brazil, will be elaborated and validated here. The releasing of pollutants in the environment has been under severe control in developed countries, and there has been given greater importance to the matter in developing ones, such as Brazil. The greatest volume of it comes from domestic waste and from the wastewater treatment. Sewage sludge (SS) is a general denomination to the solid waste generated by the wastewater treatment system. The SS may present in its composition undesirable, from the environmental point of view, biological and chemical elements, that is, it may contain elements that may cause several diseases and contaminations in contact with men or with the fauna and the flora. Thus, any decision about the most appropriate final destination of the SS depends on the evaluation and the minimization of contamination risks to men and to the environment. There are plenty of these elements, and they may be classified in two groups: chemical contaminants and biological contaminants (many of them are pathogen organisms, which cause human diseases). Among the pollutants of the SS, the chemical contaminants (heavy metals) constitute the greatest group and must be constantly monitored because of the risks of contamination to men, animals and plants. Among the several existing alternatives to the disposition of the SS, it seems that the most convenient and one of the most promising, mainly from the economic point of view, is the agricultural utilization, not only because of its potential as conditioner and fertilizer of soils, but also because of the fact that the soils have, in general, a high power of clearance. In this work, it will be presented strategies to the definition of adequate conditions of experiments by means of planning techniques and of experimental optimization. From this methodology, it is hopeful to get the definition of working optimized conditions in a way that it may be obtained models of simulation to the effects of the sewage sludge in the cultivation of spices in the soils.

Key words: agronomic utilization, soils, statistical modeling, optimization of experiments.

RÉSUMÉ

Les modeles mathematiques optimizes seront utilises pour etudier les consequences de l'usage des produits d'egout dans la cultivation des sols au Bresil. Le rejet des matieres polluantes dans l'environnement a été severement controle dans les pays developes, mais a été aussi le sujet de grande preoccupation dans certain pays comme le Bresil. La plupart de ces matieres provient des dechets domestiques ainsi que des eaux usees. La denomination produits d'egout (PE) comprend les dechets solides engendres par le traitement des eaux usees. Les PE peuvent presenter dans leur composition des elements biochimiques indesirables, pouvant contaminer les humains, la faune et la flore locales. Il est donc important de reflechir sur la destination et le mode de traitement des PE afin de minimiser ses effets polluants sur l'homme e son eco systeme. Nous parlerons de deux sous groupes de polluants : les polluants chimiques et les polluants biologiques (beaucoup de ces derniers sont des organismes pathogenes chez les humains). Parmi les polluants chimiques, l'on rencontre les metaux lourds en grande quantitee, et il se doit de controler et surveiller leur action contaminante sur les humains, les animaux et la flore. Parmi les differentes alternatives existantes pour se debarrasser des PE, l'utilisation agricole des PE semble la plus prometteuse, non seulement d'un point de vue economique, mais aussi pour son potentiel de fertilisation des sols, puisque ceux-ci ont un grand potentiel de diffusion et d'auto nettoyage. Nous presenterons dans ce projet, des strategies de planifications et optimisation experimentale, afin de definir les conditions adequates des experiences a venir. Nous esperons ainsi definir des conditions de travail optimales pour obtenir des modeles de simulation visant a etudier les effets des PE sur la culture des epices

Mots cles: utilisation agronomique, sols, modeles statistique, optimization des esperiences

CAPÍTULO 1

1.1 Introdução

O homem sempre se deparou com amplos espaços geográficos e abundante oferta de recursos, condições propícias para o desencadeamento dos processos de ocupação e grandes áreas no planeta. Entretanto, a visão da natureza como uma fonte inesgotável de recursos, fez com que o planejamento da produção fosse realizado priorizando as finalidades econômicas, resultando na não previsão de problemas oriundos do desenvolvimento insustentável (LIMA et al., 2002).

A preocupação com o meio ambiente não é recente. Já no Gênesis aparece a proibição do corte de árvores frutíferas sob pena de açoite para os infratores. O que é recente é a necessidade de avaliação dos bens e serviços ambientais e o surgimento da “economia ambiental” (REZENDE et al., 2002).

