

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**ESTIMATIVA DA RETENÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS
PARA FINS DE IRRIGAÇÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Felipe Lavarda Urach

Santa Maria, RS, Brasil

2007

ESTIMATIVA DA RETENÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS PARA FINS DE IRRIGAÇÃO

por

Felipe Lavarda Urach

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração Engenharia de água e solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Agrícola

Orientador: Prof. PhD. José Miguel Reichert

Santa Maria, RS, Brasil.

2007

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**ESTIMATIVA DA RETENÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS
PARA FINS DE IRRIGAÇÃO**

elaborada por
Felipe Lavarda Urach

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Agrícola

COMISSÃO EXAMINADORA:

**José Miguel Reichert, PhD
(Presidente/Orientador)**

Dalvan José Reinert, PhD. (UFSM)

Claiton Ruviaro, Dr. (URI- SANTIAGO)

Santa Maria, 8 de março de 2007.

DEDICATÓRIA

A,
José Antônio Urach,
Tania Regina Lavarda Urach,
Raquel Lavarda Urach,
Marilene Ferreira Barbosa,
Pelo carinho, compreensão, e principalmente
Pelo apoio

AGRADECIMENTOS

Ao professor José Miguel Reichert, na condição de orientador, amigo e exemplo de educador.

Ao professor Dalvan José Reinert, pelo companheirismo e mão amiga.

Ao professor Reimar Carlesso, pela colaboração na realização deste trabalho, principalmente na disponibilização de dados.

Ao Douglas Rodrigo Kaiser, pela contribuição fundamental na análise e interpretação dos dados.

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Centro de Ciências Rurais e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela possibilidade de realização do mestrado.

Aos colegas e professores do curso, pela amizade e conhecimento transmitido.

Aos meus pais, José e Tania, a quem dedico este trabalho.

A minha irmã Raquel, pelo incentivo e amizade fraterna.

A Deus, por ter-me ajudado a ter paciência na realização deste trabalho.

O autor.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil.

ESTIMATIVA DA RETENÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS PARA FINS DE IRRIGAÇÃO

Autor: Felipe Lavarda Urach
Orientador: José Miguel Reichert
Santa Maria, 8 de março de 2007.

O trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estabelecer e testar funções de pedotransferência para retenção de água em solos do Rio Grande do Sul. As informações de retenção de água foram obtidas das seguintes fontes: amostras da dissertação de Solano Peraza (2003), amostras obtidas pelo Sistema Irriga e amostras obtidas na Literatura. A primeira etapa do trabalho consistiu na coleta de informações de retenção de água no solo e de funções de pedotransferência para solos do Rio Grande do Sul, constituindo o banco de dados Literatura, totalizando 24 trabalhos e 624 dados de retenção de água. As amostras obtidas do banco Solano Peraza (2003) foram coletadas em cortes de estradas com exposição do perfil do solo, totalizando um banco de dados com 86 dados de retenção de água, enquanto o Projeto Irriga nos repassou um banco de dados com um total de 253 dados de retenção de água. A partir desses bancos de dados, foram feitas análises de regressão múltipla para a obtenção das funções de pedotransferência para cada banco de dados, usando a opção "stepwise" (SAS, 1997), para determinar o teor de água em um determinado potencial (-1, -6, -10, -33, -100, -500 e -1500 kPa) para os diferentes solos. Para testar a eficiência das equações geradas, fez-se a comparação dos teores de umidade observados com os teores estimados para cada equação em determinado potencial e, assim, confrontaram-se os dados estimados com os observados numa relação gráfica 1:1. De modo geral, a areia total apresentou maior associação com a retenção de água, sendo seguida pelo teor de argila e silte. Com a diminuição na tensão de água (aumento do potencial matricial), a correlação aumenta consideravelmente. As equações de pedotransferência só são eficientes quando usadas para estimar a umidade para os solos a partir dos quais elas foram geradas. Além disso, a característica do banco de dados afeta a capacidade preditiva das equações geradas. Quando predominam determinadas classes de solos no banco de dados, as equações geradas refletem as características daqueles solos e, quando usadas para estimar a umidade de solos de classes diferentes, o erro será maior. Os teores de areia e argila juntamente com a densidade do solo foram os parâmetros que melhor descreveram a retenção de água através das regressões múltiplas geradas. O teor de areia apresenta uma relação negativa com a retenção de água enquanto a argila relaciona-se positivamente. A densidade do solo apresenta uma relação negativa com a retenção de água para os potenciais de -6 a -500 kPa e uma relação positiva com a água retida a -1500 kPa. A melhor estimativa da retenção de água ocorre para o potencial de -1500 kPa.

Palavras chaves: pedotransferência, pedofunções, retenção de água, capacidade de campo, ponto de murcha permanente.

ABSTRACT

Master's of Science Dissertation
Graduate Program in Agricultural Engineering
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

SOIL WATER RETENTION ESTIMATION FOR IRRIGATION

Author: Felipe Lavarda Urach

Advisor: José Miguel Reichert

Santa Maria march 8, 2007.

The purpose of the present work was to establish and to test pedotransfer functions for water retention the Rio Grande do Sul's soils. Water retention data were obtained from Solano Peraza's dissertation, Irriga System database and in the literature. The first part of this work was the collect soil water retention data and pedotransfer functions for Rio Grande do Sul soils, forming the literature data base, in a total of 24 papers and 624 database of the water retention. The samples obtained from of Solano Peraza were collected soil profiles, in a total of 86 data of water retention, and the Irriga Project provided a database with a total of 253 data of water retention. With these database, multiple regression were done to obtain the pedotransfer functions for each database, using the option "stepwise", to determine water retention in a determined potential (-1, -6, -10, -33, -100, -500 e -1500 kPa) for different soils. To test the efficiency of the equations produced, observed vs. estimated water retention, for each water potencial, were graphed on 1:1 type retention. In almost all cases, total sand presented a high association with the water retention, followed by clay and silt content. With the reduction on in water tension (increase of the original potential), the correlation increased notably. The pedotransfer equations are efficient only when they are used to estimate moisture for soil similar to those used to obtain the equations. Besides, the database feature affects the prediction capacity of the equations produced. When some soils are predominant in the database, the equations produced show the features of those soils and, when they are used to soil moisture, the error will be larger. The contents of sand and clay together with the soil bulk density best described water retention in the linear multiple regressions. Sand content had a negative relation with water retention, while clay presented a positive relation. The soil bulk density showed a negative relation with water retention the potential of -6 to - 500 kPa and a positive relation with water retained at -1500 kPa. The best estimation of water retention occurred at a potential of -1500 kPa.

Key-words: pedotransfer, pedofunctions, water retention, field capacity, permanent wilting point.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	Erro! Indicador não definido.
2 OBJETIVOS	Erro! Indicador não definido.
2.1 Objetivo Geral	Erro! Indicador não definido.
2.2 Objetivos Específicos.....	14
3 REVISÃO DE LITERATURA	Erro! Indicador não definido.
3.1 Curva Característica de Retenção de Água no Solo.....	Erro! Indicador não definido.
3.2 Funções de Pedotransferência.....	17
4 MATERIAL E MÉTODOS	20
4.1 Tipos de Amostras para Obtenção da Curva de Retenção de Água no Solo	20
4.2 Bancos de Dados: Obtenção e caracterização	Erro! Indicador não definido.
4.3 Obtenção das Equações de Pedotransferência e sua Avaliação	28
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1 Correlação entre variáveis e retenção e água no solo	31
5.2 Equações para estimativa da retenção de água	37
5.3 Avaliação da eficiência das funções de pedotransferência.....	39
6 CONCLUSÕES	58
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
8 ANEXOS	67

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -Valores médios, mínimos, máximos, desvio padrão e coeficiente de variação (VC) das variáveis utilizadas na elaboração das equações do Banco de Dados do Solano Peraza (2003).....	22
TABELA 2 -Valores médios, mínimos, máximos, desvio padrão e coeficiente de variação (CV) das variáveis utilizadas na elaboração das equações do Banco Irriga.....	24
TABELA 3 -Valores médios, mínimos, máximos, desvio padrão e coeficiente de variação (CV) das variáveis utilizadas na elaboração das equações do Banco de Dados da Literatura.....	26
TABELA 4 - Classe textural dos solos pertencentes ao banco de dados do Sistema Irriga, Literatura e Solano Peraza.....	28
TABELA 5 - Equações de pedotransferência apresentadas na literatura e que foram testadas.....	30
TABELA 6 - Coeficiente de correlação (r) entre as variáveis e a umidade do solo retida a diferentes potenciais para o banco de dados do Solano Peraza.	31
TABELA 7 - Coeficiente de correlação (r) entre as variáveis e a umidade do solo retida a diferentes potenciais para o banco de dados do Sistema Irriga..	32
TABELA 8 - Coeficiente de correlação (r) entre as variáveis e a umidade do solo retida a diferentes potenciais para o banco de dados da literatura.....	32
TABELA 9 - Funções de pedotransferência geradas a partir do banco de dados do sistema Irriga.....	37
TABELA 10 - Funções de pedotransferência geradas a partir do banco de dados de Solano Peraza.....	38
TABELA 11 - Funções de pedotransferência geradas a partir do banco da literatura.....	38

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Classificação textural dos solos obtidos do banco de Solano Peraza (2003).....	23
FIGURA 2 - Classificação textural dos solos obtidos do banco de Sistema Irriga.....	25
FIGURA 3 - Classificação textural dos solos obtidos do banco da Literatura.	27
FIGURA 4 - Relação entre o teor de argila e a retenção de água em diferentes potenciais para os três bancos de dados.....	34
FIGURA 5 - Relação entre o teor de silte e a retenção de água em diferentes potenciais para os três bancos de dados.....	34
FIGURA 6 - Relação entre o teor de areia total e a retenção de água em diferentes potenciais para os três bancos de dados.....	35
FIGURA 7 - Relação entre a densidade do solo e a retenção de água em diferentes potenciais para os três bancos de dados.....	35
FIGURA 8 - Relação 1:1: Umidade observada no banco de Solano Peraza versus umidade estimada pelas equações geradas a partir do banco de dados do Sistema Irriga.....	40
FIGURA 9 - Relação 1:1: Umidade observada no banco do Sistema Irriga versus umidade estimada pelas equações geradas a partir do banco de dados de Solano Peraza.....	42
FIGURA 10 - Relação 1:1: Umidade observada no banco de Solano Peraza versus umidade estimada pelas equações obtidas da Literatura.....	44
FIGURA 11 - Relação 1:1: Umidade observada no banco do Sistema Irriga versus umidade estimada pelas equações obtidas da Literatura.....	46
FIGURA 12 - Relação 1:1: Umidade observada no banco de dados da literatura Sistema Irriga versus umidade estimada pelas equações geradas a partir dos dados do Sistema Irriga.....	48
FIGURA 13 - Relação 1:1: Umidade observada no banco de dados da literatura versus umidade estimada pelas equações geradas a partir dos dados de Solano Peraza.....	49
FIGURA 14 - Relação 1:1: Umidade observada no banco de dados de Solano Peraza versus umidade estimada pelas equações geradas a partir	

dos próprios dados de Solano Peraza.....	50
FIGURA 15 - Relação 1:1: Umidade observada no banco de dados do Sistema Irriga versus umidade estimada pelas equações geradas a partir dos próprios dados do Sistema Irriga.....	51
FIGURA 16 - Relação 1:1: Umidade observada no banco de dados de Solano Peraza versus umidade estimada pelas equações geradas a partir das equações geradas com os dados da literatura.....	53
FIGURA 17 - Relação 1:1: Umidade observada no banco de dados do Sistema Irriga versus umidade estimada pelas equações geradas a partir dos dados da literatura.....	54
FIGURA 18 - Relação 1:1: Umidade observada no banco de dados da literatura versus umidade estimada pelas equações geradas a partir dos dados da literatura.....	55

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A - Relação entre a argila e a retenção de água no solo sob diferentes potenciais matriciais.....	67
ANEXO B - Relação entre a areia total e a retenção de água no solo sob diferentes potenciais matriciais.....	70
ANEXO C - Relação entre o silte e a retenção de água no solo sob diferentes potenciais matriciais.....	73
ANEXO D - Relação entre a densidade e a retenção de água no solo sob diferentes potenciais matriciais.....	76

1 INTRODUÇÃO

O solo é o reservatório natural de água para as plantas e todas as práticas de manejo na agricultura visam promover condições ideais para o crescimento das plantas. Por ser um reservatório aberto para a atmosfera e para camadas mais profundas do subsolo, muitos investigadores têm procurado quantificar a capacidade de armazenamento desse reservatório (retenção de água), como também os fluxos que ocorrem tanto na superfície (infiltração e evaporação) quanto nas profundidades do solo (drenagem interna).

A conservação da água constitui um aspecto de grande relevância para uma produção agrícola mais sustentável. Então, a busca de tecnologias ou fontes de informação que façam um adequado manejo da irrigação e do uso da água se faz necessária.

Além de ser um dos recursos básicos dos ecossistemas naturais e agropecuários, o solo é considerado um recurso finito, frágil e não renovável razão pela qual a manutenção de sua qualidade tem adquirido grande relevância nas últimas décadas. Diversos indicadores de qualidade física do solo têm sido avaliados no intuito de desenvolver práticas de manejo mais adequadas e o momento mais oportuno para efetivá-las, visando conservar os recursos do solo. Para avaliar o armazenamento e a dinâmica da água no solo existem muitas técnicas de campo e de laboratório. No entanto, apesar de serem bastante precisas, exigem a disponibilidade de equipamentos caros e de pessoal treinado para executar de forma adequada às avaliações. Essas técnicas normalmente são utilizadas para fins experimentais, mas devido ao custo não se tornam, muitas vezes, economicamente viáveis para fins de irrigação.

Para contornar esse problema, nas últimas décadas surgiram modelos matemáticos para estimar a retenção da água no solo a partir de outras características físicas do solo de fácil determinação. Esses modelos são conhecidos como funções de pedotransferência e normalmente utilizam informações da granulometria do solo, matéria orgânica e densidade do solo como parâmetros de entrada. Nesse caso, a granulometria é um parâmetro pedogenético do solo, com alta estabilidade ao longo do tempo, enquanto que a densidade do solo representa um parâmetro estrutural do solo, que juntamente com a matéria orgânica, pode

sofrer alterações freqüentes devido a condições naturais ou manejos diferenciados do solo.

A maioria dessas equações foi desenvolvida para solos das regiões temperadas, onde as condições climáticas e pedogenéticas levaram a formação de solos diferenciados quanto à composição granulométrica e mineralógica. Apesar disso, muitas vezes, devido à falta de informações locais, essas equações são generalizadas e utilizadas para condições tropicais, o que pode levar a erros grosseiros na estimativa da retenção da água pelo solo.

Diante disso, nos últimos anos surgiram equações para a estimativa da retenção de água para solos do Brasil. Essas equações quando avaliadas de forma isolada, pelo seu coeficiente de determinação, apresentam boa precisão para a estimativa de água, mas ainda existem dúvidas quanto ao efeito das características dos solos das diferentes regiões sobre a eficiência dessas equações.

Com base nisso, neste estudo procurou-se montar bancos de dados diferenciados e gerar equações de pedotransferência para vários solos do Rio Grande do Sul e, em seguida, cruzar as estimativas com os dados observados. Dessa forma, procurou-se validar e avaliar a eficiência das equações na estimativa da retenção de água para várias condições e tipos de solos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estabelecer e testar funções de pedotransferência para avaliar a retenção de água em solos do Rio Grande do Sul.

2.3 Objetivos específicos

Gerar funções de pedotransferência, para estimar a retenção de água em diferentes tipos de solos do Rio Grande do Sul, usando distintos bancos de dados.

Validar as funções de pedotransferência propostas, usando distintos conjuntos de dados.

Avaliar a eficiência de predição das equações propostas em relação às equações similares, disponíveis na literatura.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Curva característica de retenção de água no solo

A relação entre umidade do solo (θ) e o potencial matricial do solo (Ψ_m), denomina-se curva de retenção de água no solo, curva característica de água no solo ou simplesmente curva de retenção, que é a parte fundamental da caracterização das propriedades hidráulicas do solo (Cichota, 2004).

A curva de retenção permite calcular a quantidade de água que um solo pode reter dentro de determinados limites de potenciais matriciais. Deve-se conhecer toda a curva para poder interpretar as características do armazenamento de água no solo em relação às necessidades hídricas de determinado cultivo (Righes et al., 1983).

Reforçando essa idéia, Costa (1998) menciona que a curva característica permite quantificar o conteúdo de água que um solo pode armazenar dentro de um determinado limite de potencial matricial. Essa determinação reveste-se de grande importância, visto que a resposta das plantas está relacionada mais diretamente ao potencial energético da água no solo, do que simplesmente ao teor de água no solo.

A curva característica de água no solo apresenta como principal vantagem o fato de mostrar o aspecto dinâmico da água no solo. Por outro lado, como até o momento não existe nenhuma teoria satisfatória para sua previsão, a mesma é determinada experimentalmente e constitui uma característica específica de cada solo ou mesmo de cada horizonte ou camada do seu perfil (Reichardt, 1985).

Uma outra particularidade da curva de retenção de água no solo é que a mesma reflete a distribuição de poros por tamanho, uma vez que a aplicação de determinada tensão fornece o tamanho dos poros esvaziados no solo (Cordeiro, 1975).

Para altos teores de água no solo, nos quais os fenômenos de capilaridade são importantes, a curva depende do arranjo e dimensões dos poros. Passa a ser, então, uma função da densidade e da porosidade do solo, sendo, influenciada pela estrutura do solo. Por outro lado, para baixos teores de água, a curva praticamente independe do arranjo poroso do solo e, conseqüentemente, da estrutura, dependendo dos fenômenos de adsorção, os quais são mais influenciados pela textura e superfície específica (Hillel et al. 1972).

Em elevados potenciais matriciais da água no solo, as forças capilares são mais atuantes e, nessa faixa de potencial matricial, a textura e a estrutura do solo determinam a quantidade de água retida pelos poros do solo. Com a redução gradativa do potencial matricial, diminuem as forças capilares e aumentam os fenômenos de adsorção da água no solo pela diminuição da espessura do envelope que envolve as partículas do solo e aumenta a energia de retenção da água no solo. Conseqüentemente, solos de textura fina ou argilosa retêm mais água quando comparados com solos arenosos. Tal condição é prevista pelo fato de possuírem maior porcentagem de material coloidal, maior espaço poroso e superfície adsortiva muito maior que os solos de textura mais arenosa (Carlesso & Zimmermann, 2000). Conforme Hillel (1982), a retenção de água pelo solo em condições de altas tensões ou baixo potencial matricial é uma decorrência mais da adsorção e, portanto, está mais relacionada a condições texturais do que estruturais do solo.

A compactação do solo afeta a curva de retenção de água, normalmente provocando redução na porosidade total do solo em decorrência da diminuição dos poros maiores interagregados. Isso significa que o conteúdo de água de saturação e os teores de água retidos a baixos potenciais são reduzidos. Já o volume de poros médios, é provavelmente maior em solos compactados, pois muitos poros grandes são reduzidos. Por sua vez, os microporos não sofrem alterações. Assim, a curva para solos compactados pode ser quase idêntica à curva de solos não compactados na faixa de altas sucções (Vasconcellos, 1993).

A curva de retenção de água é afetada pela textura do solo, de forma que quanto maior for o conteúdo de argila, maior será, em geral, o teor de água retida sob um dado potencial matricial e mais suave será a inclinação da curva devido a uma distribuição mais uniforme de tamanho dos poros. Em solos arenosos, normalmente os poros são maiores, sendo mais rapidamente esvaziados a baixas tensões, restando pequenas quantidades de água retidas a potenciais menores, o que explica a inclinação acentuada da curva de retenção de água (Hillel 1982).

O tipo de mineral presente no solo também pode interferir na forma da curva, pois segundo Russel (1941), citado em Hillel (1982), um fenômeno importante e ainda não completamente entendido é a possível variação na característica de umidade do solo causada pela contração e expansão das argilas, devido ao tipo de argila e a concentração da solução do solo em torno das mesmas.

Analisando o comportamento da curva de retenção de água em relação as diferentes profundidades, Righes et al. (1983) observaram que a retenção de água em potenciais maiores que -33 kPa obedeceu, particularmente, a variação da composição granulométrica das diferentes camadas. No entanto, quando as amostras de solo foram submetidas a potenciais menores ou iguais a -33 kPa, observou que esse fato não ocorreu, sendo contrário à variação da composição granulométrica.

Para a determinação da curva de retenção de água, pode-se ir diretamente a campo ou então no laboratório com amostras indeformadas. Os métodos no campo usualmente requerem a instalação de tensiômetros e tem a vantagem de possibilitar a determinação da relação potencial matricial e umidade do solo em muitas profundidades simultaneamente sob condições naturais. Por outro lado, os métodos de laboratório possibilitam a análise de um grande número de solos simultaneamente e com maior facilidade (Lin, 1999).

A confecção da curva para cada tipo de solo permite estimar o nível até o qual o teor de água pode decrescer sem afetar o desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente, sua produtividade, fornecendo assim elementos necessários para uma irrigação racional com a utilização de técnicas como a do tensiômetro (Vasconcellos, 1993).

3.2 Funções de pedotransferência

O conhecimento da capacidade de retenção de água no perfil de um solo é de fundamental importância para a resolução de problemas envolvendo irrigação, drenagem, armazenamento e transporte de água e nutrientes, bem como o controle da água no solo.