A necessidade de um estudo para a disposição do lodo no solo se dá pela própria composição deste insumo que deve ser monitorado quanto à presença de organismos patogênicos e elementos potencialmente tóxicos, como os metais pesados. Produtos estes que após a disposição no solo entram no ecossistema não só do solo, mas também das plantas, aquíferos subterrâneos e animais de pequeno e grande porte que se alimentam de gramíneas; enfim, adentram a cadeia alimentar sendo muito perigosos sob o ponto de vista da Saúde Pública. Uma outra utilização que tem sido empregada em cidades de pequeno porte, até pela falta de uma segunda opção, é à disposição do lodo em aterros sanitários. Esta disposição requer cuidados especiais na escolha da área, no projeto e exige um monitoramento ambiental cuidadoso. Para que o esgoto não cause problemas ambientais e de saúde pública, é necessário que seja tratado antes do lançamento nos corpos receptores (rios, lagos, oceanos e solo). Esses tratamentos atuam de duas formas: na redução do conteúdo da matéria orgânica, através de sua oxidação e no estímulo à formação de flocos, de forma a possibilitar a sedimentação e a remoção de um subproduto (resíduo) denominado lodo de esgoto que possui

as seguintes características indesejáveis: odores desagradáveis, presença de microorganismos patogênicos, elementos tóxicos de origem orgânica ou mineral e dificuldade de desidratação. A destinação do lodo de esgoto para a agricultura é a alternativa que merece maior destaque pelas seguintes razões, segundo Oliveira (2000): pode ser viabilizada tecnicamente através da pesquisa, apresenta os menores custos, utiliza o solo como um meio favorável ao consumo da carga orgânica potencialmente poluidora, pode trazer os benefícios inerentes da matéria orgânica, além de proporcionar a reciclagem de nutrientes.

Dentre as alternativas de disposição final do lodo de esgoto, a reciclagem agrícola tem se constituído, segundo Neiva (1999), em uma das formas mais utilizadas em diversos países desenvolvidos (Bélgica, 29 %; Dinamarca, 54 %; França, 58 %; Alemanha, 27 %; Itália, 33 %; Espanha, 50 %; Reino Unido, 44 %) como condicionador e fertilizante do solo.

De acordo com Anderson (1959), citado por Marques (1996), o uso de lodo de esgoto como fertilizante nos Estados Unidos, data de 1927, quando esse tipo de material tornou-se comercialmente disponível. Atualmente, segundo Tsutiya (1999), cerca de 25% de todo o biossólido produzido nos Estados Unidos (aproximadamente 13 milhões de toneladas por ano), é utilizado na agricultura. Esse autor relata que o uso agrícola constitui na alternativa mais adequada para a disposição final de biossólidos gerados nas ETE's (Estação de Tratamento de Esgoto) do Estado de São Paulo.

Viu-se que a aplicação de lodo de esgoto na agricultura tem tornado-se uma forma racional e promissora de utilização, uma vez que ele é um composto rico em nutrientes para as plantas. O domínio dessa tecnologia é tão necessário nos dias atuais e requer o aprofundamento de estudos para compreensão desses fenômenos de interação entre solo e esgoto.

Como numa grande massa de trabalhos de desenvolvimentos tecnológicos, o estudo de aplicação de lodo de esgoto precisa da contribuição dos modelos matemáticos, responsáveis pela redução de custos e tempo nos laboratórios de pesquisas. Contudo, a modelagem e simulação de um fenômeno devem inicialmente passar por técnicas que permitam a obtenção de conhecimentos sobre o referido fenômeno, com auxílio de modelos empíricos, de aplicação limitada em relação aos modelos fenomenológicos. Nessa etapa

então, torna-se imprescindível a utilização de técnicas estatísticas de modelagem.

Para que os resultados obtidos de ensaios experimentais possam ser analisados através de métodos estatísticos, possibilitando elaborar conclusões objetivas, o planejamento experimental deve ser aplicado e basear-se numa metodologia também estatística, que é uma das formas mais relevantes de avaliar os erros experimentais que afetam esses resultados.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência do lodo de esgoto nos atributos do solo, para contribuir no desenvolvimento sustentável e elevação da renda familiar, atendendo aos aspectos econômicos, sociais e de preservação do meio ambiente, utilizando processos de modelagem estatística.