A capacidade que um solo apresenta em reter certo volume de água, a um determinado potencial matricial, é um importante critério no dimensionamento de projetos de irrigação, e também em estudos de disponibilidade de água às plantas, como infiltração, drenagem, condutividade hidráulica, estresse hídrico e movimento de solutos no solo (Saxton et al. 1986; Kern, 1995).

Contudo, a determinação das propriedades hidráulicas do solo no campo é trabalhosa, demorada e cara. Requer um grande número de análises de propriedades hidráulicas para, assim, considerar as propriedades que variam tanto vertical como horizontalmente no solo. No laboratório, persistem problemas de custo, morosidade e inexatidão. Todavia, as propriedades de retenção de água são requeridas em modelos de simulação de fluxos de água e transporte de solutos, bem como muito usados em várias estratégias de manejo de água no solo (Bouma, 1989).

Devido às dificuldades experimentais e ao longo tempo envolvido nessas determinações, tem-se observado um crescente interesse por métodos indiretos de estimativa da capacidade de retenção da água nos solos (Pachepsky e Rawls, 1999), os quais utilizam dados taxonômicos simples. Dentre eles, o mais importante é o método da “função de pedotransferência” (PTF), o qual descreve equações que expressam dependências da retenção da água e condutividade hidráulica com parâmetros básicos disponíveis em levantamentos de solos.

O termo funções de pedotransferência (FPT) foi introduzido por Bouma (1989), citado por Pachepsky & Rawls (1999), para referir-se às equações que relacionam características de retenção de umidade ou condutividade hidráulica com outras características mais facilmente obtidas. Atualmente, esse termo é empregado num sentido mais abrangente, para designar as equações que estimam características edáficas de difícil obtenção a partir de outras mais facilmente obtidas, incluindo características morfológicas.

Assim, FPTs são equações de regressão ou modelos que relacionam propriedades básicas do solo entre si e que são de importância para a produção agrícola e manejo de recursos naturais (Salchow et al., 1996). O princípio das FPTs consiste em que o sistema de informação ou os dados permitam expressar, de forma matemática, funções de pedotransferência específicas para uma variedade de propriedades e qualidades de solo. As FPTs permitem expressar de forma algébrica a umidade do solo a um determinado valor de potencial matricial (Tomasella et al., 2000).

No entanto, o enfoque de FPTs geralmente é dado para a parte puramente física, onde são relacionados os limites hídricos como granulometria, porosidade, densidade do solo e matéria orgânica do solo, deixando fora outras variáveis

químicas, podendo limitar a análise integral dos fatores que explicam a retenção de água no solo.

Na literatura são encontrados alguns modelos ou equações de pedotransferência que tentam descrever a umidade do solo a diferentes potenciais. Como exemplos, temos as equações desenvolvidas por: Arruda et al. (1987), para a realização deste trabalho foram utilizadas 218 amostras obtidas em vários locais do estado de São Paulo; Bell et al. (1995) desenvolveu equações a partir de 148 amostras para o estado do México; Oliveira et al. (2002) desenvolveu funções de pedotransferência para o estado de Pernambuco a partir de dados de 98 perfis de solos, onde foram incluídos 32 perfis da coleção de Solos de Referência do Estado de Pernambuco; Masutti (1997) e Meng et al. (1987) desenvolveram funções de pedotransferência para solos de regiões temperadas; Giarola et al. (2002) utilizaram amostras deformadas e indeformadas provenientes de 18 perfis de solos representativos de diversos locais do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina perfazendo um total de 35 amostras; e Tomazella et al. (2000) desenvolveu um modelo para as condições de solos brasileiros, utilizando dados de mais de 500 horizontes.

O desenvolvimento das equações, adaptadas para as condições de solos tropicais, possibilitou a determinação dos parâmetros da curva de retenção de Van Genuchten (1980) com uma precisão muito melhor do que com o uso de equações desenvolvidas para outros solos.

Tais equações não devem ser usadas sem que anteriormente seja feita uma análise criteriosa das mesmas, pois, em sua maioria, foram desenvolvidas com solos de clima temperado e a partir de dados gerados por métodos diversos dos em uso nos laboratórios brasileiros, como mencionam Oliveira et al. (2002). Outrossim, de modo geral, as equações que são apresentadas não são validadas com base em dados independentes dos dados usados na geração das funções de pedotransferência. Portanto, há uma lacuna a ser preenchida.

As funções de pedotransferência tendem a apresentar resultados mais precisos quanto mais homogêneos forem os solos que compõem a base de dados e quanto mais próximos destes estiverem os solos que terão seus dados estimados. Um problema bastante comum refere-se a diferenças nos métodos analíticos empregados para obtenção das variáveis dependentes e independentes (Oliveira, 2002).

A capacidade preditiva de uma equação pode ser inspecionada visualmente (Bouma, 1989), comparando os dados estimados com os dados de curvas obtidas (curva 1:1). Essa curva não dá informações sobre o desempenho das FPTs em relação às aplicações específicas de modelos de simulação dinâmicos, como cálculo do déficit de umidade e a capacidade de previsão de água no solo.

Assim, percebe-se que há um esforço no desenvolvimento de FPTs, mas poucas são as equações desenvolvidas com bancos de dados com um número considerável de informações. Além disso, essas equações não são validadas para uso e aplicação regional.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Tipos de amostras para obtenção da curva de retenção de água no solo

Na obtenção dos dados de retenção de água, podem ser utilizadas amostras com estrutura preservada ou deformada. Amostras com estrutura preservada são utilizadas, vai de regra, para as tensões de 10 e 60 cm pela técnica da mesa de tensão, que consiste em provocar uma drenagem da água retida nos poros das amostras de solo, previamente saturadas, por meio de tensão de coluna de água, até cessar a drenagem (EMBRAPA, 1997). Amostras com estrutura preservada são também utilizadas, geralmente, desde -10 kPa até -1500 kPa pelas técnicas da câmara de pressão de Richards (placas porosas). Amostras com estruturas não preservadas também são utilizadas para potenciais mais baixos (-300 a -1500 kPa) tanto na câmara de Richards quanto no psicrômetro (por exemplo, WP4 Dewpoint potentialMeter).

A câmara de pressão de Richards (placas porosas) consiste em colocar as amostras previamente saturadas nas placas de cerâmica submetendo-as a determinada pressão, até cessar a drenagem da água contida nos poros, correspondente ao potencial aplicado. O WP4 Dewpoint potentialMeter é um aparelho que consiste na mensuração do potencial da água de uma amostra de solo com umidade conhecida que é colocada em uma câmara hermeticamente fechada,

quantificando-se a umidade relativa dentro da câmara e estima-se o potencial matricial.

Dessa forma, existem várias técnicas para determinar o potencial da água nas amostras de solo. Quando se usam amostras com estrutura preservada, o efeito dos macroporos e microporos sobre a retenção de água é mantido, o que retrata melhor as condições reais de campo. No entanto, muitas vezes, a falta de estrutura para coleta e análise de amostras com estrutura preservada leva à determinação da retenção de água em amostras desestruturadas. A coleta, a manipulação e as análises são facilitadas nesse tipo de amostras, mas perde-se o efeito natural dos poros na retenção da água, principalmente nos potenciais mais altos (-1 a -100 kPa). Já nos potenciais mais baixos (-100 a -1500 kPa), o efeito da estrutura sobre a retenção de água vai sendo reduzido, e tem-se um aumento acentuado do efeito da granulometria do solo.

Nesse estudo, devido à falta de padronização das análises, teremos dados provenientes de bancos nos quais as análises foram feitas em amostras com estrutura preservada e amostras desestruturadas. Outra dificuldade encontrada, é que alguns trabalhos apresentam seus resultados de umidade do solo em base de massa (umidade gravimétrica) e outros em base de volume (umidade volumétrica). Para contornar esse problema, transformaram-se os valores de umidade do solo nos bancos de dados, de forma a deixá-los com a mesma unidade do resultado obtido pela equação de pedotransferência correspondente. Para fazer esse ajuste, ora multiplicava-se a umidade gravimétrica pela densidade do solo da amostra correspondente para obter-se a umidade volumétrica, e quando se tinha a umidade volumétrica, dividia-se pela densidade para obter a umidade gravimétrica.

4.2 Bancos de Dados: obtenção e caracterização

Neste trabalho foram usadas informações de retenção de água de solos do estado do Rio Grande do Sul. As três fontes foram: (1) dados obtidos na Literatura, (2) dados da dissertação de Solano Peraza (2003) e (3) dados repassados pelo Sistema Irriga. Abaixo se descreve a forma de coleta das amostras e, ato contínuo, detalhes de solos e potenciais matriciais avaliados.

O estudo foi realizado na Universidade Federal de Santa Maria, sendo que a primeira etapa do trabalho consistiu na coleta de informações de retenção de água no solo e de funções de pedotransferência para solos do Rio Grande do Sul. Para isso, foi necessário o deslocamento para algumas Universidades do Estado com objetivo de coletar dados de retenção de água no solo, que possuem informações de umidade volumétrica a -1, -6, -10, -33, -100, -500, -1000 e -1500 kPa, teores de areia, silte, argila e matéria orgânica do solo, densidade do solo e densidade de partículas, em teses e dissertações em Universidades do Rio Grande do Sul (UFPel, UFRGS e UFSM). Nessas visitas identificamos um total de 24 trabalhos com dados de retenção de água, dando origem ao que chamamos de Banco de Dados da Literatura (Tabela 1). Para estabelecer as FPTs usando os dados da Literatura, foram excluídos os dados obtidos por Solano Peraza (2003), pois utilizou o método WP4, enquanto os demais utilizaram a placa porosa de Richards para quantificar os pontos de potencial igual ou menor que -10 kPa.

Tabela 1. Valores médios, mínimos, máximos, desvio padrão e coeficiente de variação (CV) das variáveis utilizadas na elaboração das equações do Banco de Dados da Literatura.

Variável	Máximo	Mínimo	Média	Desvio padrão	CV (%)
Areia total (%)	98,70	3,50	41,67	17,72	42,52
Silte (%)	78,00	1,00	24,68	11,82	47,90
Argila (%)	82,00	1,22	33,51	17,10	51,05
Densidade do solo (Mg m^{-3})	1,85	0,86	1,44	0,21	14,77
Densidade de partículas (Mg m^{-3})	2,96	1,96	2,56	0,16	6,42
Matéria orgânica (%)	9,80	0,10	2,38	1,64	68,66
Uv -1 kPa*	88,40	10,00	38,74	7,19	18,55
Uv -6 kPa	93,65	4,90	34,73	9,80	28,22
Uv -10 kPa	77,40	4,00	30,96	10,55	34,07
Uv -30 kPa	75,06	1,93	29,34	8,56	29,18
Uv -100 kPa	74,99	1,48	26,00	8,67	33,36
Uv -500 kPa	85,28	1,72	19,29	9,34	48,42
Uv -1500 kPa	52,10	0,50	21,51	7,56	35,15

* Umidade volumétrica (Uv) do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

A maior variação observada na umidade do solo a potenciais mais baixos (-500 e -1500 kPa) pode estar ligada à maior amplitude textural do banco de dados, o que gera uma maior dispersão na retenção de água. Essa dispersão é desejável para que as equações geradas abranjam uma maior amplitude de solos.

Nos solos mais intemperizados, existe a tendência de ocorrer maior retenção de água a potenciais menores, devido à maior área superficial específica proporcionada pela argila. A maior parte dos atributos dos solos apresenta grande amplitude de variação, o que é fundamental para o estabelecimento das relações (Giarola et al. 2002). Essa grande amplitude pode ser explicada pela gênese diferenciada dos solos avaliados, o que é decorrente de material de origem diferente, além da variação no clima e no relevo.

No entanto, cabe salientar que nos solos menos intemperizados, a presença de argilominerais expansivos pode proporcionar maior área superficial específica e contribuir para maior retenção de água.

No Banco da Literatura, há casos nos quais foi utilizada estrutura preservada e nos quais foi utilizada estrutura alterada, sendo definida como estrutura mista.

O banco de dados da literatura foi obtido de trabalhos dos seguintes autores que segue: Kochhann (1971); Righes (1971); Cogo (1972); Gomes (1972); Curi (1975); Abrão (1977); Scopel (1977); Cintra (1980); Farias (1981); Motta (1988); Reichert (1988); Salton (1991); Costa (1993); Carpenedo (1994); Barcelos (1996); Cintra (1997); Rojas (1998); Schäfer (1999); Lima (2001); Litzke (2002) e Giarola (2002). O banco da literatura é bastante heterogêneo, quanto à textura, pois se trata de um banco composto por dados de todo RS, predominando solos francos (Figura 1).

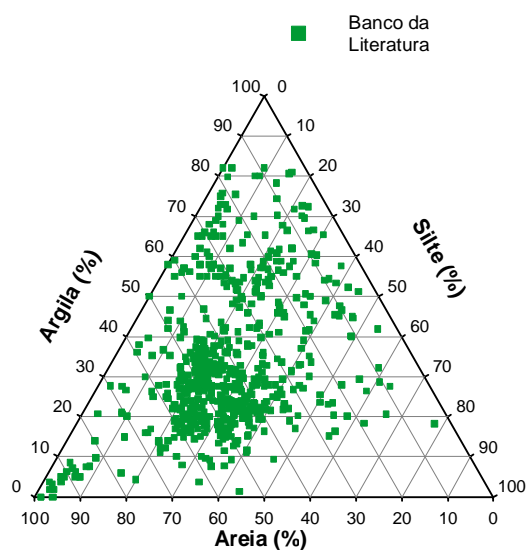


Figura 1 - Classificação textural dos solos obtidos do banco da Literatura.

As amostras obtidas do Banco Solano Peraza (2003) são de solos com diferentes propriedades físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas, os quais foram amostrados em distintos locais do RS. Foram coletadas amostras em cortes de estradas com exposição do perfil do solo, todas em áreas não cultivadas. Após coletadas, as amostras foram secas ao ar, destorroadas manualmente com um rolo e tamisadas com uma peneira de abertura de malha de 2 mm (Tabela 2). Dessa forma, a retenção de água foi avaliada em solo com estrutura alterada para todos os potenciais matriciais, sendo utilizado para isso a mesa de tensão, placas de Richards e o WP4 para determinar o potencial da água no solo.

Tabela 2. Valores médios, mínimos, máximos, desvio padrão e coeficiente de variação (CV) das variáveis utilizadas na elaboração das equações do Banco de Dados do Solano Peraza (2003).

Variável	Máximo	Mínimo	Média	Desvio padrão	CV (%)
Areia grossa (%)	47,40	1,30	12,02	10,05	83,65
Areia fina (%)	64,10	1,20	23,22	16,75	72,15
Areia total (%)	95,80	3,70	35,23	23,41	66,45
Silte (%)	78,00	2,10	29,53	15,86	53,71
Argila (%)	76,60	1,90	35,23	18,38	52,15
Densidade do solo (Mg m^{-3})	1,51	0,88	1,14	0,13	11,37
Porosidade total (%)	0,67	0,43	0,57	0,05	9,01
Matéria orgânica (%)	9,84	0,05	2,03	1,55	76,40
Ug -6 kPa *	0,87	0,15	0,42	0,11	27,05
Ug -10 kPa	0,77	0,08	0,36	0,11	31,02
Ug -33 kPa	0,63	0,03	0,28	0,10	35,50
Ug -100 kPa	0,52	0,02	0,23	0,09	37,92
Ug -500 kPa	0,39	0,02	0,19	0,08	40,53
Ug -1500 kPa	0,33	0,02	0,17	0,07	42,82

* Umidade gravimétrica (Ug) do solo (kg kg^{-1})

A variação textural do solo também proporcionou uma grande variação na retenção de água nos diferentes potenciais (Tabela 2). Quanto à porosidade total, observa-se uma pequena variação (9 %), o que é esperado por ser um banco de dados obtidos com amostras desestruturadas. Dessa forma, nesse banco, as propriedades granulométricas, que são mais estáveis e são determinadas pedogeneticamente, são as principais responsáveis pela retenção de água no solo.

O banco de dados obtido de Solano Peraza (2003) é bastante representativo dos solos encontrados no Rio Grande do Sul e apresenta uma grande dispersão quanto a granulometria das diferentes classes de solo (Figura 2).

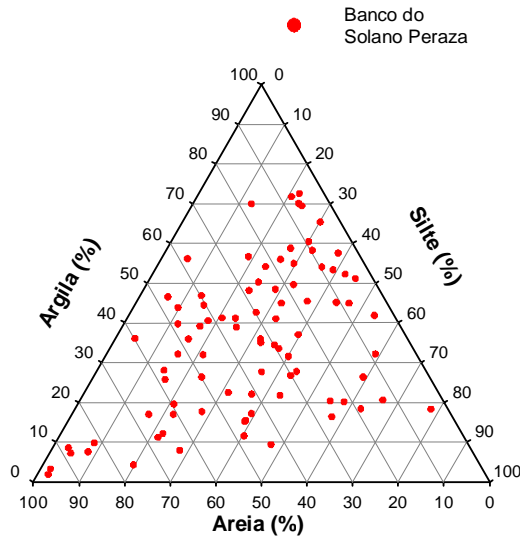


Figura 2 - Classificação textural dos solos obtidos do banco de Solano Peraza (2003).

O banco de dados obtido de Solano Peraza (2003) é o mais representativo para os solos do Rio Grande do Sul. A grande variação nos parâmetros físicos avaliados e a dispersão não concentrada das frações granulométricas são desejadas para as funções serem representativas para várias classes de solos.

O Projeto Irriga nos repassou um Banco de Dados com um total de 253 dados, com informações sobre densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade, umidade a -1, -6, -33, -100, -500 e -1500 kPa (Tabela 3).

Tabela 3. Valores médios, mínimos, máximos, desvio padrão e coeficiente de variação (CV) das variáveis utilizadas na elaboração das equações do Banco Irriga.

Variável	Máximo	Mínimo	Média	Desvio padrão	CV (%)
Areia grossa (%)	26,5	0,2	8,1	5,1	63,6
Areia fina (%)	56,6	0,8	16,7	11,3	67,6
Areia (%)	72,7	1,2	26,0	15,6	59,8
Silte (%)	67,6	4,2	19,5	7,0	35,8
Argila (%)	86,7	11,1	55,9	16,0	28,61
Densidade do solo (Mg m^{-3})	1,63	1,01	1,34	0,12	9,1
Densidade de partículas (Mg m^{-3})	3,0	1,8	2,7	0,1	3,2
Macroporosidade (%)	36,4	0,6	10,02	4,35	43,3
Microporosidade (%)	52,6	10,6	41,3	5,12	12,4
Porosidade total (%)	64,0	0,49	50,9	7,4	14,6
Uv -1 kPa	0,60*	0,27	0,47	0,06	12,27
Uv -6 kPa	0,53	0,24	0,41	0,05	13,14
Uv -30 kPa	0,46	0,22	0,37	0,05	14,73
Uv -100 kPa	0,45	0,19	0,35	0,05	15,73
Uv -500 kPa	0,41	0,13	0,27	0,06	20,78
Uv -1500 kPa	0,34	0,09	0,22	0,05	21,85

* Umidade volumétrica (Uv) do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

As amostras do Sistema Irriga foram coletadas em trincheiras nas profundidades correspondentes à porção mediana de cada camada amostrada: camada superficial (0 a 10 cm), intermediária (10 a 30 cm) e inferior (30 a 60 cm). Coletaram-se amostras com estrutura preservada, com o auxílio de um extrator, no qual foi acoplado um cilindro de metal de 5,56 cm de diâmetro, 3 cm de altura e volume $72,84 \text{ cm}^3$, para a determinação da microporosidade, densidade do solo e curva característica de água no solo.

As amostras com estrutura preservada foram utilizadas para determinar a retenção de água nos potenciais de -1 e -6 kPa, em mesa de tensão, e de -33 e -100 kPa, com placas de Richards. Amostras desestruturadas foram coletadas para determinação granulométrica e a retenção de água nos potenciais de -500 e -1500 kPa (em WP4)

No banco de dados do Sistema Irriga predominam solos argilosos, como pode ser observado na figura 3.

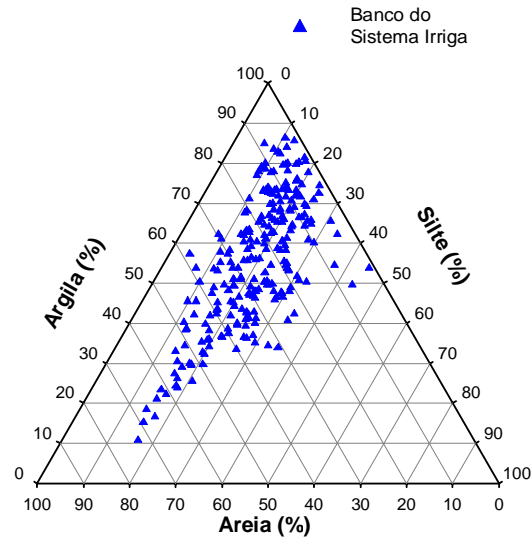


Figura 3 - Classificação textural dos solos obtidos do banco do Sistema Irriga.

O banco de dados do Sistema Irriga apresenta menor variação textural, maior teor médio de argila e menos silte (Tabela 3). Devido a isso, a variação no teor de água retida em cada potencial também é menor, o que acaba gerando um banco mais homogêneo. Por outro lado, observa-se maior variação na quantidade de poros, o que é esperado por ser um banco proveniente de amostras com estrutura preservada.

Observando-se a Tabela 4, verifica-se que, em cada banco de dados predomina uma determinada classe textural. Nesse caso, as equações geradas estimam melhor a retenção de água para classes texturais semelhantes das quais foram geradas. Para solos de textura distinta, a estimativa será pior e, portanto, menos precisa.

Tabela 4. Classe textural dos solos pertencentes ao banco de dados do Sistema Irriga, Literatura e Solano Peraza.

Classe textural	Banco de dados		
	Sistema Irriga	Solano Peraza	Literatura
Muito Argiloso	113	7	59
Argila	95	23	107
Franco argilo arenoso	17	6	129
Franco argiloso	14	10	72
Franco arenoso	7	8	71
Argila arenosa	5	2	21
Areia franca	1	3	7
Argila siltoso	1	6	12
Franco argilo siltoso	-	2	5
Franco	-	8	107
Franco siltoso	-	7	13
Areia	-	4	20
Total	253	86	624

4.3 Obtenção das equações de pedotransferência e sua avaliação

Uma próxima etapa do trabalho, devido às dificuldades de determinação das propriedades hidráulicas do solo em laboratório, foi o estabelecimento das funções de pedotransferência, sendo essas utilizadas para expressar a dependência da retenção de água no solo com propriedades dos solos.

A partir dos três bancos de dados obtidos, foram feitas análises de regressão múltipla para a obtenção das funções de pedotransferência para cada banco de dados, usando a opção “stepwise” (SAS, 1997). Assim, foram selecionadas as variáveis que entraram nas equações de regressão, estimando-se os parâmetros para as variáveis independentes incluídas no modelo, como areia, silte, argila, densidade do solo.

Para o ajuste das regressões múltiplas, utilizou-se o banco de dados completo para cada condição. Van Genuchten (1980), Wösten et al. (1990), Wösten et al. (1995), Salchow et al. (1996) e Pachepsky & Rawls (1999) obtiveram melhoria na predição da umidade com dados mais homogêneos, já que eles obtiveram consideráveis aumentos de coeficiente de predição após agruparem os solos mais uniformes. No entanto, outros pesquisadores como Oliveira et al. (2002) verificaram que o agrupamento dos dados em subconjuntos baseado na classe textural ou na

atividade da fração argila ou no grau aproximado de desenvolvimento, de maneira geral, não produziu melhorias consideráveis na capacidade preditiva das funções de pedotransferência.

Com a obtenção das equações separadamente para cada um dos três bancos de dados, essas foram testadas com os outros dois bancos de dados, da seguinte forma: Banco de Dados da Literatura versus Equações do Banco Irriga e Equações de Solano Peraza; Banco de Dados Irriga versus Equações Literatura e Equações Solano Peraza; e Banco de Dados de Solano Peraza versus Equações Irriga e Equações Literatura. Além disso, foram testadas as equações do Banco Irriga com o próprio banco de dados do Sistema Irriga, e as equações obtidas do banco de Solano Peraza com os próprios dados do banco.

Para avaliar a eficiência das funções de pedotransferência foi utilizada a relação 1:1, onde se utilizaram os dados observados dos bancos de dados, sendo que os resultados calculados foram comparados com resultados observados do banco de dados referente. As equações aqui apresentadas são as que apresentam maior capacidade preditiva, o que é expresso pelo maior coeficiente de ajuste (R^2).

Além das equações geradas a partir de cada banco, utilizaram-se algumas equações disponíveis na literatura, as quais também foram testadas perante aos dados observados nos três bancos estudados. Na tabela 5 são apresentadas às equações obtidas da literatura. Dentre essas equações, apenas as obtidas por Giarola et al. (2002) utilizam amostras com estrutura preservada para a obtenção da curva de retenção de água no solo, sendo que o conteúdo de água retido é expresso em base de volume. Nas demais equações (Arruda et al. 1987; Meng et al. 1987; Bell et al. 1995; Masutti, 1997; Oliveira et al. 2002) foram obtidas com amostras desestruturadas e o resultado do conteúdo de água retido é expresso em base de massa. Cabe salientar ainda que as equações de Meng et al. (1987) e Bell et al. (1995) foram obtidas para solos de regiões temperadas.

Tabela 5 - Equações de pedotransferência apresentadas na literatura e que foram testadas.

Fonte	Equação ⁽¹⁾
Arruda et al. (1987)	$Ug_{CC - 33 \text{ kPa}} (\text{kg kg}^{-1}) = [3,1 + 0,629 (\text{argila} + \text{silte} (\%)) - 0,0034 (\text{argila} + \text{silte} (\%))^2] / 100$
Arruda et al. (1987)	$Ug_{PMP - 1500 \text{ kPa}} (\text{kg kg}^{-1}) = \{[398,9 (\text{argila} + \text{silte} (\%))] / [1308,1 + (\text{argila} + \text{silte} (\%))]\} / 100$
Bell et al. (1995)	$Ug_{PMP - 1500 \text{ kPa}} (\text{kg kg}^{-1}) = (6,93 + 0,286 \text{ argila} (\%)) / 100$
Oliveira et al. (2002)	$Ug_{CC - 33 \text{ kPa}} (\text{kg kg}^{-1}) = [0,000333 \text{ silte} (\%) + 0,000387 \text{ argila} (\%)] \times 10$
Oliveira et al. (2002)	$Ug_{PMP - 1500 \text{ kPa}} (\text{kg kg}^{-1}) = [0,000038 \text{ areia} (\%) + 0,000153 \text{ silte} (\%) + 0,000341 \text{ argila} (\%)] \times 10 [- 0,030861 Ds (\text{g cm}^{-3})]$
Masutti (1997)	$Ug_{CC - 33 \text{ kPa}} (\text{kg kg}^{-1}) = [-1,5691 + 0,4289 (\text{argila} + \text{silte} (\%))] / 100$
Masutti (1997)	$Ug_{PMP - 1500 \text{ kPa}} (\text{kg kg}^{-1}) = [0,530482 + 0,301235 \text{ silte} (\%) + 0,092822 \text{ argila} (\%)] / 100$
Meng et al. (1987)	$Ug_{CC - 33 \text{ kPa}} (\text{kg kg}^{-1}) = -0,0044 + 0,0082 \text{ argila} (\%)$
Meng et al. (1987)	$Ug_{PMP - 1500 \text{ kPa}} (\text{kg kg}^{-1}) = -0,0028 + 0,0038 \text{ argila} (\%)$
Giarola et al. (2002) ⁽³⁾	$\theta_{CC - 10 \text{ kPa}} (\text{m}^3 \text{m}^{-3}) = 0,081 + 0,005 \text{ silte} (\%) + 0,004 \text{ argila} (\%)$
Giarola et al. (2002) ⁽³⁾	$\theta_{PMP - 1500 \text{ kPa}} (\text{m}^3 \text{m}^{-3}) = 0,024 + 0,005 \text{ silte} (\%) + 0,003 \text{ argila} (\%)$

⁽¹⁾ Os valores de areia, silte e argila (em %) e a densidade do solo (em Mg m^{-3}).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Correlações entre variáveis e retenção de água

A retenção de água no solo é dependente de características estruturais, granulométricas e mineralógicas do solo. O somatório do efeito desses fatores vai determinar a capacidade de determinado solo reter e conduzir água. As principais forças responsáveis pela retenção da água o solo são as forças capilares, ligadas aos poros do solo, e as forças de adsorção, ligadas às partículas granulométricas do solo. Juntas, essas forças dão origem às forças mátricas, que dão origem ao potencial mátrico da água no solo (Libardi, 2005).

O coeficiente de correlação de Pearson mostra o grau de relação existente entre as características do solo, de forma isolada, e a umidade retida a determinado potencial. Portanto, é interpretado como um indicador que descreve a interdependência entre as variáveis. Quanto maior o coeficiente de correlação, mais é afetada a retenção por aquela propriedade do solo. Nas Tabelas 6, 7 e 8, tem-se a correlação entre as propriedades avaliadas em cada banco e seu efeito sobre o conteúdo de água retido.

Tabela 6. Coeficiente de correlação (r) entre as variáveis e a umidade gravimétrica do solo retida a diferentes potenciais para o banco de dados do Solano Peraza.

Variável ¹	Potencial (kPa)					
	-6	-10	-33	-100	-500	-1500
AT	-0,699	-0,735	-0,766	-0,802	-0,843	-0,843
AF	-0,563	-0,619	-0,668	-0,710	-0,753	-0,756
AG	-0,691	-0,678	-0,669	-0,684	-0,708	-0,703
Silte	0,451	0,483	0,501	0,501	0,468	0,425
Argila	0,501	0,518	0,543	0,588	0,669	0,707
S+Are	-0,501	-0,518	-0,543	-0,588	-0,669	-0,707
S+Arg	0,699	0,734	0,766	0,802	0,842	0,843
Ds	-0,447	-0,527	-0,593	-0,635	-0,659	-0,653
MO	0,216	0,252	0,274	0,265	0,205	0,153
Pt	0,447	0,527	0,593	0,635	0,659	0,653

¹ AT=areia total, AG= areia grossa, AF= areia fina, Arg= argila, S+Are= silte+areia, S+Arg= silte+argila, Ds= densidade do solo, MO= matéria orgânica, Pt= porosidade total.

Tabela 7. Coeficiente de correlação (r) entre as variáveis e a umidade volumétrica do solo retida a diferentes potenciais para o banco de dados do Sistema Irriga.

Variável ¹	Potencial (kPa)					
	-1	-6	-33	-100	-500	-1500
Areia	-0,586	-0,706	-0,731	-0,748	-0,679	-0,739
AF	-0,539	-0,618	-0,623	-0,649	-0,585	-0,645
AG	-0,545	-0,669	-0,700	-0,712	-0,649	-0,702
Silte	-0,089	0,016	0,063	0,086	0,054	0,058
Argila	0,613	0,689	0,694	0,703	0,644	0,705
S+Arg	-0,474	-0,502	-0,481	-0,484	-0,432	-0,483
Are+Arg	-0,537	-0,661	-0,679	-0,702	-0,598	-0,667
Ds	-0,621	-0,475	-0,377	-0,378	-0,257	-0,311
Dp	0,319	0,376	0,401	0,417	0,389	0,438
Mac	0,089	-0,227	-0,302	-0,318	-0,253	-0,236
Mic	0,598	0,779	0,777	0,799	0,606	0,657
Pt	0,525	0,438	0,362	0,364	0,247	0,324

¹ AF= areia fina, AG= areia grossa, S+Arg= silte+argila, Are+Arg=areia+argila, Ds= densidade do solo, Dp= densidade de partícula, Mac= macroporosidade, Mic= microporosidade, Pt= porosidade total.

Tabela 8. Coeficiente de correlação (r) entre as variáveis e a umidade volumétrica do solo retida a diferentes potenciais para o banco de dados da Literatura.

Variável ¹	Potencial (kPa)						
	-1	-6	-10	-33	-100	-500	-1500
AT	-0,338	-0,703	-0,732	-0,653	-0,722	-0,598	-0,711
Silte	0,040	0,330	0,365	0,303	0,232	0,278	0,213
Argila	0,333	0,688	0,695	0,538	0,716	0,469	0,701
S+Are	-0,316	-0,678	-0,689	-0,533	-0,711	-0,469	-0,698
S+Arg	0,352	0,710	0,737	0,659	0,728	0,598	0,715
Ds	-0,344	-0,559	-0,588	-0,604	-0,612	-0,596	-0,548
MO	0,136	0,417	0,437	0,336	0,261	0,250	0,213
Pt	0,431	0,509	0,546	0,591	0,587	0,597	0,522

¹ AT=areia total, Arg= argila, S+Are= silte+areia, S+Arg= silte+argila, Ds= densidade do solo, MO= matéria orgânica, Pt= porosidade total.

De maneira geral, observa-se que a composição granulométrica do solo é a característica que melhor descreve a retenção de água pelo solo. A argila apresenta uma correlação positiva e a areia uma correlação negativa, o que é um resultado esperado, devido ao efeito da área superficial específica das partículas. Resultados semelhantes foram obtidos por Giarola et al. (2002) e Oliveira et al. (2002). Para o banco de Solano Peraza (2003) (Tabela 6), o teor de areia total apresenta o maior coeficiente de correlação com a água retida em todos os potenciais, o que mostra

que em condições de solo desestruturado, a granulometria assume grande importância na retenção de água.

No banco do Sistema Irriga, a microporosidade é responsável pela maior parte da água retida a potenciais matriciais mais altos (até -100 kPa) e apresenta o maior coeficiente de correlação com a água retida (Tabela 7). Isso demonstra o efeito da estrutura do solo, que neste banco é preservada, sobre a capacidade do solo reter água. Já para os potenciais mais baixos (-500 e -1500 kPa), onde as forças de adsorção passam a dominar a retenção de água, os teores de areia e silte apresentam melhor correlação com a água retida.

Para o conjunto de dados obtidos da literatura (Tabela 8), o somatório dos teores de silte e argila apresentaram maior correlação, sendo seguida pelo teor de areia total.

A correlação da granulometria (areia total, silte e argila) dos solos com a retenção de água é alta para o conjunto de dados estudado (Tabelas 6, 7 e 8). De modo geral, a areia total apresenta maior associação com a retenção de água, sendo seguida pelo teor de argila e silte. Isso concorda com Rivers & Shipp (1978), os quais acharam correlações significativas da retenção de água no solo com a percentagem de areia muito fina, silte e argila, sendo que esses autores encontraram maior associação da retenção de água com o teor de argila do solo. Solano Peraza (2003) encontrou que as frações granulométricas e a matéria orgânica são os principais fatores ligados a retenção de água para solos do Rio Grande do Sul.

O efeito da areia, silte, argila e densidade do solo sobre a retenção de água, juntando os dados dos três bancos, pode ser visualizada claramente nas Figuras 4, 5 e 6. Essas figuras mostram a tendência do efeito isolado de cada fração granulométrica sobre a água retida.

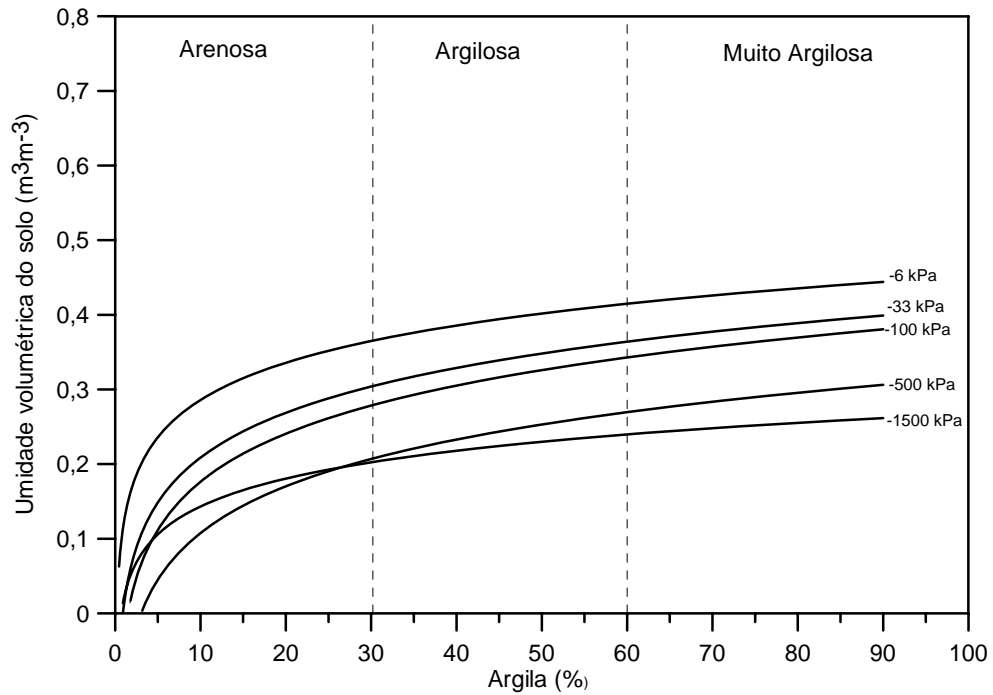


Figura 4 - Relação entre a retenção de água em diferentes potenciais e o teor de argila para os três bancos de dados. As equações com os dados observados, estão no Anexo A.

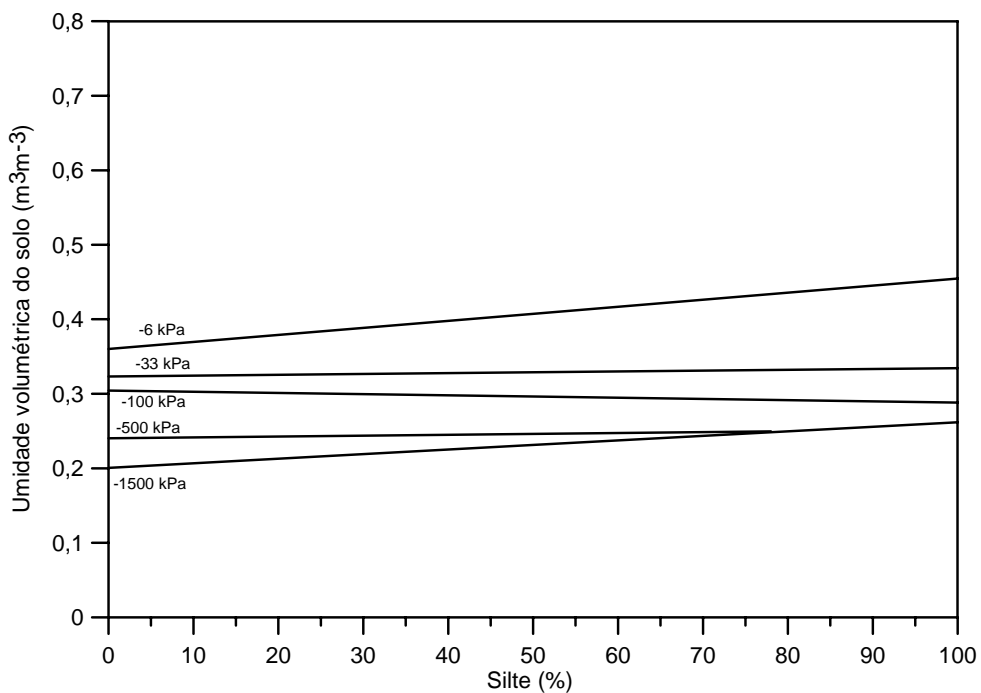


Figura 5 - Relação entre a retenção de água em diferentes potenciais e o teor de silte para os três bancos de dados. As equações com os dados observados, estão no Anexo B.

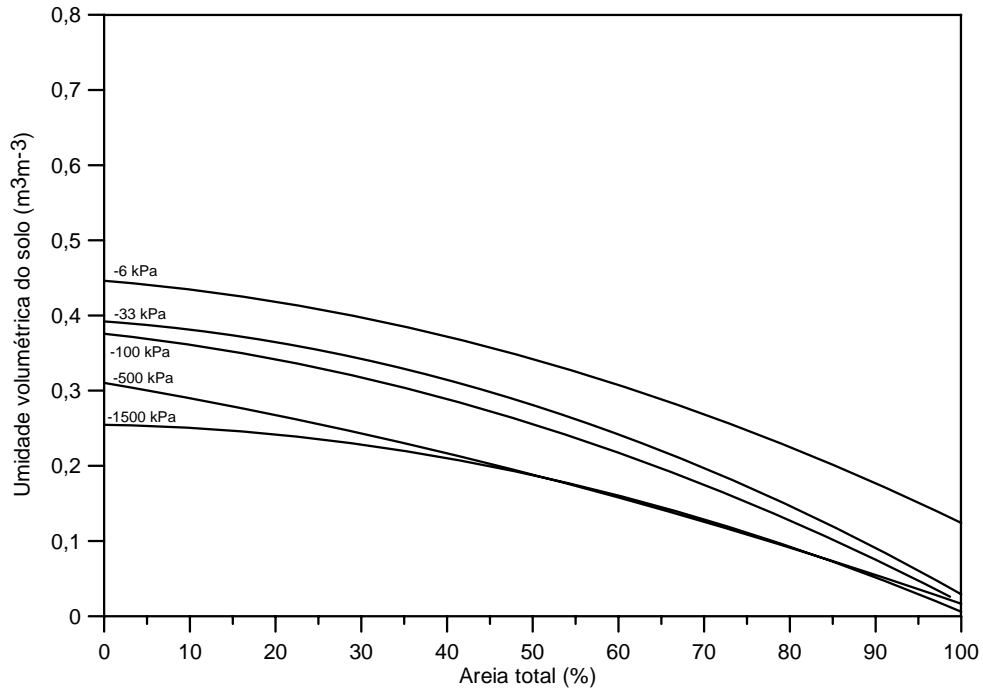


Figura 6 - Relação entre a retenção de água em diferentes potenciais e o teor de areia total para os três bancos de dados. As equações com os dados observados, estão no Anexo C.