1.2.2 Objetivos Específicos

Elaborar e validar modelos matemáticos relativos ao efeito do uso de lodo de esgoto na dosagem de nutrientes em solo de cultivo de plantas no estado de Pernambuco, que venha a contribuir com a recuperação do solo, favorecendo o pequeno e médio agricultor no cultivo de plantas, atendendo ao desenvolvimento científico e tecnológico, como também aos aspectos econômicos, sociais e de preservação do ambiente.

1.3 Revisão de Literatura

1.3.1 Lodo de esgoto

O lodo de esgoto (LE) ou torta é um resíduo de origem urbana resultante do tratamento de efluentes domésticos, apresentando composição bastante variável. As diferenças encontradas variam com o tipo de processo empregado (primário, lodo bruto produzido nos decantadores primários; lodo ativado, produzido em reatores biológicos; e lodo digerido, processo de estabilização biológica), com a localização fisiogeográfica das ETEs (que reflete os hábitos alimentares da população), com o balanço de nutrientes dos alimentos consumidos, com a época do ano e com a descarga de resíduos industriais (VIDOR, 1999; TSUTIYA, 2000).

Quando existe possibilidade de caleação no processo da ETE, o produto resultante passa a ser o biossólido. Portanto, biossólido é o nome dado ao lodo resultante do tratamento de esgoto, com características que permitam sua reciclagem de maneira racional e ambientalmente segura. O termo biossólido foi criado e divulgado em todo mundo para incentivar o uso de esgotos como adubos e condicionadores de solo (USEPA, 1999; PIRES, 2005).

Os métodos de disposição mais comuns para o lodo de ETEs são: aterro, disposição no oceano, recuperação de terrenos de mineração, digestão em lagoas e uso agrícola (HARRIS - PIERCE et al., 1995). Diversos usos alternativos têm sido desenvolvidos, como: agregados leves para construção civil, fabricação de tijolos e cerâmicas, fonte de energia para produção de cimento e conversão do lodo em óleo combustível (TSUTIYA, 2001). Na Europa, a reciclagem e a disposição em aterros sanitários são as alternativas predominantes, onde são direcionados, para cada uma delas, cerca de 40 % do lodo produzido (DAVIS; HALL, 1997).

De acordo com Bettiol & Camargo (2000) em função da origem e do processo de obtenção utilizado, o lodo de esgoto apresenta composição muito variável, sendo um material ainda rico em matéria orgânica (40 a 60 %), em nitrogênio e em alguns micronutrientes como ferro, cobre, zinco e manganês.

Um lodo de esgoto típico contém 40 % de matéria orgânica, 4 % de nitrogênio, 2 % de fósforo e 0,4 % de potássio.

A aplicação no solo constitui uma das práticas mais antigas de destino final do esgoto sanitário. As “fazendas de esgoto”, como ficaram conhecidas as primeiras experiências na Inglaterra, no início do século XIX, logo se disseminaram pela Europa e Estados Unidos (BASTOS, 2003).

A utilização do lodo de esgoto como adubo orgânico tem sido mencionada como uma alternativa para o destino final deste resíduo, principalmente pela concentração predominante de matéria orgânica e fonte considerável de nutrientes; como também, pela sua atuação como condicionante das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (ANDREOLI et al., 2001; FARIA, 2007).

Além do ponto de vista ambiental e econômico, a utilização do lodo na agricultura é vantajosa, pois confere ao solo maior capacidade de retenção de água, porosidade (aeração das raízes) e estabilidade dos agregados, maior resistência à erosão, efeito residual utilizável para culturas subseqüentes e, possivelmente, induz a supressividade dos solos aos fitopatógenos (MELO et al., 1994; POLGLASE; MYERS, 1996; BERTON et al., 1997; SANTOS; BETTIOL, 2001; SILVA et al., 2002).