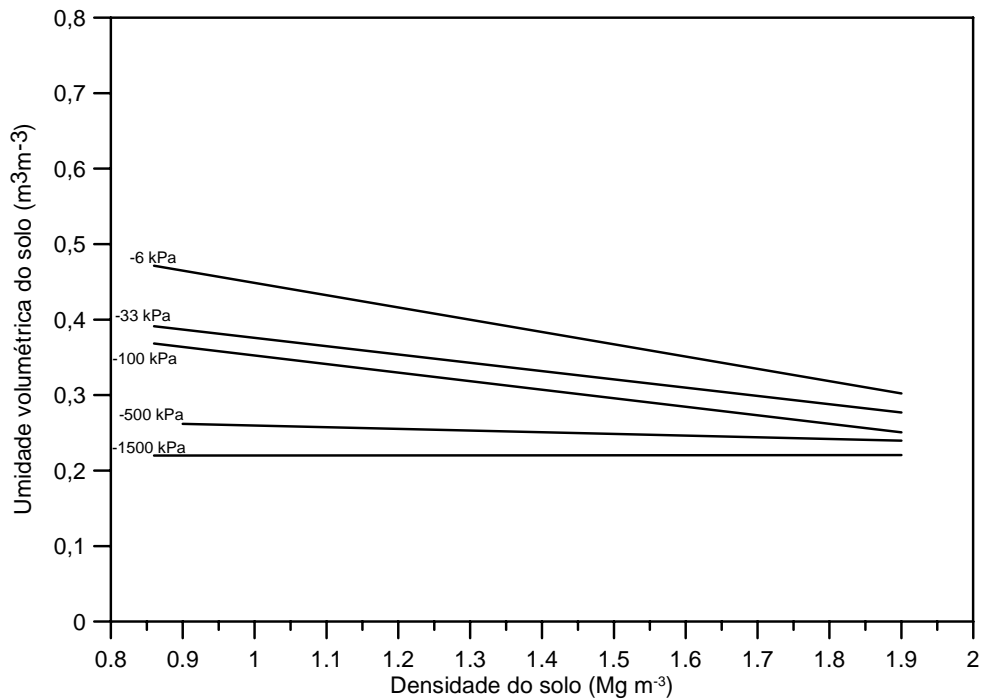


Figura 7 - Relação entre a retenção de água em diferentes potenciais e a densidade do solo para os três bancos de dados. As equações com os dados observados, estão no Anexo D.

Apesar da grande dispersão dos pontos e do baixo coeficiente de determinação (Anexos A, B, C e D) dessas relações apresentadas (Figuras 4, 5, 6 e 7), verifica-se que as melhores correlações foram obtidas com a areia total, seguida da argila e do silte. À medida que aumentam os teores de argila, o solo apresenta maior capacidade de retenção de água e também aumenta a diferença entre a quantidade de água retida entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (Figura 4). Uma relação semelhante, mas inversa, é observada com a areia total (Figura 6). Solos arenosos são normalmente menos densos e o efeito da compactação na retenção de água não fica evidenciado.

O silte apresenta um leve efeito positivo sobre a retenção de água e a densidade do solo apresenta tendência positiva sobre a água retida a -500 e -1500 kPa e efeito negativo sobre a água retida a potenciais maiores. Com o aumento da densidade do solo, ocorre um rearranjo da estrutura e os macroporos são reduzidos e a microporosidade aumentada, o que confere menor capacidade de reter água ao solo.

Outros pesquisadores, como Wösten et al. (1995) e Batjes (1996) consideraram variáveis texturais e matéria orgânica. Fernandes & Oliveira (1987), em pesquisa realizada em São Paulo, consideraram valores relacionados com a textura, somatórios de tamanhos de partículas e densidade do solo. Arya & Paris (1981) desenvolveram um modelo obtendo a curva característica de água no solo a partir da distribuição do tamanho de partículas. Esse modelo tem apresentado resultados satisfatórios para estimar os parâmetros de retenção de água pelo solo (Vaz et al., 2005), o que pode representar uma grande economia de tempo e da demanda de equipamentos para melhorar e implantar os projetos de irrigação e outras pesquisas voltadas à dinâmica hídrica do solo.

A correlação positiva de retenção de água com argila é explicada pelo efeito da maior adsorção de água em partículas com maior área superficial específica. Segundo Arruda et al. (1987) e Centurion & Andrioli (2000), a retenção de água, nas tensões correspondentes à capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente, mostrou-se dependente das frações mais finas do solo, além da matéria orgânica que atua de forma indireta.

5.2 Equações para estimativa da retenção de água

As equações de regressão, obtidas através do Banco de Dados do Sistema Irriga, do banco de dados de Solano Peraza e do banco da literatura, para a estimativa do conteúdo de água no solo em diferentes potenciais, são apresentadas nas Tabelas 9, 10 e 11. Essas equações foram obtidas a partir de análises de subconjuntos ou análises de resíduos mais conhecidos como regressão do tipo passo a passo (“stepwise”). As equações múltiplas aqui apresentadas são as que apresentaram os maiores coeficiente de ajuste (R^2) e, portanto, são as que melhor descrevem o conteúdo de água para o potencial determinado.

Tabela 9 - Funções de pedotransferência geradas a partir do banco de dados do sistema Irriga.

Umidade* (m^3m^{-3})	Intersecção	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Ds (Mg/m^3)	R^2
Uv - 1 kPa	0,65732	-0,00046		0,00082	-0,16845	0,47
Uv - 6 kPa	0,45862	-0,00167		0,00062	-0,03332	0,51
Uv -10 kPa	0,40971	-0,00268	-0,00123		0,00084	0,51
Uv -33 kPa	0,34086	-0,00225		0,00055	0,03737	0,54
Uv -100 kPa	0,37320	-0,00285			0,03340	0,56
Uv -500 kPa	0,12366			0,00090	0,10908	0,49
Uv-1500 kPa	0,11238			0,00087	0,08496	0,57

* Com essas funções obtém-se a umidade volumétrica do solo.

Para o banco de dados do Sistema Irriga, os teores de areia e argila e a densidade do solo foram os parâmetros que proporcionaram melhor capacidade de predição da umidade do solo. Mello et al. (2002) também encontraram melhor correlação da retenção de água com os teores de areia e argila e a densidade do solo. Já para o banco de dados de Solano Peraza o teor de areia e a densidade do solo apresentaram melhor estimativa da umidade. Arruda et al. (1987) encontrou melhor correlação da argila + silte nas equações de pedotransferência geradas para solos de São Paulo. Bell & Keulen (1995) encontraram melhor estimativa da retenção de água quando usaram o teor de argila e a matéria orgânica para solos do México. Outros autores (Oliveira et al. 2002; Massuti, 1997; Giarola et al. 2002) obtiveram melhor estimativa com os teores de argila e silte. Dessa forma,

dependendo da região e das características dos solos, as equações terão parâmetros diferenciados.

Tabela 10 - Funções de pedotransferência geradas a partir do banco de dados de Solano Peraza (2003).

Umidade* (kg kg ⁻¹)	Intersecção	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Ds (Mg/m ³)	R ²
Ug - 6 kPa	0,742	-0,00294			-0,22878	0,62
Ug -10 kPa	0,718	-0,00274			-0,26307	0,65
Ug -33 kPa	0,643	-0,00238			-0,26767	0,68
Ug -100 kPa	0,568	-0,00216			-0,24487	0,72
Ug -500 kPa	0,460	-0,00203			-0,19059	0,76
Ug-1500 kPa	0,462	-0,00220	-0,00074		-0,18380	0,77

*Com essas funções obtém-se a umidade gravimétrica do solo.

As equações múltiplas geradas a partir do banco de dados da literatura apresentaram melhor estimativas utilizando-se os teores de areia, argila e a densidade do solo.

Tabela 11 - Funções de pedotransferência geradas a partir do banco de dados da Literatura.

Umidade* (%)	Intersecção	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Ds (Mg/m ³)	R ²
Uv - 1 kPa	68,7987				-21,1700	0,12
Uv - 6 kPa	47,8887	-0,13885		0,24175	-11,5922	0,57
Uv -10 kPa	49,6557	-0,16882		0,21658	-12,6897	0,60
Uv -33 kPa	54,2628	-0,22029			-12,1324	0,47
Uv -100 kPa	41,4765	-0,13009		0,17790	-11,1142	0,60
Uv -500 kPa	49,7978	-0,19214			-14,2026	0,41
UV-1500 kPa	29,8999	-0,15600		0,18710	-6,7591	0,56

* Com essas funções obtém-se a umidade volumétrica do solo em %.

Em todas as equações geradas, observa-se um efeito negativo da areia e da densidade do solo sobre a retenção de água, o que indica que solos arenosos e solos mais densos possuem menor capacidade de reter água. A textura do solo é a principal variável utilizada nos modelos matemáticos desenvolvidos para simular o comportamento da água no solo (Saxton et al.1986; Tyler & Wheatcraft, 1989), pois ela possui relação direta com a capacidade do solo reter água. Solano Peraza (2003) verificou que a retenção de água era crescente à medida que aumentavam os teores de argila e matéria orgânica dos solos por ele estudados.

A textura, nesse caso, representa um fator pedogenético do solo, com alta estabilidade ao longo do tempo, enquanto que a densidade do solo é o fator que representa o efeito da estrutura do solo na retenção de água, sendo esse possível de ser modificado por condições naturais (umedecimento e secagem do solo) ou por fatores antrópicos. Ambos os parâmetros presentes nas equações geradas são facilmente obtidos a campo e são rotineiramente determinados em laboratórios de física do solo ou em levantamentos para fins de classificação e avaliação de aptidão agrícola das terras.

A regressão do tipo passo a passo é um dos melhores procedimentos de análise de subconjuntos ou análise de resíduos, para identificar as variáveis independentes mais pertinentes para uso em funções de pedotransferência (Bell & van Keulen, 1995; Salchow et al., 1996; Pachepsky & Rawls 1999) e, assim, mostra-se como uma alternativa viável para estimar parâmetros hídricos do solo que possuem relação direta com outras propriedades físicas mais facilmente mensuráveis.

Apesar das equações geradas apresentarem um razoável coeficiente de ajuste, o que é um indicativo isolado da sua eficiência, antes de serem utilizadas as equações geradas devem ser testadas e validadas para diferentes situações.

5.3 Avaliação da eficiência das funções de pedotransferência

A aferição dos ajustes das funções de pedotransferência pode ser feita usando o coeficiente de determinação e, normalmente, é assumido que o valor mais alto é o que melhor prediz a eficiência das equações. No entanto, pode-se também inspecionar visualmente a capacidade preditiva das equações comparando os dados estimados com dados obtidos pelas equações. Para que as equações de pedotransferência sejam eficientes, é necessário ter-se uma boa estimativa dos teores de água retidos no solo, num determinado potencial a partir das características do solo avaliadas (areia, silte, argila e densidade).

Para testar a eficiência das equações geradas e das obtidas da literatura, fez-se a comparação dos teores de água observados com os teores estimados para cada equação em determinado potencial. Assim, confrontaram-se os dados estimados com os observados numa relação gráfica 1:1. Nesse tipo de relação, a

precisão é maior quanto menos pontos ficarem dispersos em relação à linha principal, que representa um ajuste perfeito.

A figura 8 mostra o resultado da capacidade preditiva das equações geradas a partir do banco de dados do Sistema Irriga, quando se usam as propriedades dos solos do banco de Solano Peraza.

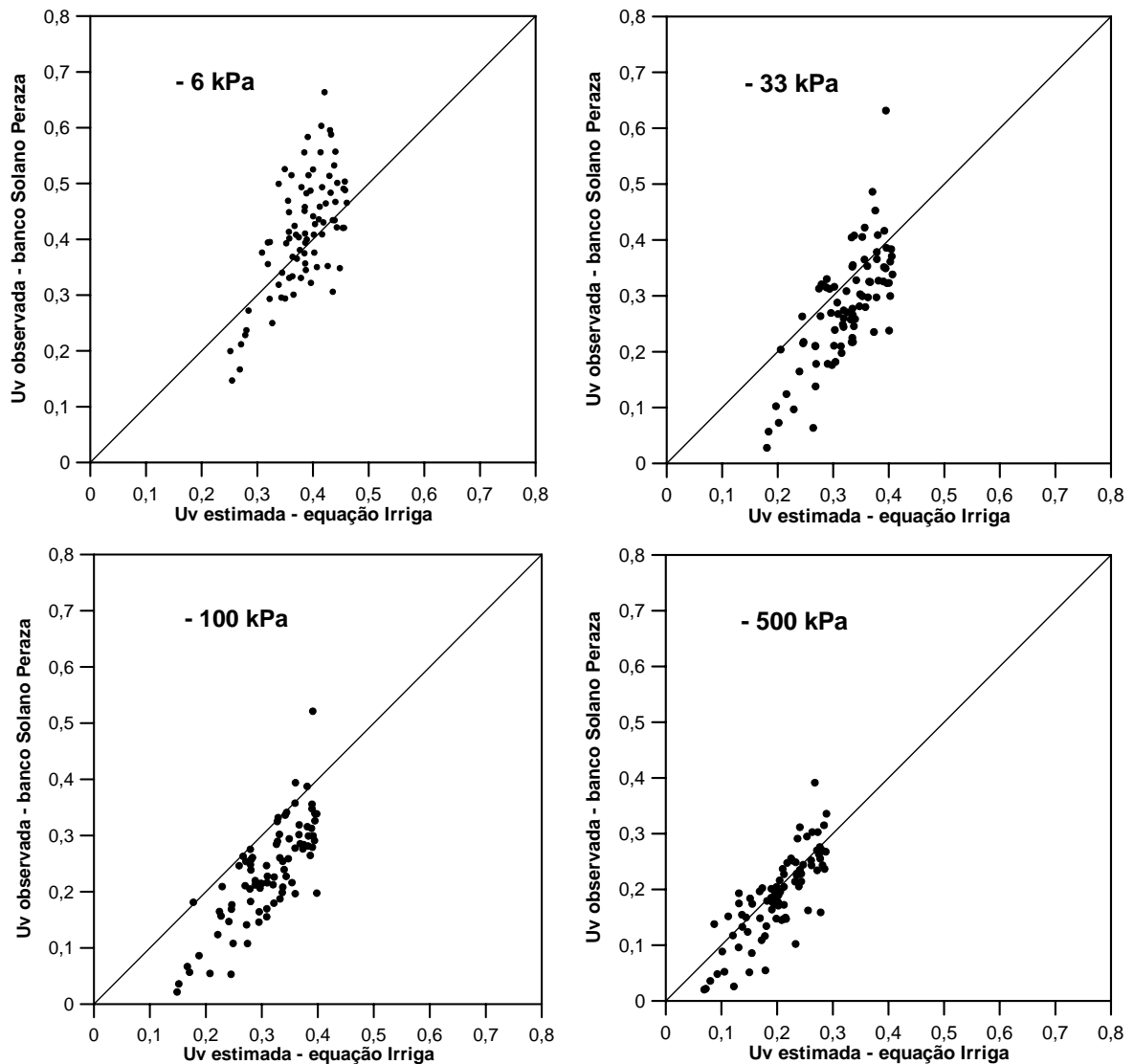


Figura 8 - Relação 1:1: Umidade observada no banco de Solano Peraza (2003) versus umidade estimada pelas equações geradas a partir do banco de dados do Sistema Irriga, para os potenciais de -6, -33, -100, -500 e -1500 kPa.

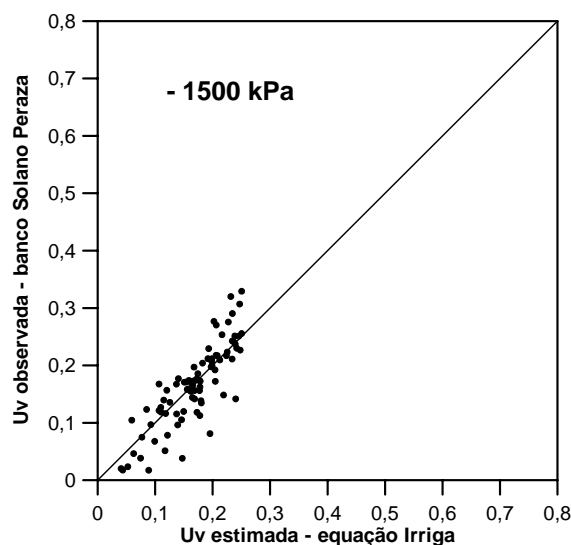


Figura 8 – Continuação...

Nesta simulação, temos a umidade volumétrica do solo estimada pelas equações geradas a partir do banco de dados do Sistema Irriga, utilizando-se as informações de textura e densidade do solo do banco de dados de Solano Peraza (2003). Como pode ser observado, as equações obtidas apresentaram melhor predição para umidade retida nos potenciais a -500 e -1500 kPa. Para os demais potenciais ocorre subestimação em baixos teores de umidade e superestima em teores altos de umidade, não sendo eficiente para estas condições. Em parte isso se devido à diferença metodológica na obtenção da curva de retenção de água nos dois bancos, pois o Sistema Irriga mantém a estrutura das amostras nas suas avaliações, enquanto que Solano Peraza (2003) utilizou amostras desestruturadas.

A mesma tendência é observada quando se cruzam os valores de umidade observados no banco do Sistema Irriga com os teores estimados pelas equações geradas a partir do banco de Solano Peraza (2003) (Figura 9). Além do efeito estrutural, tem-se o efeito da diversidade do banco e, dessa forma, como no Sistema Irriga predominam solos argilosos, as equações geradas estimam melhor a retenção de água para solos com características similares. Os solos argilosos possuem maior capacidade de retenção de água, e isso fica visível na figura 8, onde as equações obtidas pelo banco de Solano Peraza (2003) subestimam a água retida dos solos do banco do Sistema Irriga.

Nesta simulação, a melhor estimativa da retenção de água ocorreu pra o potencial de -1500 kPa, onde nessas condições o efeito da textura se sobrepõe ao efeito da estrutura do solo na retenção de água.

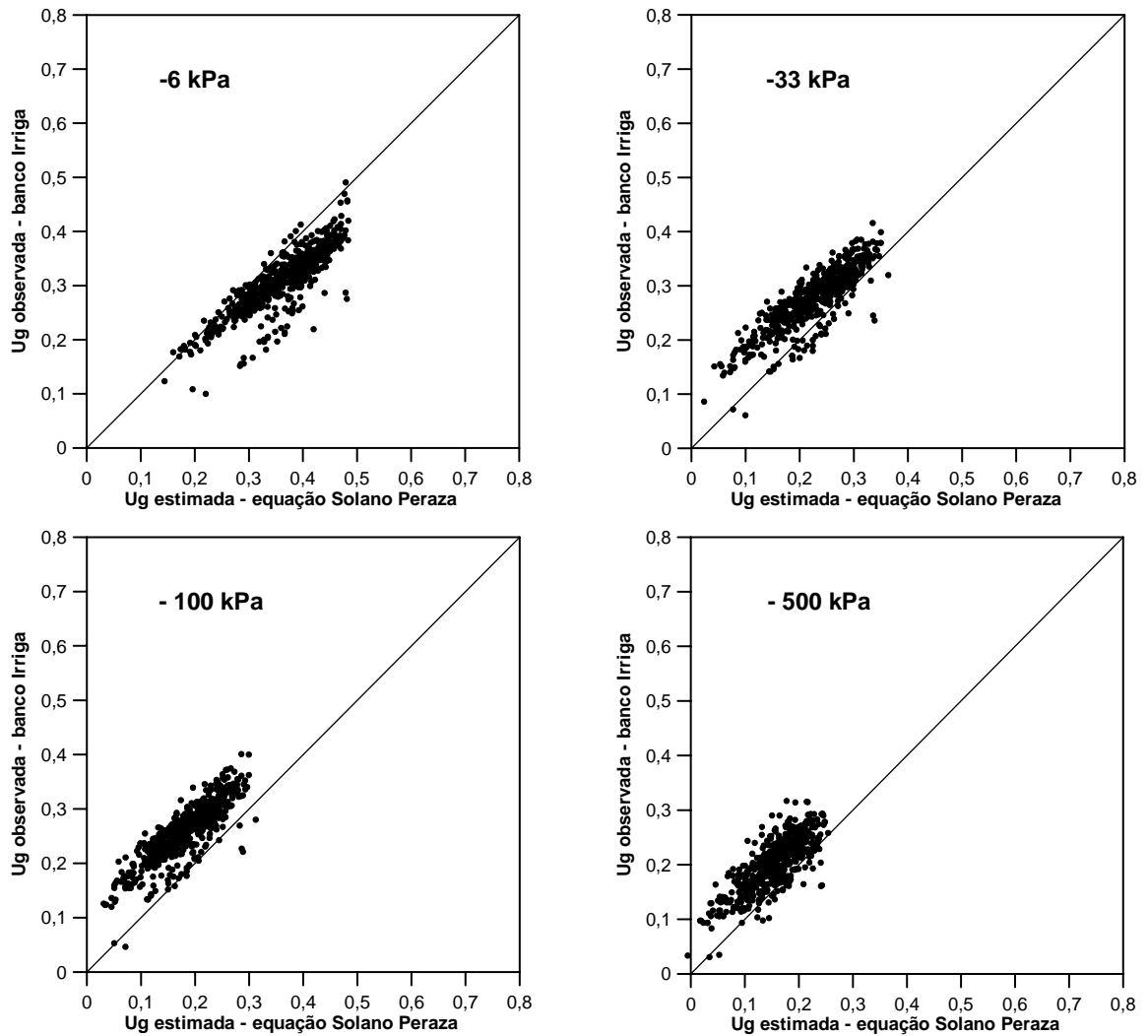


Figura 9 - Relação 1:1: Umidade observada no banco do Sistema Irriga versus umidade estimada pelas equações geradas a partir do banco de dados de Solano Peraza (2003), para os potenciais de -6, -33, -100, -500 e -1500 kPa.

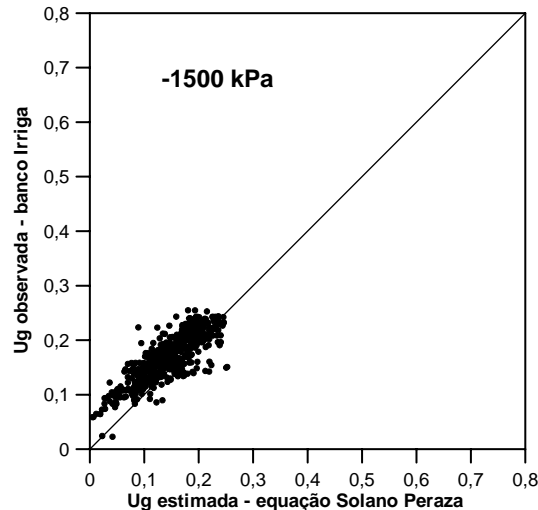


Figura 9 – Continuação ...

A comparação entre a umidade medida e a estimada pelas equações propostas por outros pesquisadores é apresentada nas Figuras 10 e 11. As equações selecionadas para comparação demonstram baixa capacidade preditiva da umidade do solo para os diferentes potenciais. As melhores performances foram obtidas pelo emprego das equações propostas por Oliveira et al. (2002) (Figuras 10 e 11) para estimar a umidade do solo a -33 e -100 kPa. De maneira geral, as equações testadas mostraram valores subestimados de teor de água no solo retido nos potenciais especificados, com destaque para os dados estimados pela equação de Meng et al. (1987) e Bell & Keulen (1995). Esses dois autores desenvolveram equações para solos de regiões temperadas, o que gera uma menor eficiência para as condições brasileiras de solo. Isso concorda com o obtido por Oliveira et al. (2002) e Solano Peraza (2003), que também verificaram baixa eficiência das equações geradas para outras condições.

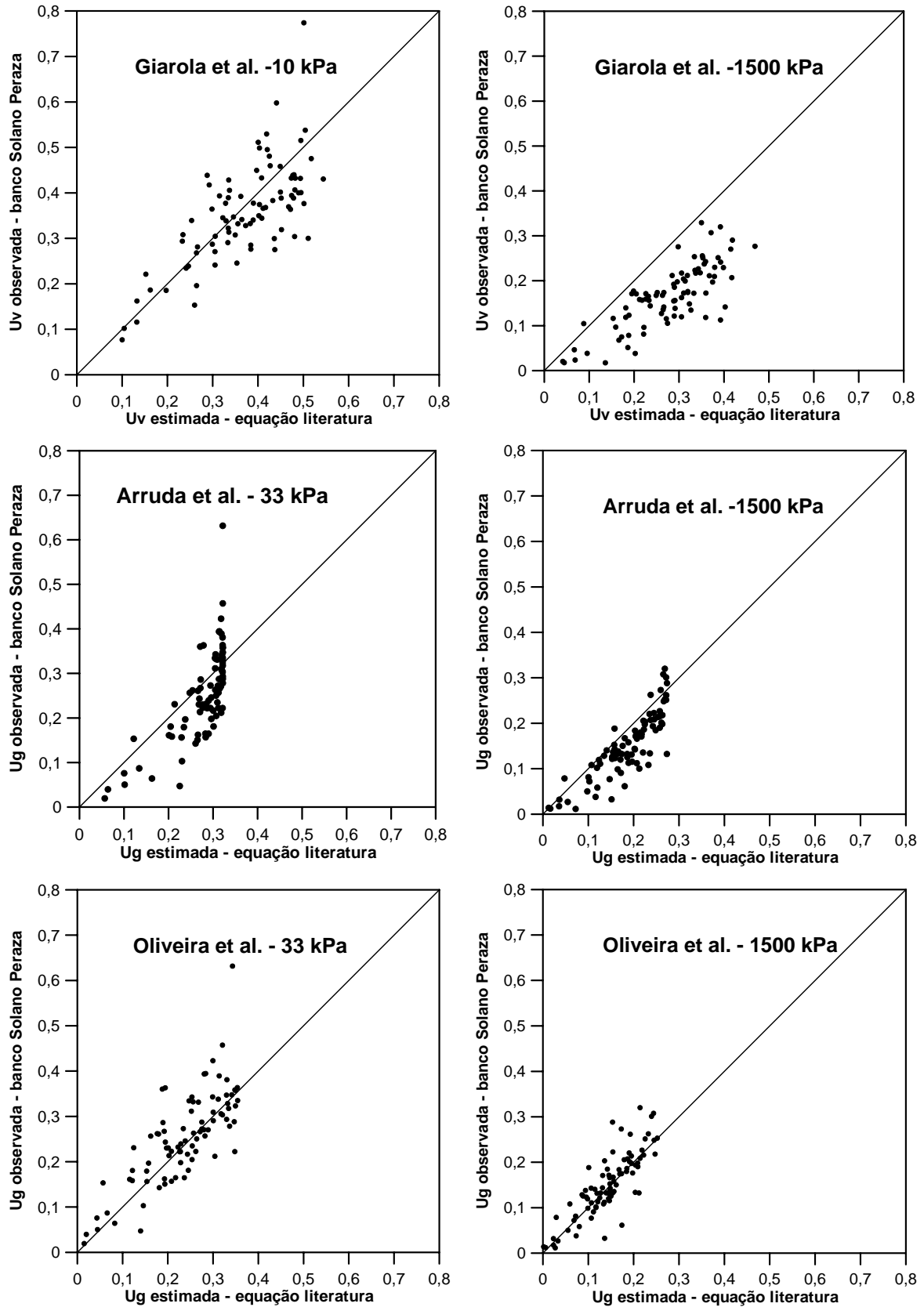


Figura 10 - Relação 1:1: Umidade observada no banco de Solano Peraza (2003) versus umidade estimada pelas equações obtidas da Literatura (Arruda et al. (1987); Meng et al. (1987); Bell et al. (1995); Massuti (1997); Giarola et al. (2002); Oliveira et al. (2002).

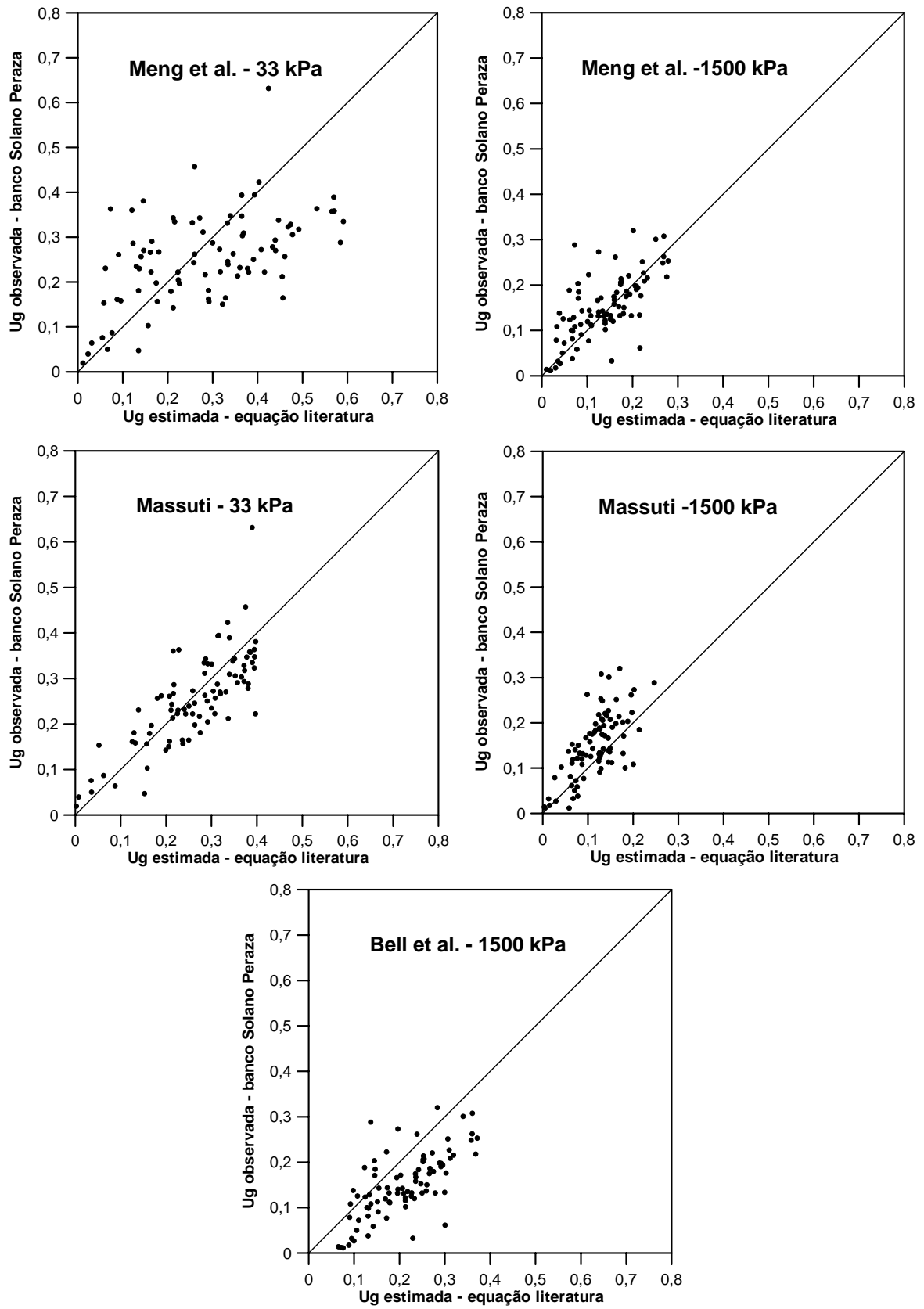


Figura 10 – Continuação.

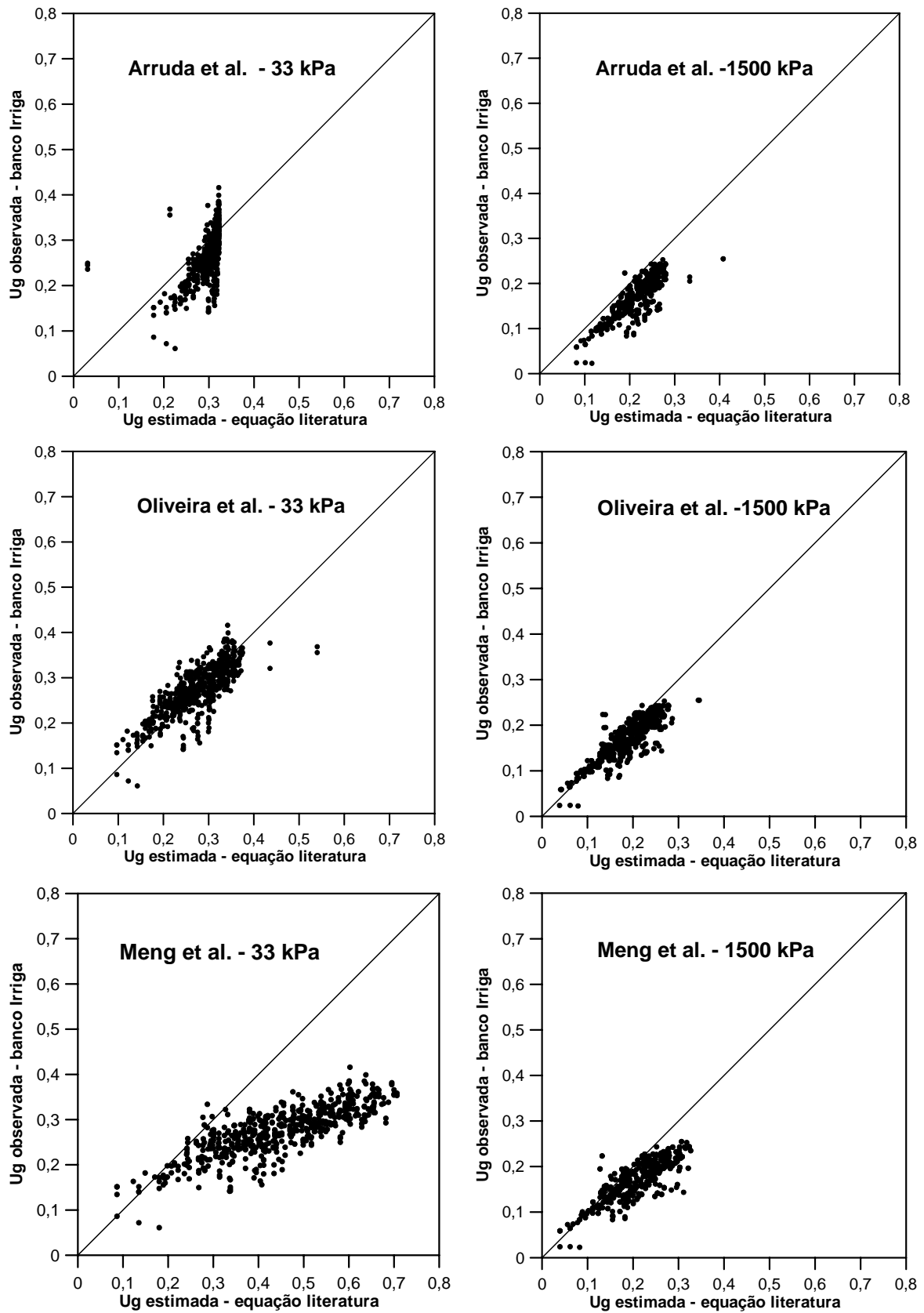


Figura 11 - Relação 1:1: Umidade observada no banco do Sistema Irriga versus umidade estimada pelas equações obtidas da Literatura. (Arruda et al. (1987); Meng et al. (1987); Bell et al. (1995); Massuti (1997); Giarola et al. (2002); Oliveira et al. (2002).

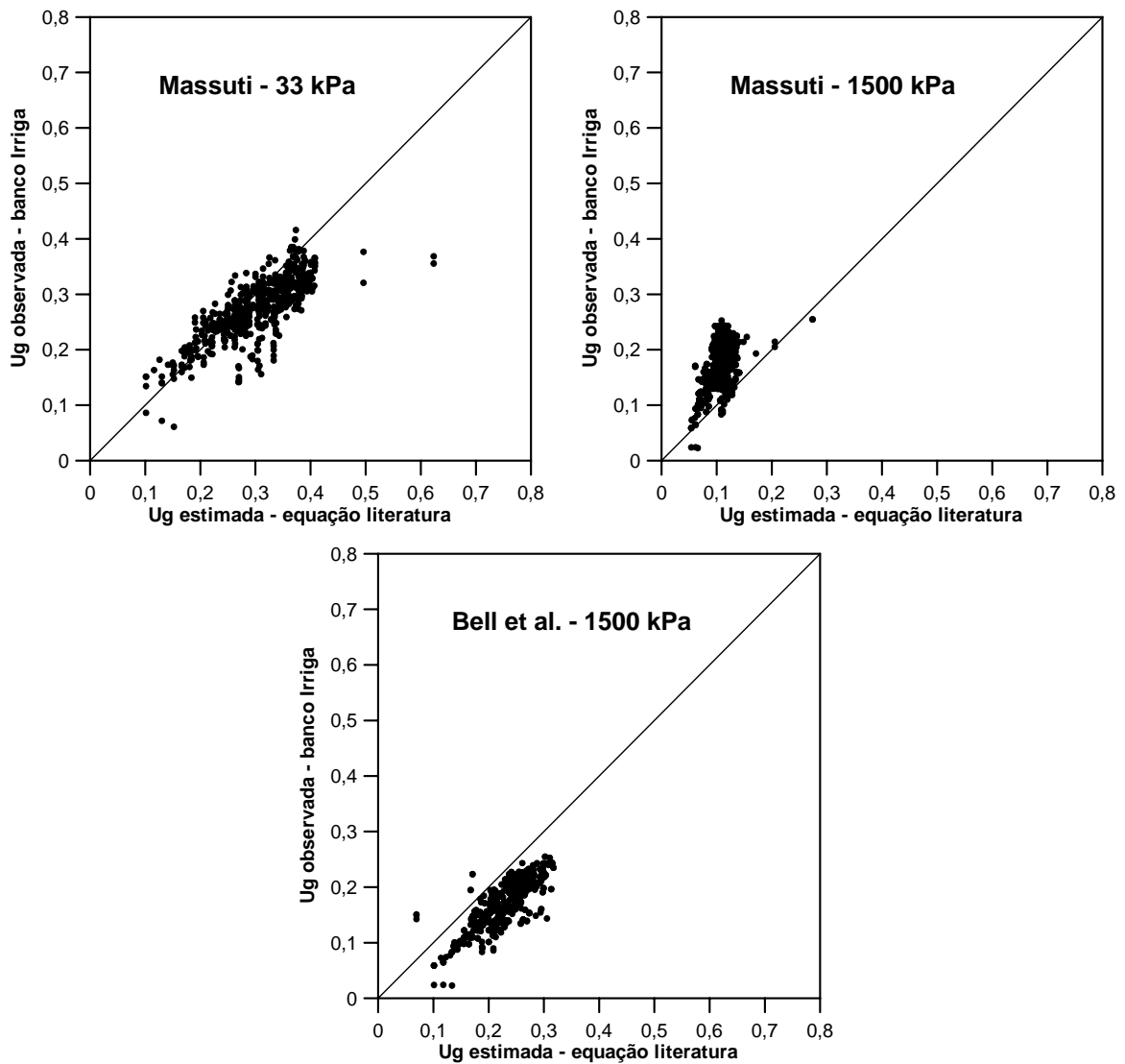


Figura 11 – Continuação.

A estimativa da retenção de água para o banco da literatura, a partir das equações obtidas do Sistema Irriga e do banco de Solano Peraza (2003) é apresentada nas figuras 12 e 13. Também demonstram baixa eficiência na estimativa da retenção de água (Figura 12 e 13). A distribuição dos pontos não segue a linha de aferição, estando ou abaixo (superestimando) ou acima da linha (subestimando).

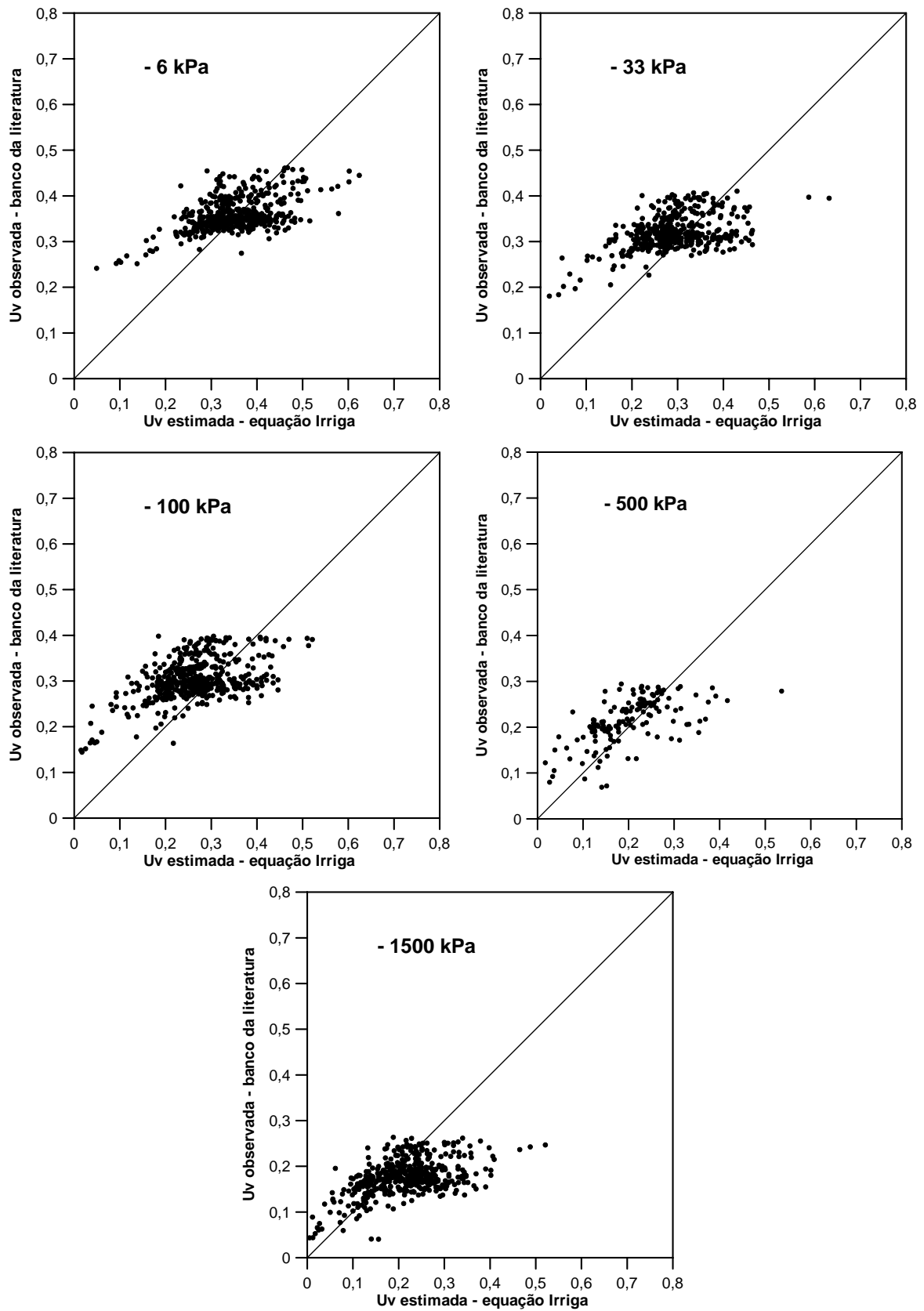


Figura 12 - Relação 1:1: Umidade observada no banco de dados da literatura versus umidade estimada pelas equações geradas a partir dos dados do Sistema Irriga, para os potenciais de -6, -33, -100, -500 e -1500 kPa.