Em 29 de agosto de 2006, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) aprovou a Resolução nº. 375, que define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento sanitário e seus produtos derivados. Desde a entrada da norma em vigor, as estações de tratamento de esgoto, no Brasil, passaram a contar com um instrumento legal de controle de padrão e de monitoramento, bem como dos cuidados a serem observados ao disponibilizar o resíduo para a agricultura.

O lodo originado da rede de esgoto pode possuir em sua composição materiais altamente impactantes concernentes à saúde humana e impactantes ao solo. Os riscos associados ao lodo estão relacionados à presença de metais pesados, microrganismos patogênicos e à grande quantidade produzida sem um destino definido (LOURENÇO, 1997). Por isso, a Resolução 375 do CONAMA deixa estabelecida que os lodos gerados em sistemas de tratamento de esgoto, para terem aplicação agrícola, deverão ser submetidos a processo de redução de patógenos e da atratividade de vetores de moléstias. O texto

prevê restrições da aplicação do resíduo em áreas de pastagens e unidades de conservação, em cultivos para consumo “in natura”, em plantações que tenham contato com o solo, entre outros. O lodo urbano, quando tratado, pode eliminar a patogenicidade de vírus, bactérias, fungos, protozoários e helmintos (BARBOZA, 2007). Entretanto, a possível presença de poluentes como agentes patogênicos e metais pesados são fatores que podem provocar impactos negativos; por isso sua aplicação exige cuidados especiais para que sejam evitados danos à população e ao meio ambiente.

1.3.2 Modelagem estatística

Em qualquer área de pesquisa, fica-se sempre interessado em saber quais variáveis são importantes em algum estudo que se esteja realizando, assim como limites inferior e superior de valores destas variáveis (MONTGOMERY, 1984). Corridas experimentais devem ser realizadas a fim de se obter dados do tempo de cura para cada combinação dos limites de valores da temperatura de cura e da quantidade de catalisador. A partir destes resultados, técnicas estatísticas devem ser utilizadas de modo a se concluir algo em relação à dependência do tempo de cura com as variáveis analisadas. O planejamento experimental é uma destas técnicas, que atualmente vem sendo usada em grande escala. Através dele, pesquisadores podem determinar as variáveis que exercem maior influência no desempenho de um determinado processo, tendo como resultado (KUTNER et al., 1990):

- 1.** redução da variação do processo e melhor concordância entre os valores nominais obtidos e os valores pretendidos;
- 2.** redução do tempo do processo;
- 3.** redução do custo operacional;
- 4.** melhoria no rendimento do processo.

Algumas aplicações típicas do planejamento de experimentos são (WERKEMA; AGUIAR, 1996):

- 1.** avaliação e comparação de configurações básicas de projeto;
- 2.** avaliação de diferentes materiais;
- 3.** seleção de parâmetros de projeto;
- 4.** determinação de parâmetros de projeto que melhorem o desempenho de produtos.
- 5.** obtenção de produtos que sejam mais fáceis de fabricar, que sejam projetados, desenvolvidos e produzidos em menos tempo, que tenham melhor desempenho e confiabilidade que os produzidos pelos competidores.

Os três princípios básicos de um planejamento de experimentos são *replicação*, *aleatoriedade* e *blocagem*. Fazer um experimento com réplicas é muito importante por dois motivos. O primeiro é que isto permite a obtenção do erro experimental. A estimativa desse erro é básica para verificar se as diferenças observadas nos dados são estatisticamente diferentes. O segundo motivo se refere ao fato de que, se a média de uma amostra for usada para estimar o efeito de um fator no experimento, a replicação permite a obtenção de uma estimativa mais precisa desse fator (DRUMOND et al., 1996).

Os métodos estatísticos requerem que as observações, ou os erros, sejam variáveis aleatórias distribuídas independentemente. Os experimentos, com suas réplicas, devem ser realizados de forma aleatória, de modo a garantir a distribuição equânime de todos os fatores não considerados.

A blocagem é uma técnica extremamente importante, utilizada industrialmente que tem o objetivo de aumentar a precisão de um experimento. Em certos processos, pode-se controlar e avaliar, sistematicamente, a variabilidade resultante da presença de fatores conhecidos (*nuisance factors*) que perturbam o sistema, mas que não se tem interesse em estudá-los. A blocagem é usada, por exemplo, quando uma determinada medida experimental é feita por duas diferentes pessoas, levando a uma possível não homogeneidade nos dados. Outro exemplo seria quando um determinado produto é produzido sob as mesmas condições operacionais, mas em diferentes bateladas. De modo a evitar a não homogeneidade, é melhor tratar cada batelada como um bloco.

As experiências devem ser realizadas seqüencialmente. A primeira delas, chamado *experimento de peneiramento* (*screen experiment*), é usada para determinar que variáveis são importantes (variáveis críticas). As experiências subseqüentes são usadas para definir os níveis das variáveis críticas identificadas anteriormente, que resultam em um melhor desempenho do processo (MCLEAN; ANDERSON, 1974).

Em suma, o que se quer aqui é obter um modelo matemático apropriado para descrever certo fenômeno, utilizando o mínimo possível de experimentos. O planejamento experimental permite eficiência e economia no processo experimental e o uso de métodos estatísticos na análise dos dados obtidos resulta em *objetividade científica* nas conclusões.

Os métodos básicos usados para realizar um eficiente planejamento experimental têm como objetivos:

1. A seleção do melhor modelo entre uma série de modelos plausíveis;
2. A estimação eficiente de parâmetros do modelo selecionado.

Todo planejamento experimental começa com uma série inicial de experimentos, com o objetivo de definir as variáveis e os níveis importantes. Podem-se ter variáveis qualitativas (tipo de catalisador, tipo de equipamento, operador, etc.) e quantitativas (temperatura, pressão, concentração índice de inflação, ph do meio, etc.). Os resultados devem ser analisados e modificações pertinentes devem ser feitas no planejamento experimental.

É importante frisar que os métodos que serão descritos aqui não substituem a imaginação e o bom senso, mas eles ajudam a economizar tempo e dinheiro, uma vez que eles conduzem à objetividade da análise de resultados.

Antes de começar a realizar os experimentos, os objetivos e os critérios devem estar bem claros, de modo a dar subsídios para a escolha (RODRIGUES; IEMMA, 2005):

1. das variáveis envolvidas nos experimentos;
2. da faixa de variação das variáveis selecionadas;
3. dos níveis escolhidos para essas variáveis. No caso de muitos fatores, é melhor escolher inicialmente dois níveis;
4. da variável de resposta;
5. do planejamento experimental. Nessa etapa, há que se considerar o tamanho da amostra (número de réplicas), a seleção de uma ordem de realização dos experimentos e se há vantagem em fazer a blocagem dos experimentos; dos métodos de análise dos resultados dos experimentos. Os métodos estatísticos são usados para guiar uma tomada objetiva de decisão.

As quatro etapas iniciais, conhecidas como planejamento pré-experimental, geralmente envolvem um grupo de pessoas. O sucesso de um planejamento de experimentos depende muito dessa etapa inicial.

1.3.3 Planejamento fatorial

O planejamento fatorial é classificado como um método do tipo simultâneo, onde as variáveis independentes, de interesse, que apresentam influências significativas para a variável dependente, ou de resposta, são avaliadas ao mesmo tempo (Barros Neto et al., 2002). Para realizar um planejamento fatorial, escolhem-se as variáveis a serem estudadas e efetuam-se experimentos em diferentes valores destes fatores. De um modo geral, o planejamento fatorial pode ser representado por b^α , em que α é o número de fatores e b é o número de níveis escolhidos. Por exemplo, em função deste número de fatores e de níveis, um planejamento fatorial pode ser indicado como sendo 2^2 o que já sugere que o número de experimentos diferentes a serem realizados é 4.

Em geral os planejamentos fatoriais do tipo 2^α são os mais comuns. Um dos aspectos favoráveis deste tipo de planejamento é a realização de poucos experimentos. É óbvio que com um número reduzido de níveis não é possível explorar de maneira completa uma grande região no espaço das variáveis (RODRIGUES; IEMMA, 2005). Entretanto, observa-se tendências importantes para a realização de investigações posteriores. Pode-se ter planejamentos fatoriais em que seja interessante explorar uma ou mais variáveis com um número de níveis diferente das demais. Desta forma a representação do fatorial passa a ser, por exemplo, $b_1^\alpha \cdot b_2^\beta \cdot b_3^\gamma$, isto é, b_1 , b_2 e b_3 são níveis para as variáveis α , β e γ , respectivamente.