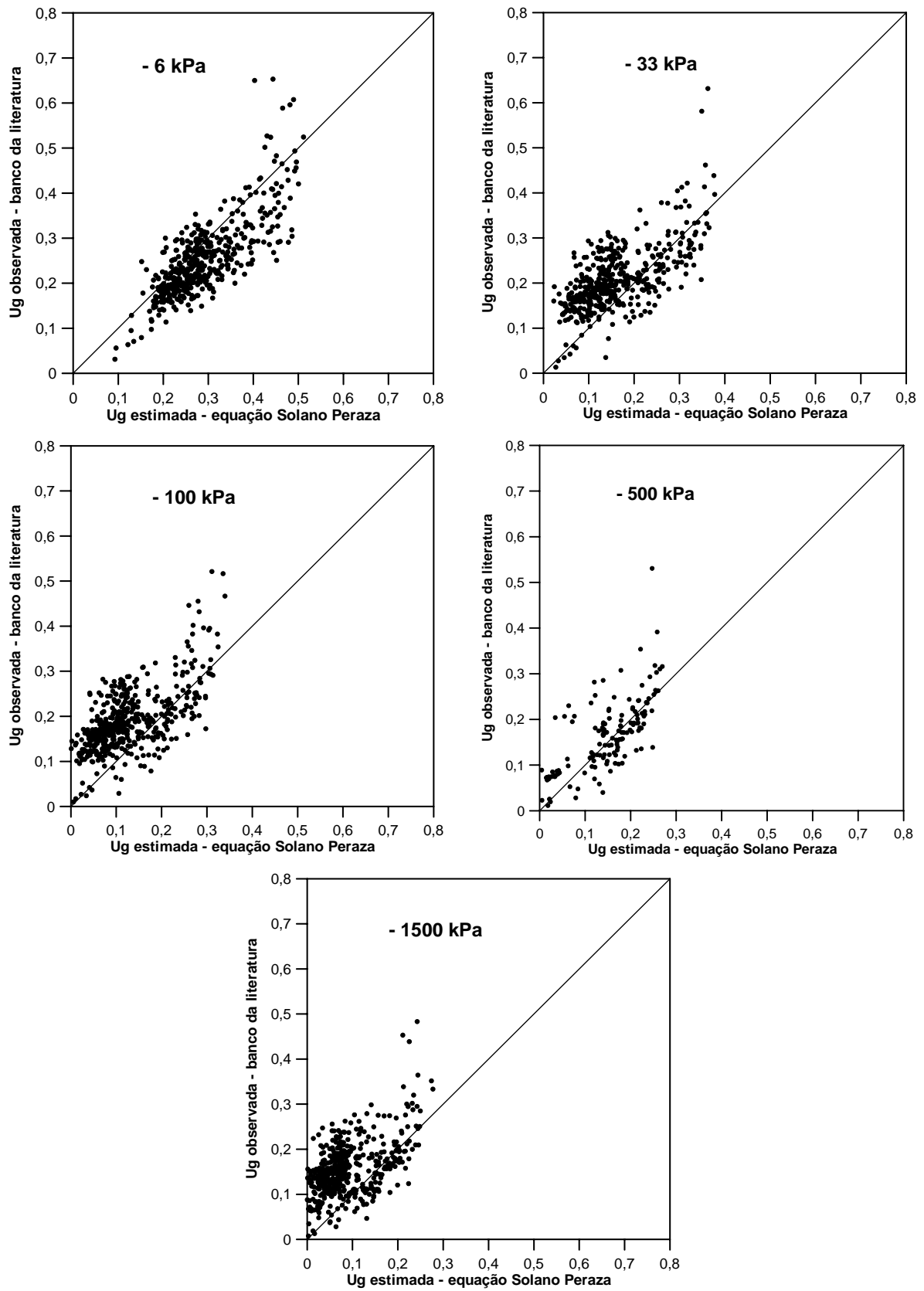


Figura 13 - Relação 1:1: Umidade observada no banco de dados da literatura versus umidade estimada pelas equações geradas a partir dos dados de Solano Peraza (2003), para os potenciais de -6, -33, -100, -500 e -1500 kPa.

Quando cruzamos os valores observados no banco de Solano Peraza (2003) e os valores estimados com as próprias equações geradas com esse banco (Figura 14), vemos que ocorre uma que as estimativas ficam mais próximas dos valores reais, principalmente nos potenciais mais baixos (-100, -500 e -1500 kPa), onde o efeito da textura é mais acentuado sobre a retenção de água.

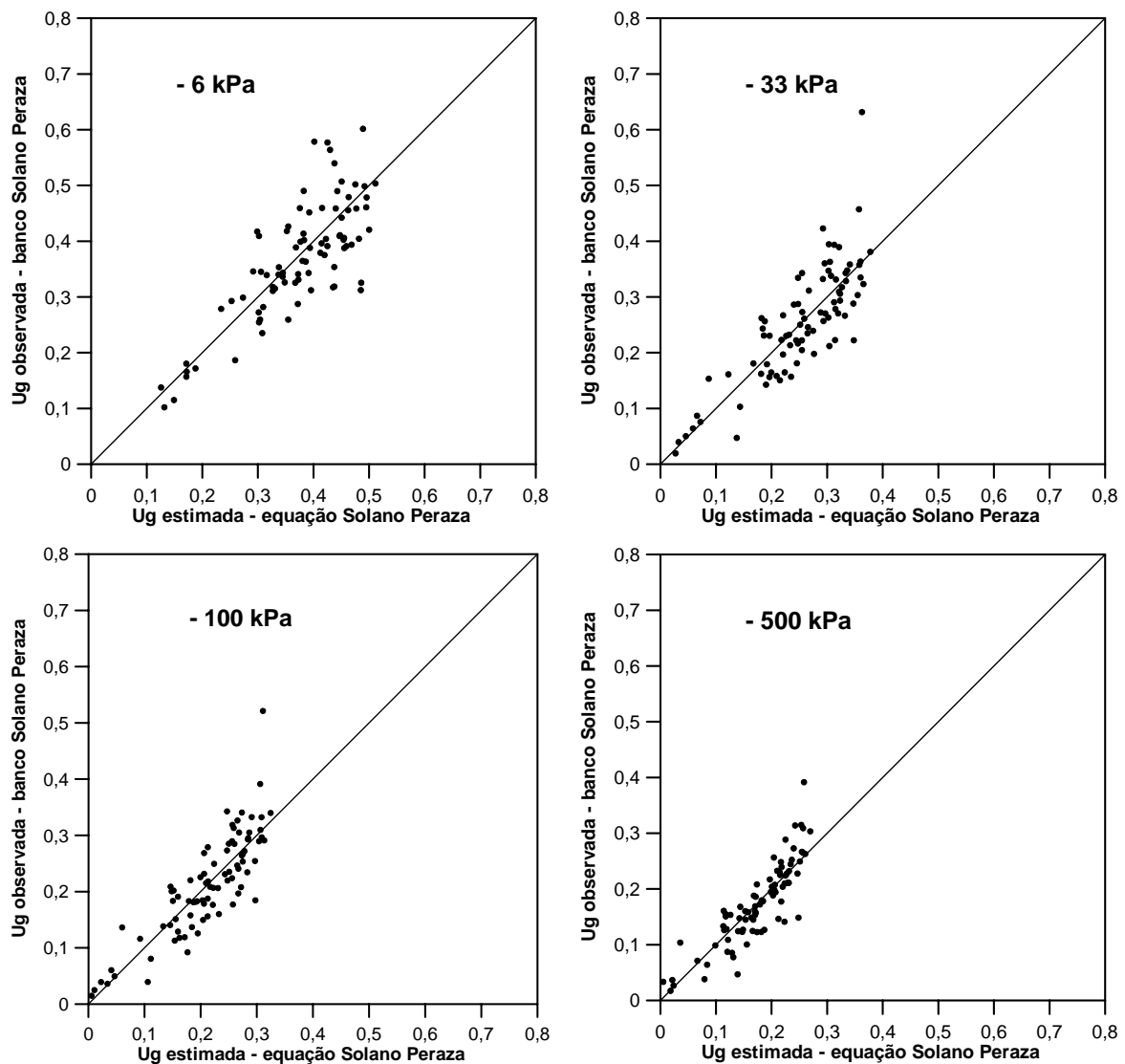


Figura 14 - Relação 1:1: Umidade observada no banco de dados de Solano Peraza (2003) versus umidade estimada pelas equações geradas a partir dos próprios dados de Solano Peraza (2003), para os potenciais de -6, -33, -100, -500 e -1500 kPa.

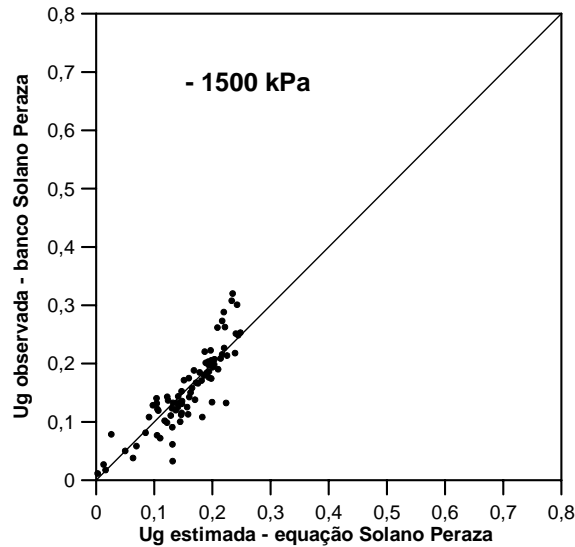


Figura 14 – Continuação.

A mesma tendência é observada quando cruzamos os valores observados com os valores estimados pelas equações geradas a partir do banco de dados do Sistema Irriga (Figura 15). Dessa forma, quando as equações de pedotransferência são utilizadas para estimar a água retida por solos semelhantes aos que deram origem à equação, a capacidade de predição é melhorada, o que gera uma informação importante para fins de avaliação agrícola das terras para irrigação.

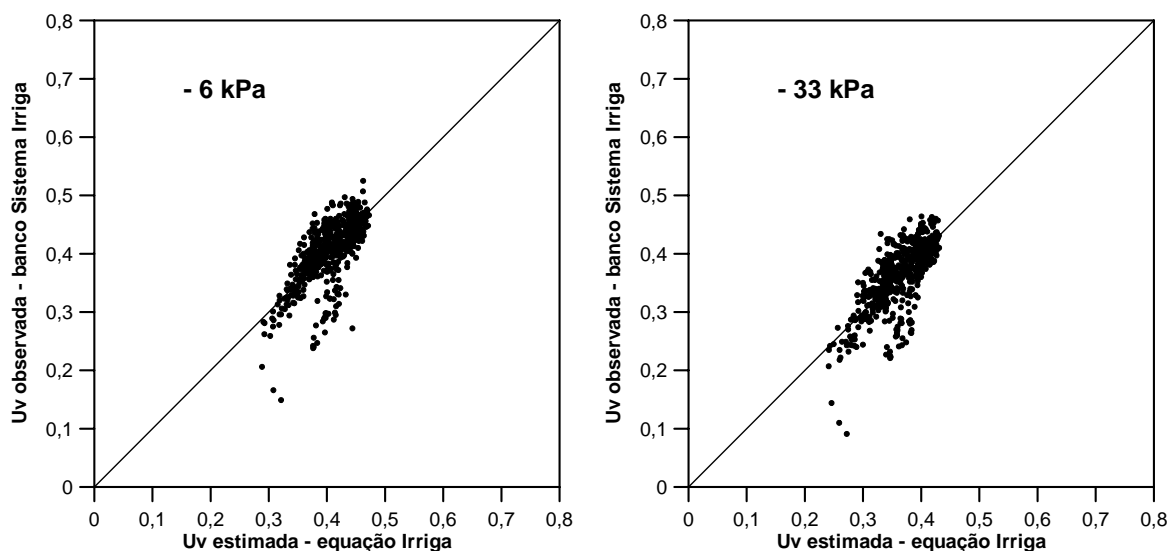


Figura 15 - Relação 1:1: Umidade observada no banco de dados do Sistema Irriga versus umidade estimada pelas equações geradas a partir dos próprios dados do Sistema Irriga, para os potenciais de -6, -33, -100, -500 e -1500 kPa.

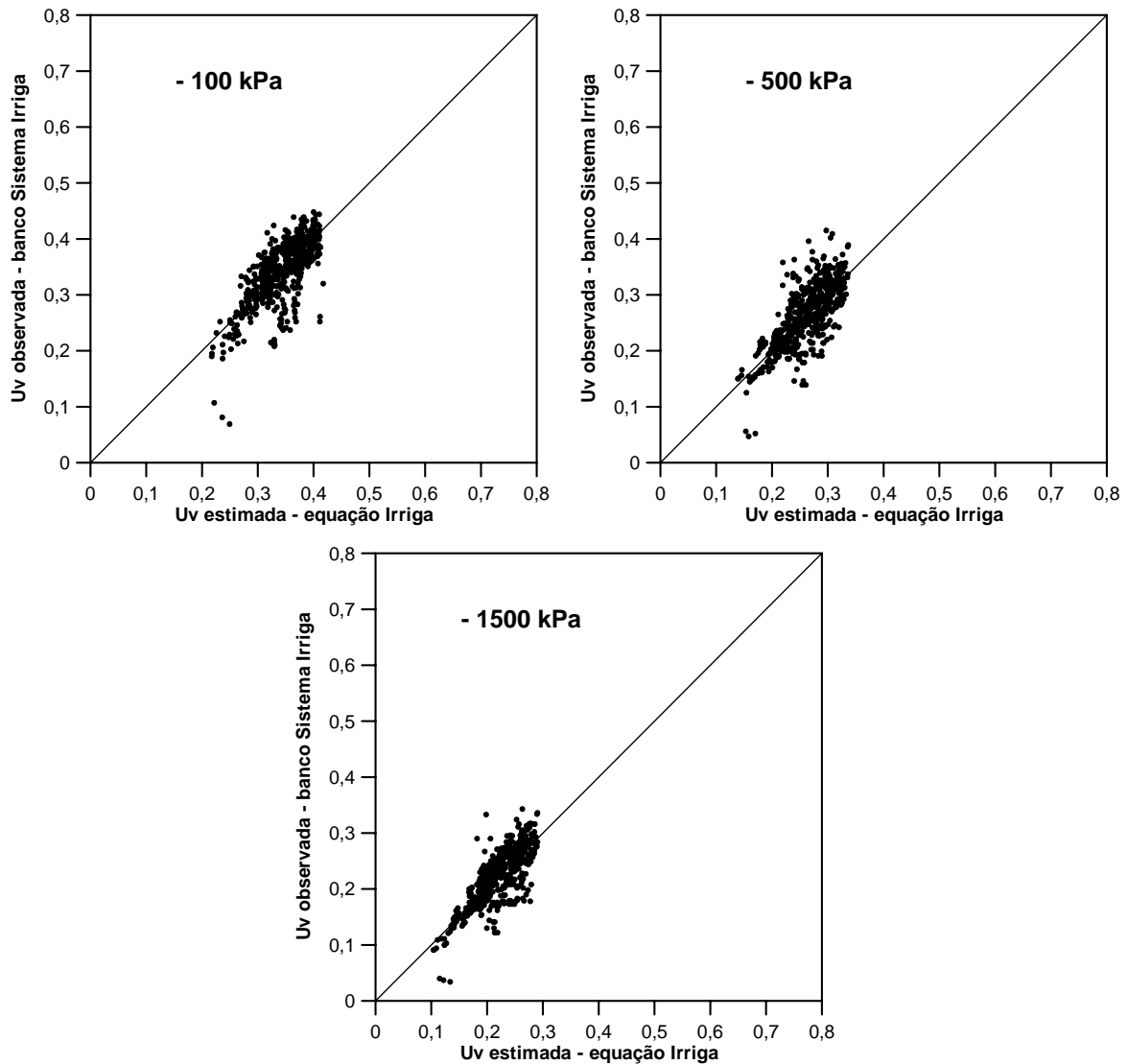


Figura 15 – Continuação.

Ao relacionarmos os dados observados por Solano Peraza (2003) e pelo Sistema Irriga, com os valores estimados pelas equações geradas com o banco da literatura, vemos que a eficiência é baixa (Figuras 16 e 17). Para o banco de Solano Peraza, ocorre superestimativa da retenção de água, principalmente para os potenciais de -100, -500 e -1500 kPa. Já no caso do banco do Sistema Irriga, a dispersão dos pontos é acentuada, não se seguindo uma tendência. Essa dispersão pode ser explicada pelas características desses dois bancos, onde predomínio de solos argilosos no Sistema Irriga e de solos siltosos no banco da Literatura. Os pontos ficam concentrados, não seguindo a tendência sobre a linha, o que é necessário para a sua eficiência preditiva.

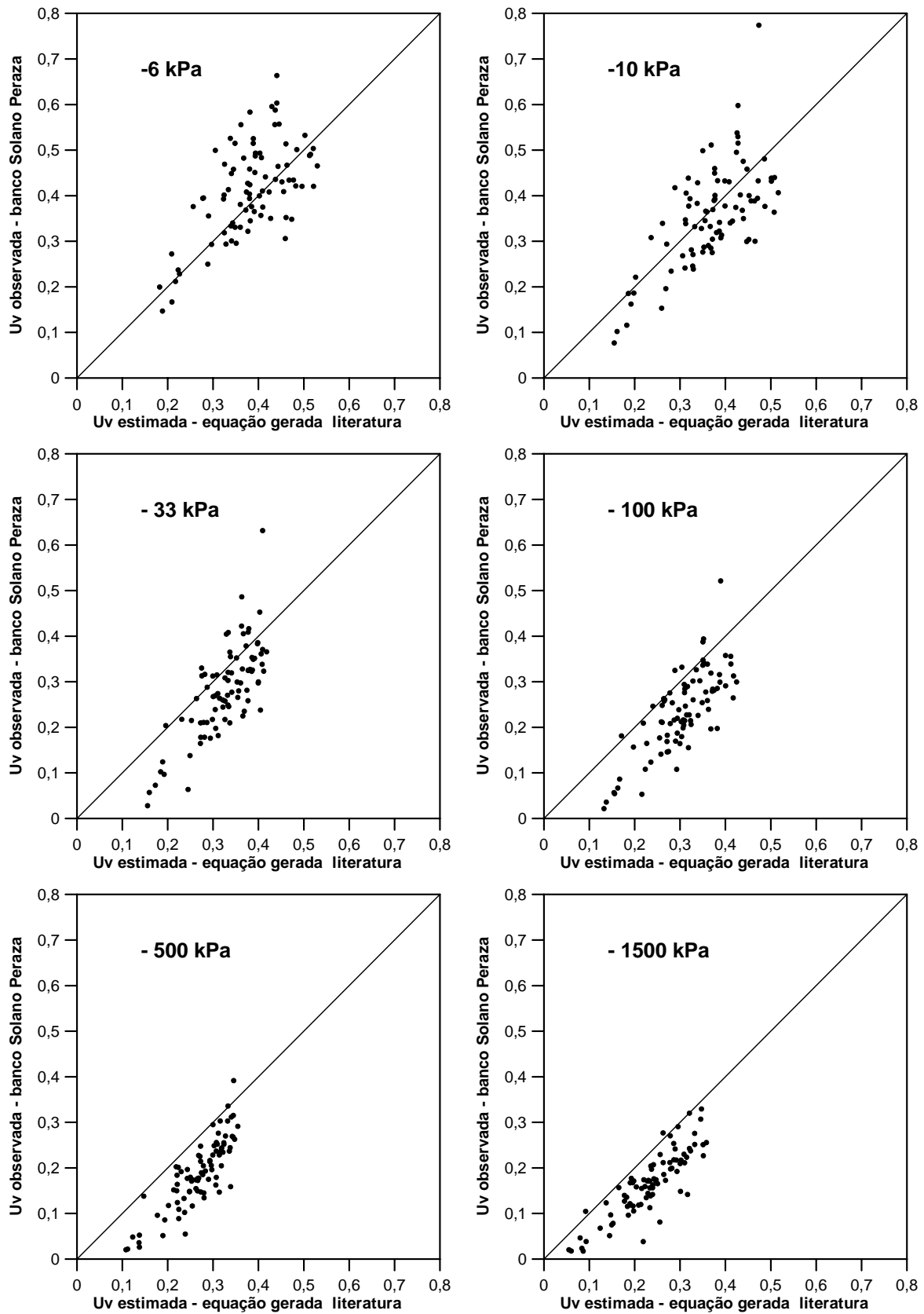


Figura 16 - Relação 1:1: Umidade observada no banco de dados de Solano Peraza versus umidade estimada pelas equações geradas a partir das equações geradas com os dados da literatura, para os potenciais de -6, -10, -33, -100, -500 e -1500 kPa.

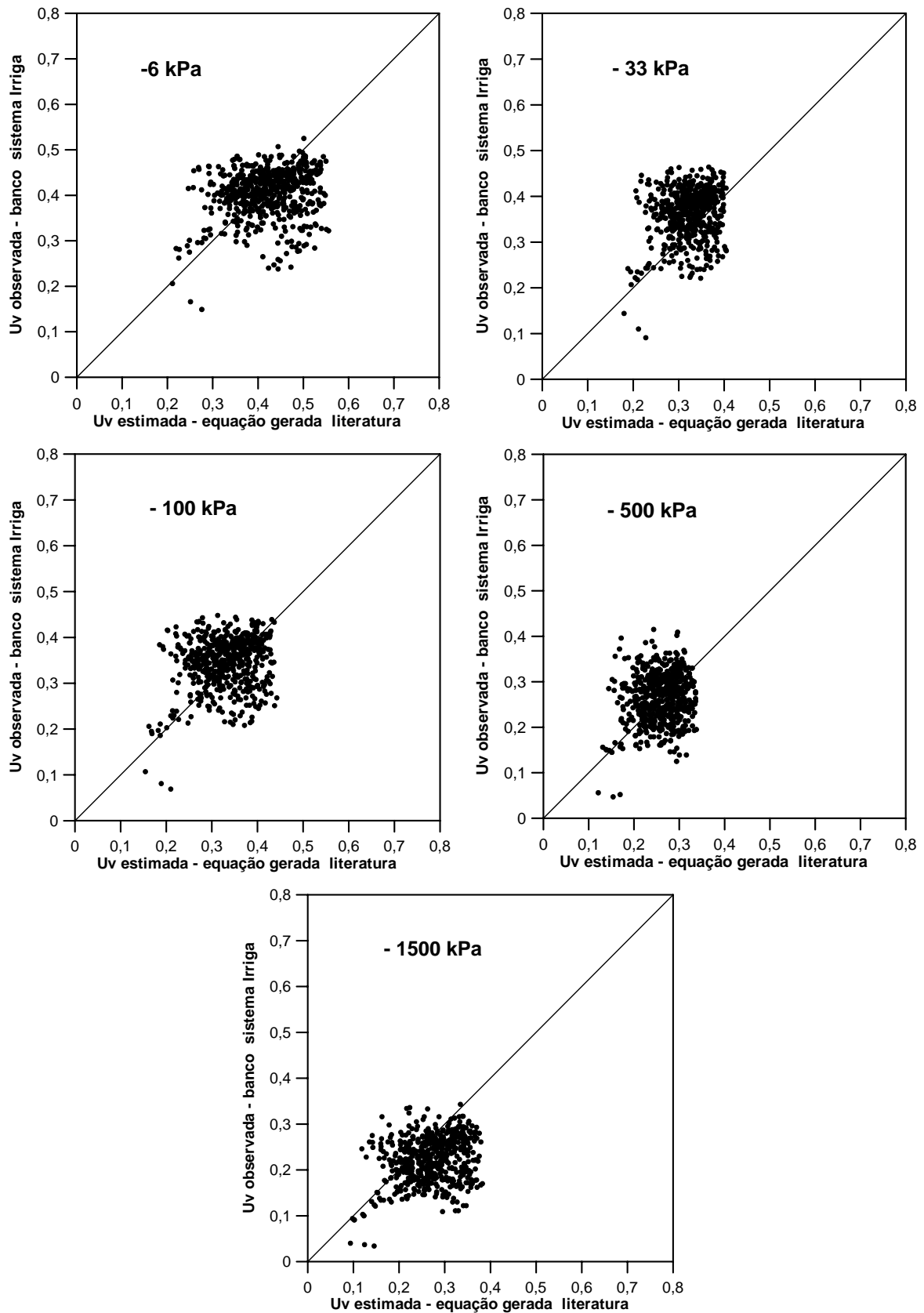


Figura 17 - Relação 1:1: Umidade observada no banco de dados do Sistema Irriga versus umidade estimada pelas equações geradas a partir dos dados da literatura para os potenciais de -6, -33, -100, -500 e -1500 kPa.

A umidade do solo obtida pelas equações geradas a partir do banco da literatura, ao serem cruzadas com os próprios valores de umidade observados pelo banco, também mostra grande dispersão dos pontos e, a equação apresenta, portanto, baixa eficiência preditiva (Figura 18).

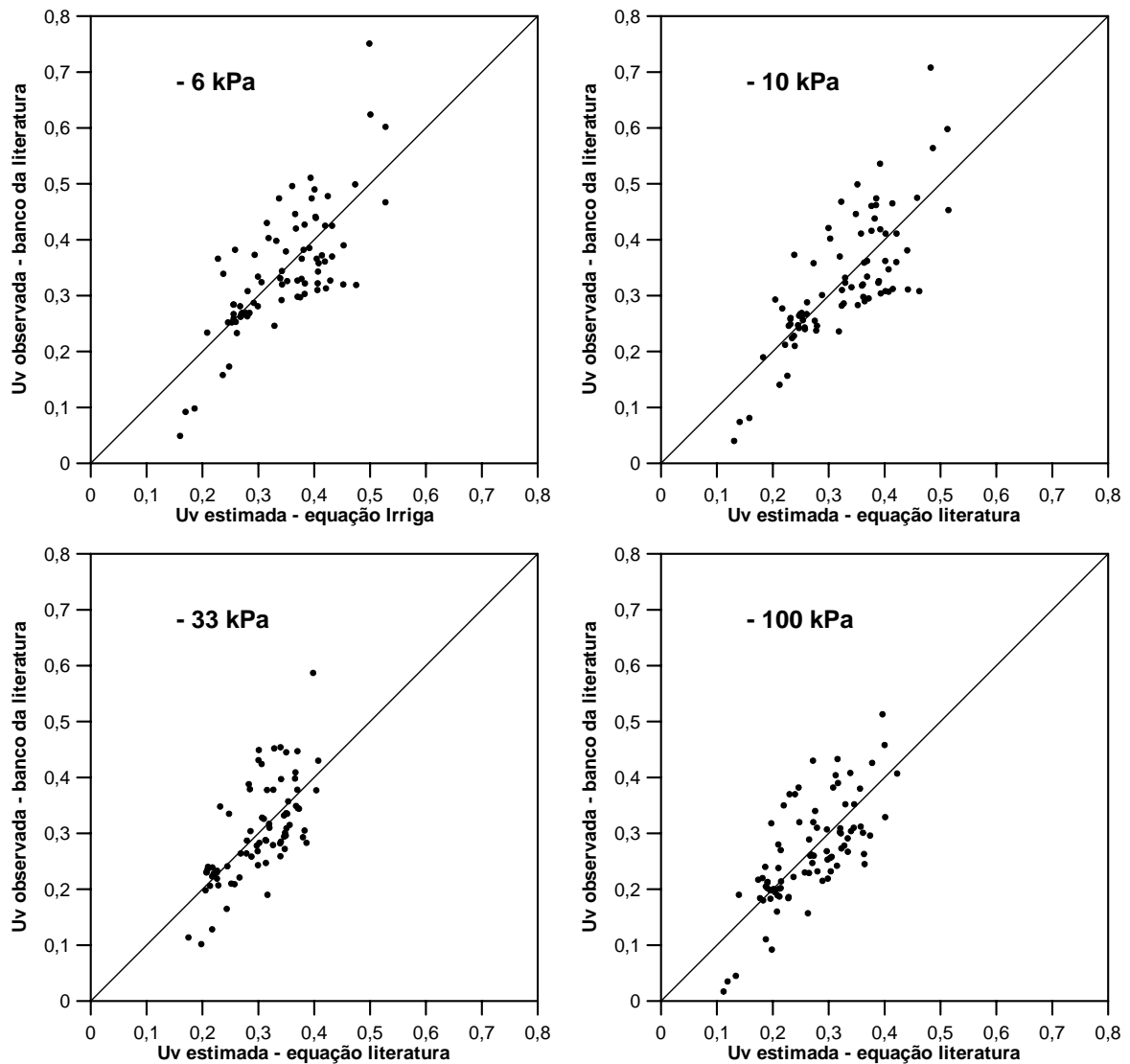


Figura 18 - Relação 1:1: Umidade observada no banco de dados da literatura versus umidade estimada pelas equações geradas a partir dos dados da literatura.

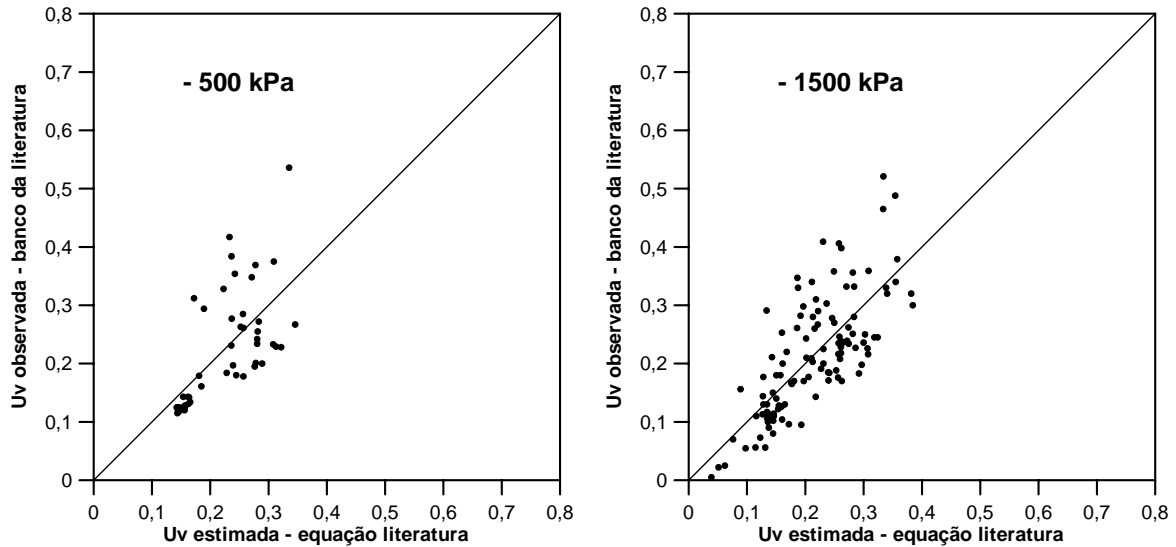


Figura 18 – Continuação.

A diferença na retenção de água de solos granulometricamente similares pode ser explicada pela variação nos teores de matéria orgânica e na composição mineralógica da fração argila.

A precisão da estimativa é melhor quando as equações são usadas para estimar a umidade dos solos para os quais as equações foram geradas, como também foi verificado por Oliveira et al. (2002) e Mello et al. (2002). A mesma tendência é válida para a metodologia de determinação da retenção de água. Com base nisso, vemos que a eficiência dessas funções é dependente de vários fatores, que vão desde fatores pedogenéticos e mineralógicos do solo até questões metodológicas, e sua utilização fica limitada para os solos os quais elas foram geradas.

Em síntese, podemos dizer que os solos são corpos naturais, que se originam de um material de origem e estão continuamente transformados pela pedogênese. Dessa forma, ambientes diferentes geram solos com características próprias, o que dificulta que equações geradas para solos de determinados ambientes sejam eficientes para estimar a umidade de solos de outros ambientes. De maneira geral, neste estudo, verifica-se que a uniformidade do banco de dados, ou seja, o predomínio de determinadas classes texturais de solos leva a gerar equações que vão incorporar as características predominantes do banco, o que leva a aumentar o erro da predição da umidade do solo para classes texturais diferenciadas.

A melhor predição da umidade verificada para o potencial de -1500 kPa é fruto do efeito natural da granulometria do solo sobre a retenção de água a potenciais mais baixos e também pela variabilidade metodológica utilizada para a obtenção dos parâmetros necessários para gerar as equações de pedotransferência. O que existe ainda é a dificuldade de padronização das análises, que futuramente poderia gerar um banco de dados mais homogêneo e ter-se melhor capacidade de predição pelas equações geradas. Neste sentido, para ter-se melhor estimativa da umidade retida na capacidade de campo, o ideal seria obterem-se amostras com estrutura preservada, para manter o efeito estrutural sobre a retenção de água.

Como demonstrado neste estudo, as equações geradas e as disponíveis na literatura, quando avaliadas apenas pelo seu coeficiente de correlação ou determinação, demonstram razoável capacidade de estimar a água retida. No entanto, ao tentarmos validar para diferentes solos, a relação 1: 1 indica uma baixa eficiência das equações, principalmente para potenciais mais próximos à capacidade de campo. Assim, nessas condições, a sua utilização prática é inviabilizada, para utilização em solos fora do banco de dados de origem.

6 CONCLUSÕES

Os teores de areia e argila e a densidade do solo foram as propriedades que melhor descreveram a retenção de água nas regressões múltiplas geradas.

O teor de areia apresenta uma relação negativa com a retenção de água, enquanto a argila relaciona-se positivamente.

A densidade do solo apresenta uma relação negativa com a retenção de água para os potenciais de -6 a -500 kPa e uma relação positiva com a água retida a -1500 kPa.

A melhor estimativa da retenção de água, com base na densidade e granulometria, ocorre para o potencial de -1500 kPa.

As funções de pedotransferência são mais eficientes quando usadas para estimar a retenção de água para os solos similares aos usados na geração das equações.

Quando se cruzam dados de bancos em que existe o predomínio de determinadas classes de solos, ocorre maior dispersão dos pontos e menor eficiência preditiva das pedofunções, o que não permite generalizações.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRÃO, P. U. R. **Características físico-hídricas e ocorrência provável de deficiência ou excesso de umidade em alguns solos da Campanha-Oeste do Rio Grande do Sul.** 1977. 107f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria 1977.

ARRUDA, F. B.; JÚLIO Jr., J. & OLIVEIRA, J. B. Parâmetros de solo para cálculo de água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.11, p.11-15, 1987.

BARCELOS, A. A. **Infiltração de água em um latossolo, sob chuva de alta intensidade, em diferentes sistemas de manejo.** 1996. 112f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

BELL, M. A. Organic matter, soil properties and wheat production in the High Valley of México. **Soil Science**, v.156, p. 86-93, 1993.

BELL, M. & KEULEN, van. H. Soil pedotransfer functions for four Mexican soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.59, p.865-871, 1995.

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. **Advances in Soil Science**, v.9, p.177-213, 1989.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos.** 6 ed. São Paulo: Biblioteca Universitária Freitas Bastos, 1983. 647p.

BROOKS, R. H. & COREY, A. T. Hydraulic properties of porous media. **Hydrology.** Paper no. 3. Colorado State University, Fort Collins, 1964.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Ciência Rural**, v.25, p.183-188, 1995.

CARLESSO, R. & ZIMMERMANN, F. L. Água no solo: parâmetros para dimensionamento de sistemas de irrigação. **Caderno Didático**, nº3, 2000.

CARPENEDO, V. **Compressibilidade de solos em sistemas de manejo**. 1994. 106f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1994.

CENTURION, J. Regime hídrico de alguns solos de Jaboticabal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.701-709, 2000.

CICHOTA, R. Análise da variabilidade espacial de pontos amostrais da curva de retenção da água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.585-596, 2004.

CHILDS, E. The use of soil moisture characteristic in soil studies. **Soil Science**, v.50, p.239-252, 1940.

CINTRA, F. L. D. **Caracterização do impedimento mecânico em Latossolos do Rio Grande do Sul**. 1980. 89f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1980.

COGO, N. P. **Morfologia e gênese de solos escuros formados sobre basalto na campanha-oeste do Rio Grande do Sul**. 1972, 131f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1972.

COSTA, A. E. M. **Quantificação de atributos físicos de solos de várzea, relacionados com a disponibilidade de água, o espaço aéreo e a consistência do solo**. 1993. 134f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 1993.

CUBERO, D. **Manual de manejo y conservación de suelos y aguas**. Ed. EUNED. ENED, San José, Costa Rica. 1994. 300 p.

CURI, N. **Relações genéticas e geomorfológicas em solos das encostas inferior e superior do nordeste do Rio Grande do Sul**. 1975. 149f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1975.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de Métodos e Análise de Solos.** Rio de Janeiro, 1997.

FARIAS, G. S. **Efeito de sistemas de cultivo sobre a porosidade e retenção de água de um solo laterítico Bruno Vermelhado Distrófico (Paleudult).** 1981. 78f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1981.

FARIAS, C. A. **Produção e qualidade de mudas de morangueiro (Fragaria x Ananassa Duch.) sob diferentes níveis de irrigação em Pelotas, RS.** 1997. 53f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 1997.

FERNANDEZ, M. B. R. C.; DE OLIVEIRA, J. R. Relações entre capacidade de campo determinada in situ e em laboratório em latosso amarelo muito argiloso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.11, p.91-95, 1987.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P. & IMHOFF, S. Relações entre propriedades físicas e características de solos da região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. V.26, p.885-893, 2002.

GOMES, A. S. **Relações solo-água em solos argilosos-escuros da Campanha Sudoeste do Rio Grande do Sul.** 1972. 94f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1972.

GUPTA, S. C. & LARSON, W. E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter content, and bulk density. **Water Resources Research**, v.15, p.1005-1013, 1979.

HAMBLIN, A. Sustainable agricultural systems: what are the appropriate measures for soil structure? **Australian Journal of Soil Research**, v.29, p.709-15, 1991.

HILLEL, D. **Soil and water: Physical principles and processes.** New York: Academic Press, 1971. 288 p.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics.** New York: Academic Press, 1980. 413 p.

HILLEL, D. **Environmental soils physics.** Massachusetts: EDITORA, 1998. 384 p.

JUHÁSZ, C. E. P. Dinâmica físico-hídrica de uma toposseqüência de solos sob savana florestada (cerradão) em Assis, SP. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. V.30, p.401-412, 2006.

KLEIN, V. A.; REICHERT, J. M. & REINERT, D. J. Água disponível em um Latosso Vermelho argiloso e murcha fisiológica de culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, p.646-650, 2006.

KOCHHANN, R. A. **Levantamento detalhado e classificação de capacidade de uso e irrigação dos solos do Posto Agropecuário de Carazinho-RS**. 1971. 100f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1971.

LEITZKE, V. W. **Armazenagem e disponibilidade de água de solos construídos na área de mineração de carvão de Candiota - RS**. 2002. 129f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2002.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Edusp, 2005. 335p.

LIER, Q.J.V. Índices da disponibilidade de água para as plantas. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R. **Tópicos em Ciência do Solo**. v.1 Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. p. 96-105.

LIMA, A. C. R. **Caracterização hidráulica de um planossolo sob diferentes sistemas de manejo**. 2001. 73f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal de Pelotas, Pelotas 2001.

LIN, H.S. McINNIS, K.J.; WILDING, L.P. & HALLMARK, C.T. Effects of soil morphology on hydraulic properties: Hydraulic pedotransfer functions. **Soil Science Society American Journal**, v.63, p.955-961, 1999.

MASSUTI, M. M. **Caracterização da água disponível a partir de parâmetros físico-hídricos em solos da zona da mata do estado de Pernambuco**. 1997. 69f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 1997.

MELLO, C. R.; OLIVEIRA, G. C.; FERREIRA, D. F. & LIMA, J. M. Predição da porosidade drenável e disponibilidade de água para Cambissolos da Microregião Campos das Vertentes, MG. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, p.1319-1324, 2002.

MENG, T. P.; TAYLOR, H. M.; FRYREAR, D. W.; GOMEZ, J. F. Models to predict water retention in semiarid sandy soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.5, p.1563-1565, 1987.

MOTTA, P. E. F. **Retenção de água, distribuição e características de óxidos de ferro e regime de umidade de solos de uma catena no Município de Uberaba, Minas Gerais**. 1988. 127f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 1988.

NUNES, M. C. D. **Condições físicas de solos construídos na área de mineração de carvão de Candiota-RS**. 2002. 131f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2002.

OLIVEIRA, L. B. Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformadas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.3, p 197-200, 1996.

OLIVEIRA, L. B.; RIBEIRO, M. R.; JACOMINE, P. K. T.; RODRIGUES, J. J. V. & MARQUES, F. A. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.315-323, 2002.

PACHEPSKY, Y. & RAWLS, W. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. **Soil Science Society American Journal**, v.63, p. 1748-1757, 1999.

SOLANO, P. J. E. **Retenção de água e pedofunções para solos do Rio Grande do Sul**. 2003. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

PETRY, M. **Interação solo-planta e disponibilidade de água no solo às plantas de sorgo e soja**. 2000. 127f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: Salesward-Discovery, 1996. 446p.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v.12, p.211-216, 1988.

REICHARDT, K. A água em sistemas agrícolas. Editora Manole LTDA. São Paulo, Brasil. 188f. 1990.

REICHERT, J. M. **Formação de selo superficial e infiltração de água sob chuva simulada em solos do Rio Grande do Sul**. 1988. 165f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.

RHEINHEINMER, D.; GATIBONI, L.; KAMINSKI, J.; ROBAINA, A.; ANGHINONI, A.; FLORES, J. & HORN, D. **Situação da fertilidade dos solos no Estado do Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Departamento de Solos, 2001. 41f. (Boletim técnico de solos, 2).

RICHARDS, L. Methods of measuring moisture tension. **Soil Science**, v.58, p.95-112, 1949.

RIGHES, A. A. **Efeitos da irrigação e drenagem em três épocas de semeadura, na cultura do milho em resteva de arroz**. 1971. 145f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1971.

RIGHES, A.; LOVATO, T. & SOARES, E. Caracterização física, química e microbiológica de um planossolo da unidade de mapeamento Vacacaí, RS. **Ciência Rural**, v.13, n.1, p.25-45, 1983.

RIVERS, E. S. Available water capacity of sandy and gravelly North Dakota soils. **Soil Science**, v.113, p.74-80, 1972.

RIVERS, E. S. Soil water retention as related to particle size in selected sands and loamy sands. **Soil Science**, v.126, p.94-100, 1978.

ROJAS, C. A. L. **Alterações físico-hídricas de um Podzólico em função do manejo do solo**. 1998. 76f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

SALTON, J. C. **Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade do solo**. 1991. 92f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J.; ROMBERGER, J. S.; PAPENDICK, R. I. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. **Soil Science Society of America Journal**, v.5, p.1031-1036, 1986.

SCOPEL, I. **Características físicas de solos da região litoral-norte do Rio Grande do Sul**. 1977. 120f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1977.

SCHÄFER, M. J. **Erosão em entressulcos e em sulcos sob diferentes preparos e consolidação do solo**. 1999. 139f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.