Muitas vezes em um sistema, diversos fatores podem influenciar a resposta desejada. Quando não se conhece bem o fenômeno, um experimento para triagem deve ser executado com o interesse em se determinar as variáveis experimentais e as interações entre variáveis que têm influência significativa sobre as diferentes respostas de interesse. Após selecionar as

variáveis que são possíveis de serem estudadas e que provavelmente interferem no sistema, é preciso avaliar a metodologia experimental (tempo, custo, etc.). As variáveis que não foram selecionadas devem ser fixadas durante todo o experimento (TEÓFILO; FERREIRA, 2006). Em uma etapa seguinte, deve-se escolher qual planejamento usar para estimar a influência (o efeito) das diferentes variáveis no resultado. No estudo de triagem, as interações entre as variáveis (interações principais) e de segunda ordem, obtidas normalmente pelos planejamentos fatoriais completos ou fracionários, são de extrema importância para a compreensão do comportamento do sistema.

Após a realização dos experimentos de triagem, os fatores significativos são selecionados e uma metodologia de análise de superfícies de respostas (MYERS; MONTGOMERY, 2002) pode ser executada para otimização do experimento. Nesta situação, otimizar significa encontrar os valores das variáveis que irão produzir a melhor condição desejada, isto é, encontrar a região ótima na superfície definida pelos fatores. A metodologia de superfície de resposta baseia-se na construção de modelos matemáticos empíricos, que após sua validação experimental com auxílio de técnicas estatísticas recebe a denominação de modelos estatísticos. Esse tipo de modelagem geralmente emprega funções polinomiais, lineares ou quadráticas, para descrever o sistema estudado e, conseqüentemente, oferecer condições de explorar o sistema até sua otimização.

Um planejamento experimental elaborado para estimar coeficientes, segundo algum modelo matemático, deve reunir certos critérios desejáveis, sendo os principais (RODRIGUES; IEMMA, 2005): proporcionar boas estimativas para todos os coeficientes, exigindo poucos experimentos e, fornecer condições de avaliação dos coeficientes e do modelo, ou seja, da regressão e da falta de ajuste.

1.4 Referências

- ANDREOLI, C.V.; LARA, A.I.; FERNANDES, F. **Reciclagem de biossólidos: transformando problema em solução**. Curitiba: SANEPAR, 2.ed, p.28-35. 2001.
- BARBOZA, Rafael Sá Leitão. **Influência do lodo de esgoto na nodulação e no desenvolvimento do caupi (*Vigna unguiculata* [L.] Walp)**. Dissertação – Universidade Católica de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais. Recife, 2007. 84p.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2. ed., Campinas: Ed. Unicamp, 2002.
- BASTOS, R.K.X. **Utilização de esgotos tratados em fertirrigação, hidroponia e piscicultura**. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico – PROSAB. Rio de Janeiro: ABES. 2003.
- BERTON, R.S.; VALADARES, J.M.A.S.; CAMARGO, O.A.; BATAGLIA, O.C. Peletização de lodo de esgoto e adição de CaCO₃ na produção de matéria seca e absorção de Zn, Cu e Ni pelo milho em três Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, p. 685-691, 1997.
- BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna, SP: EMBRAPA, 2000. 312p.
- CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W.J.; MARQUES, M. O. eds. **Biossólidos na Agricultura**. São Paulo, SABESP, 2001. 468p.
- DAVIS, R. D.; HALL, J. E. Production, treatment and disposal of wastewater sludge in Europe from a UK perspective. **European Water Pollution Control**. v.7, n.2, p.9-17, 1997.
- DRUMOND, F. B., WERKEMA, M.C.C. , AGUIAR, S. **Análise de Variância: comparação de várias situações**. Belo Horizonte, MG: FCO, EEUFMG, 1996.

FARIA, Luis Carlos de. **Uso do lodo de esgoto (biossólido) como fertilizante em eucaliptos: demanda, potencial e crescimento das árvores e viabilidade econômica.** Universidade de São Paulo: Tese de Doutorado (Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz). Piracicaba, 2007.

HARRIS-PIERCE, R. L.; REDENTE, E. F.; BARBARICK, K. A. Sewage sludge application effects on runoff water quality in a semiarid grassland. **Journal of Environmental Quality**, v.24, p.112-115, 1995.

KUTNER, M. H. , NETER J. , WASSERMAN, W. **Applied linear statistical models, regression, analysis of variance and experimental designs.** 3. ed. Homewood: Richard D. Irwin, Inc., 1990.

LOURENÇO, Rivali Salvador. **Utilização de lodo de esgoto aeróbio e calado em florestas.** Embrapa-PA. dez/97, p.1-3 (Comunicado técnico, 18).

MC LEAN, R. A., ANDERSON, V. L. **Design of experiments, a realist approach.** New York: Marcel Derrerr, 1974.

MARQUES, M.O. **Incorporação de lodo de esgoto em solo cultivado com cana-de-açúcar.** 1996. 111 f. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1996.

MELO, W. J.; MARQUES, M. O.; SANTIAGO, G.; CHELLI, R. A.; LEITE, S. A. S. Efeito de doses crescentes de lodo de esgoto sobre frações da matéria orgânica e CTC de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.18, p.449-455, 1994.

MONTGOMERY, D.C. **Desingn and analysis of experiments.** 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1984.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; **Response surface methodology,** New York: Wiley, 2002

NEIVA, M. R. Reciclagem agrícola de biossólidos da ETE Cetrel – uma experiência ambientalmente correta. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20, 1999. Riode Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 1999. p.469-477.

OLIVEIRA, F.C. **Disposição de lodo de esgoto e composto de lixo urbano num Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar.** Piracicaba, 2000. 247p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

PIRES, A.M.M. **Lodo de esgoto.** AMBIENTEBRASIL. EMBRAPA Meio Ambiente, 2005.p.1-2.

POLGLASE, P.J.; MYERS, B.J. Tree plantations for recycling effluent and biosolids in Austrália. In: Eldridge, K.G., ed. Environmental management: the role of eucalypts and other fast cropping species: **Proceedings...** Collingwood, CSIRSO, 1996. p.100-109.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos:** uma estratégia seqüencial de planejamento. 1. ed, Campinas: Casa do Pão Editora, 2005.

SANTOS, I.; BETTIOL, W. Efeito do lodo de esgoto no crescimento micelial de fitopatógenos habitantes do solo na podridão do colo de plântulas de feijoeiro, causadas por *Sclerotium rolfsii*, em condições controladas. **Ecosistema**, v. 26, p.157-161. 2001.

SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; SHARMA, R. D. Alternativa agronômica para o biossólido produzido no Distrito Federal. I – Efeito na produção de milho e na adição de metais pesados em Latossolo no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.487-495, 2002.

TEÓFILO, F. R.; FERREIRA, M. M. Quimiometria: planilhas eletrônicas para cálculos de planejamentos experimentais, um tutorial. **Química Nova**, v. 29, No. 2, 338-350, 2006.

TSUTIYA, M.T. Metais pesados: o principal fator limitante para o uso agrícola de biossólidos das estações de tratamento de esgotos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20, Rio de Janeiro, 1999. **Anais...** Rio de Janeiro, ABES, 1999. p.753-761.

VIDOR, C. **Descarte de lodo de estações de tratamento de efluentes domésticos no solo.** In: TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C. (ed.) **Manejo racional de resíduos no solo.** Porto Alegre: DS/UFRGS, p. 128-150, 1999.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY-USEPA. EPA 625/10-84-003. **Environmental regulations and technology: use and disposal of municipal wastewater sludge.** Federal Register, 1999. p. 15-16.

WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S. **Planejamento e Análise de Experimentos: como identificar as principais variáveis influentes em um processo.** Belo Horizonte, MG. Fundação Christiano Ottoni, E.E. UFMG, 1996.