SAS INSTITUTE (Cary, Estados Unidos). **SAS/STAT: procedure guide for personal computers. Version 5**. Cary, 1997. 1042p. 1997. **SAS Institute**. USA: Inc, Cary.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. & ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in brasilian soils. **Soil Science Society America Journal**, v.64, p.327-338, 2000.

TORMENA, C.A., SILVA, A.P. da & LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.573-581, 1998.

Van den BERG, M.; KLAMT, E.; van REEUWIJK, L. P. & SOMBROEK, W. G. Pedotransfer functions for the moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. **Geoderma**, v.78, p.161-180, 1997.

Van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society America Journal**, v.44, p.892-898, 1980.

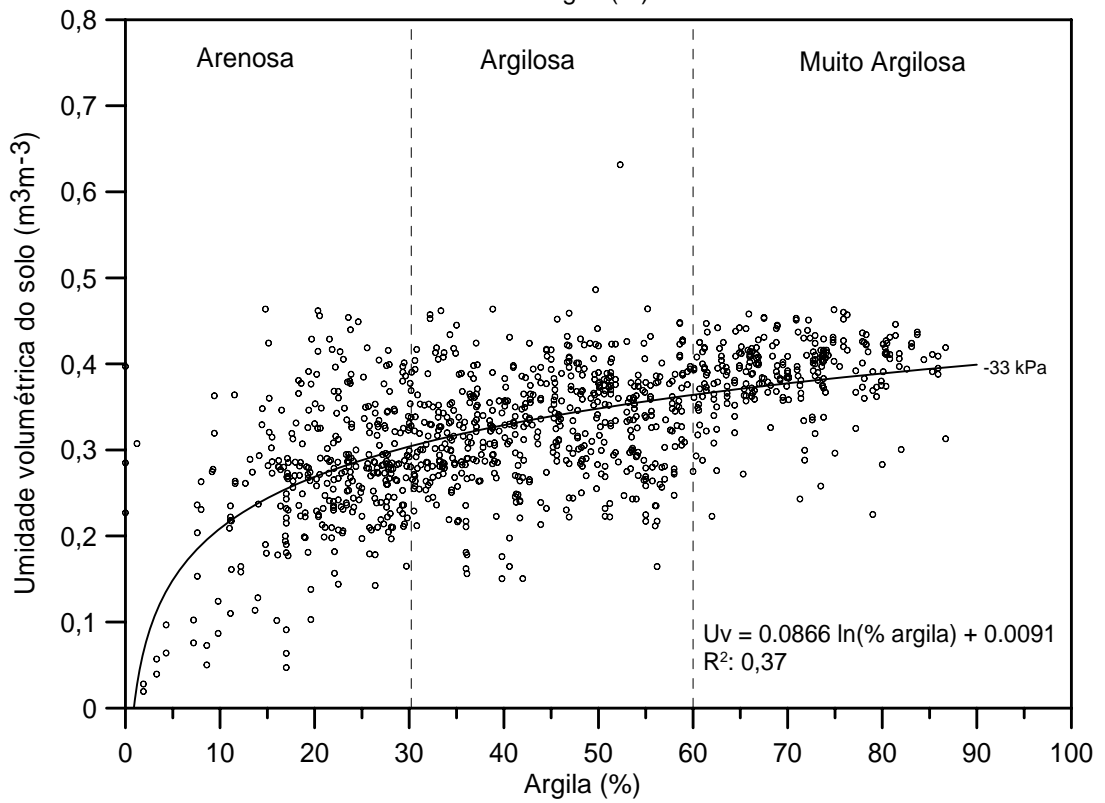
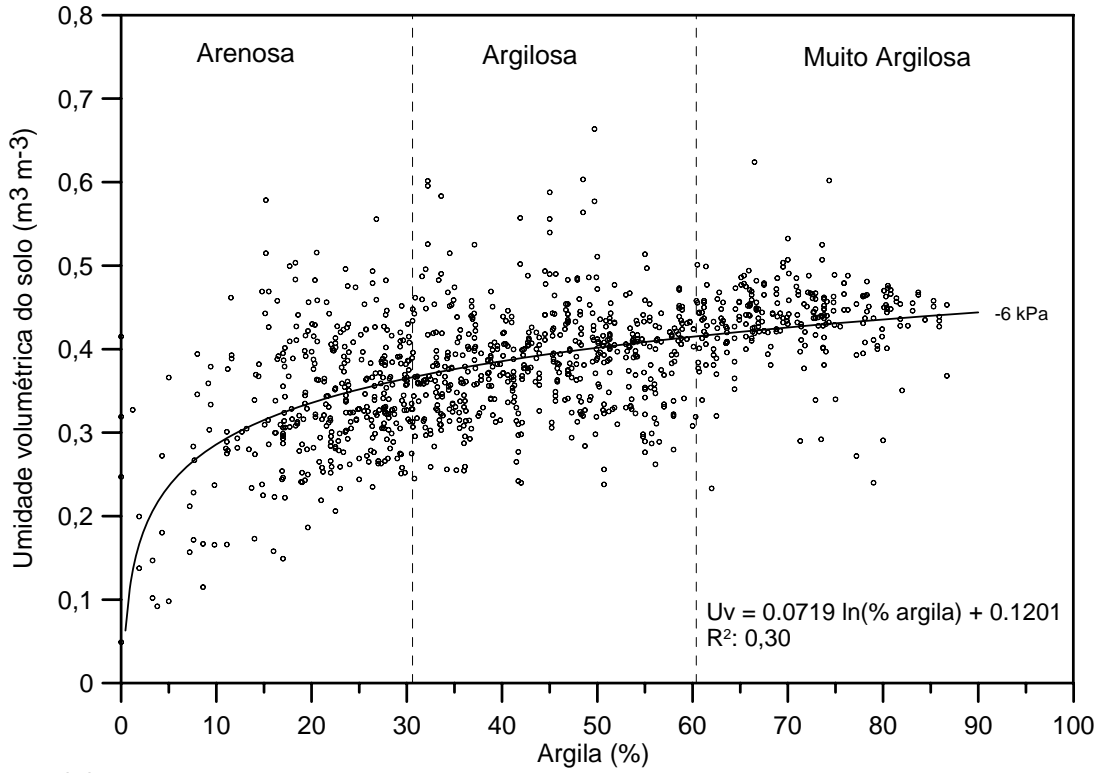
VAZ, C. M. P. ; IOSSI, M. F.; NAIME, J. M.; MACEDO, I.; REICHERT, J. M.; REINERT, J.D. & COOPER, M. Validation of the Arya and Paris water retention model for Brazilian soils. **Soil Science Society American Journal**, v.69, p.577-583, 2005.

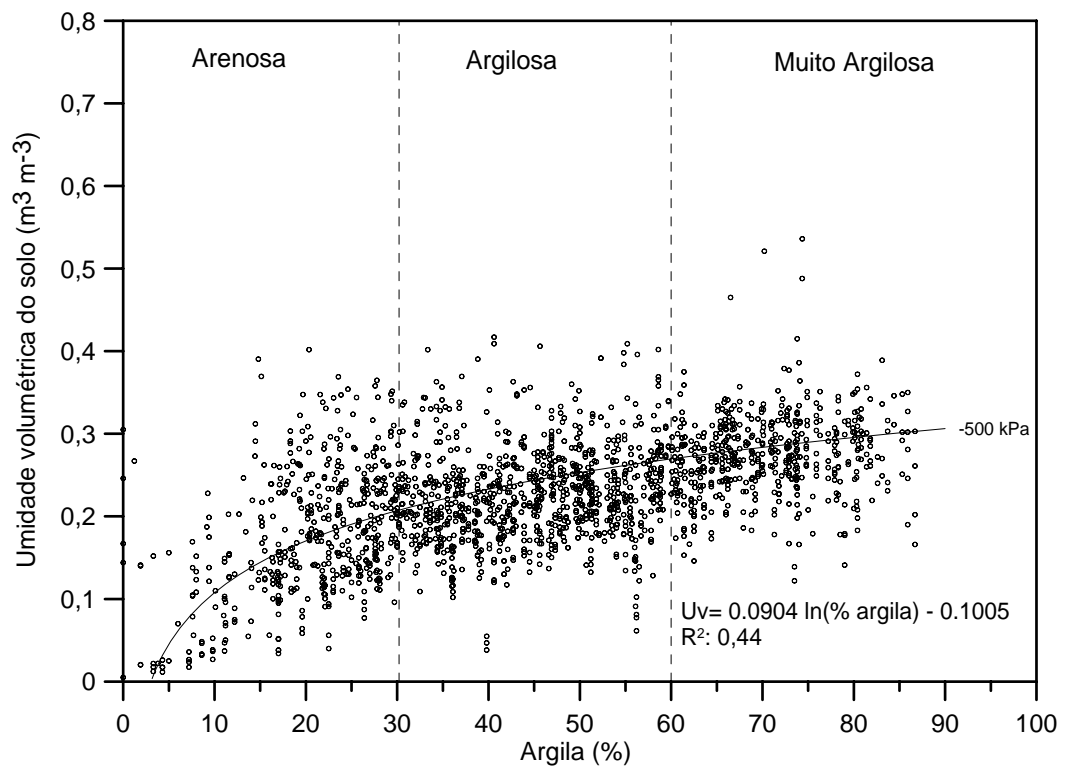
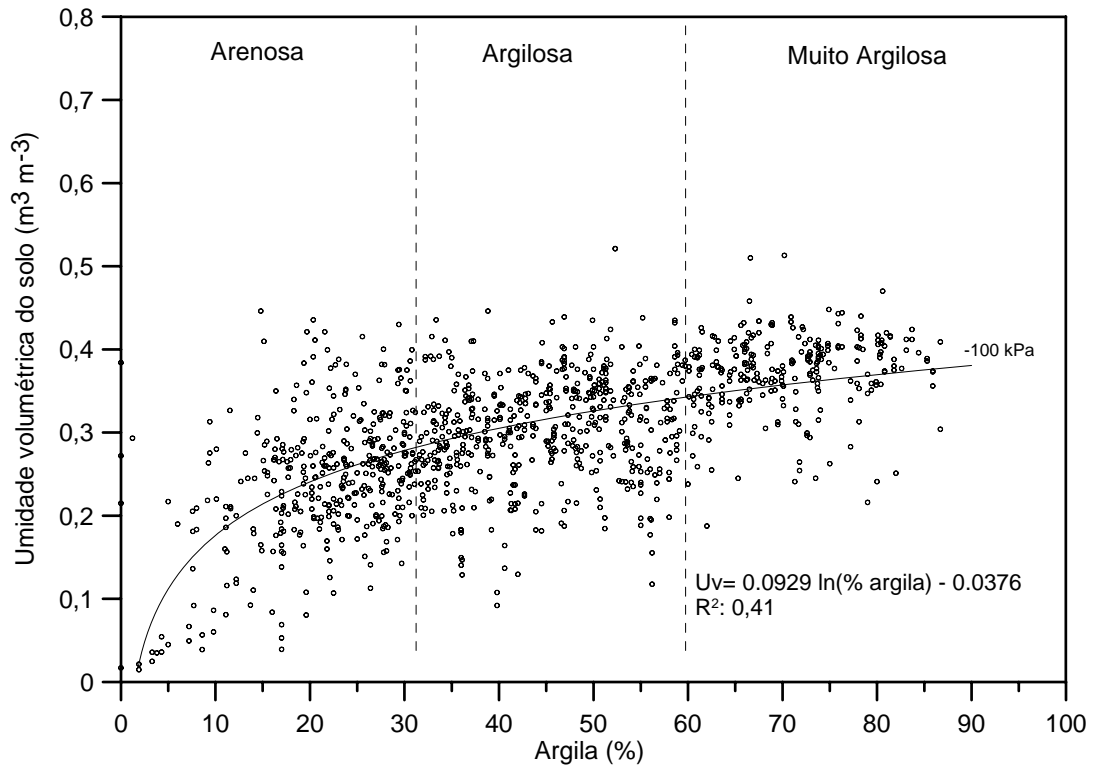
VERECKEN, H. J.; MAES, J.; FEYEN, J. & DARIUS, P. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. **Soil Science**, v.148, p.389-403, 1989.

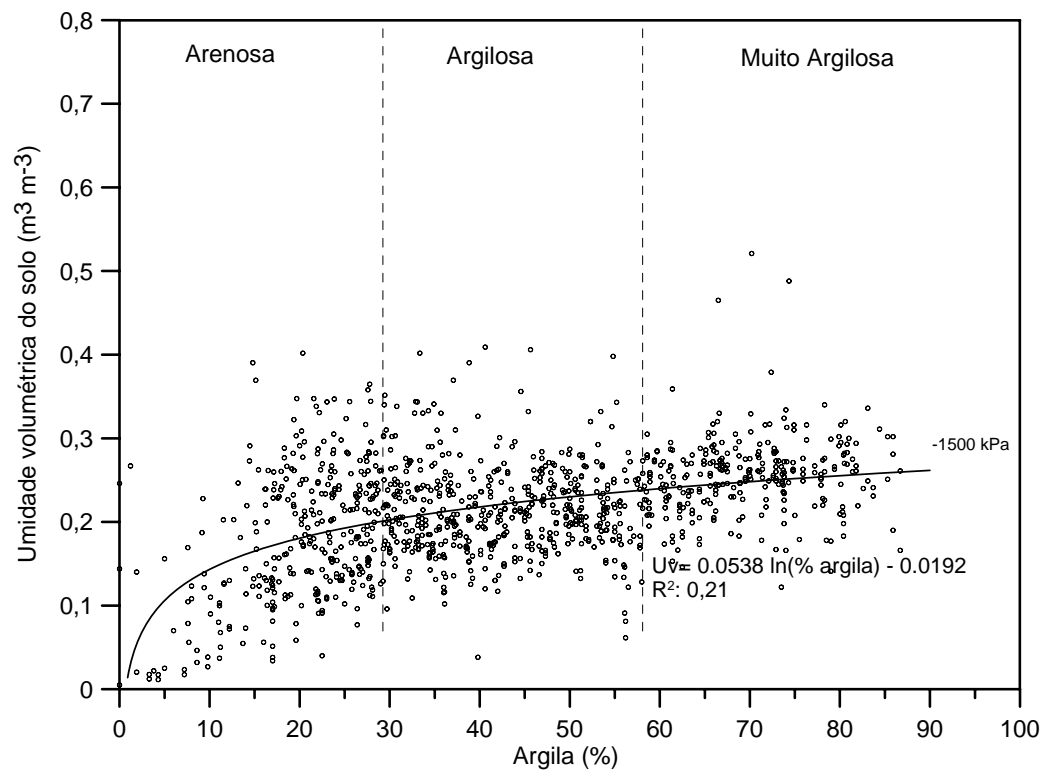
WÖSTEN, J.; FINKE, P.; JANSEN, M. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. **Geoderma**, v.66, p.227-237, 1995.

8- ANEXOS

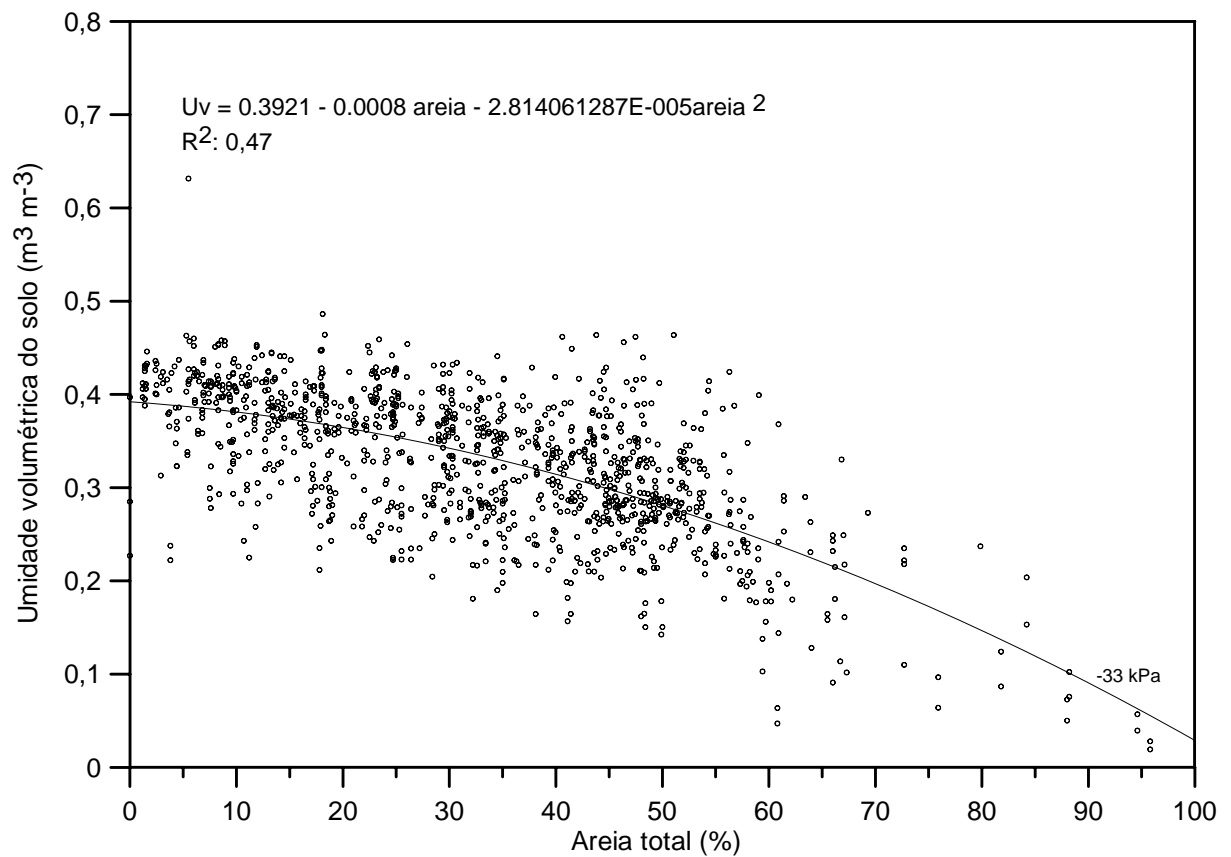
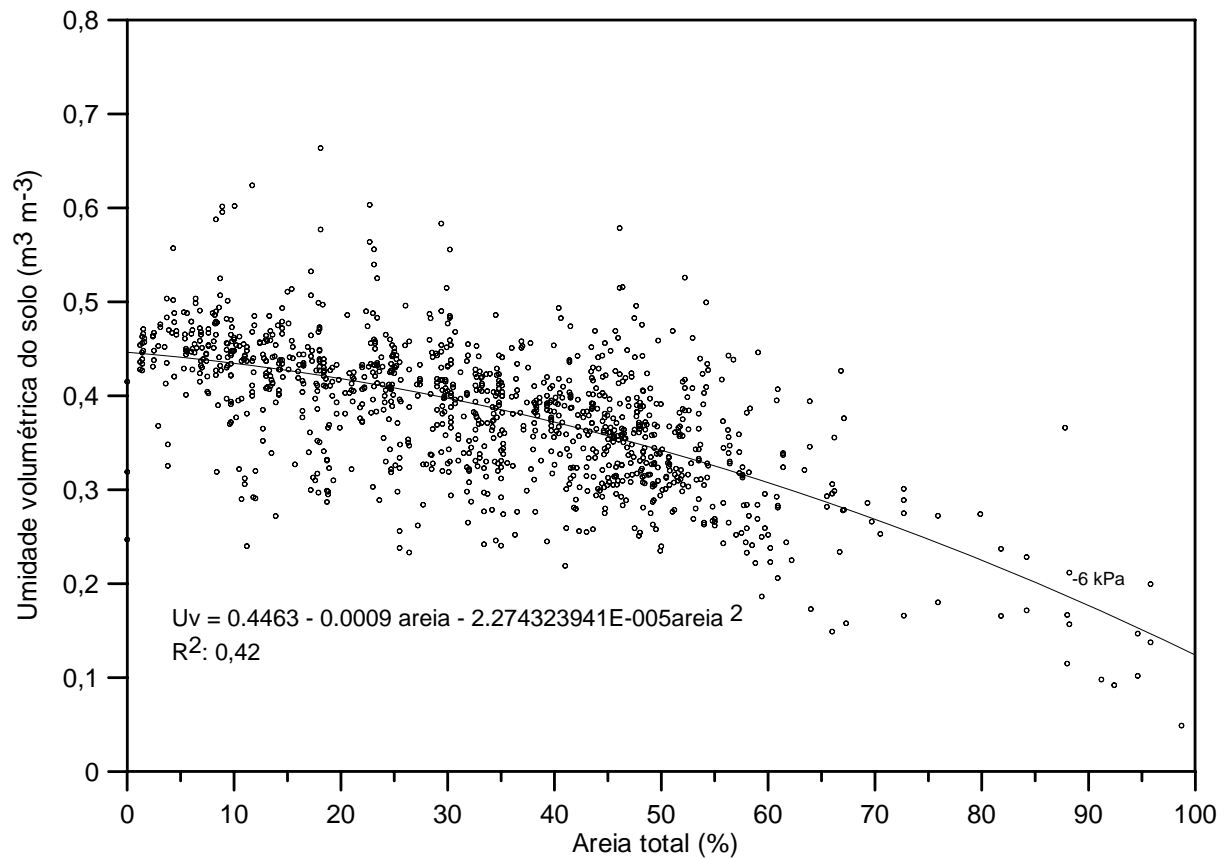
ANEXO A - Relação entre a argila e a retenção de água no solo sob diferentes potenciais matriciais.

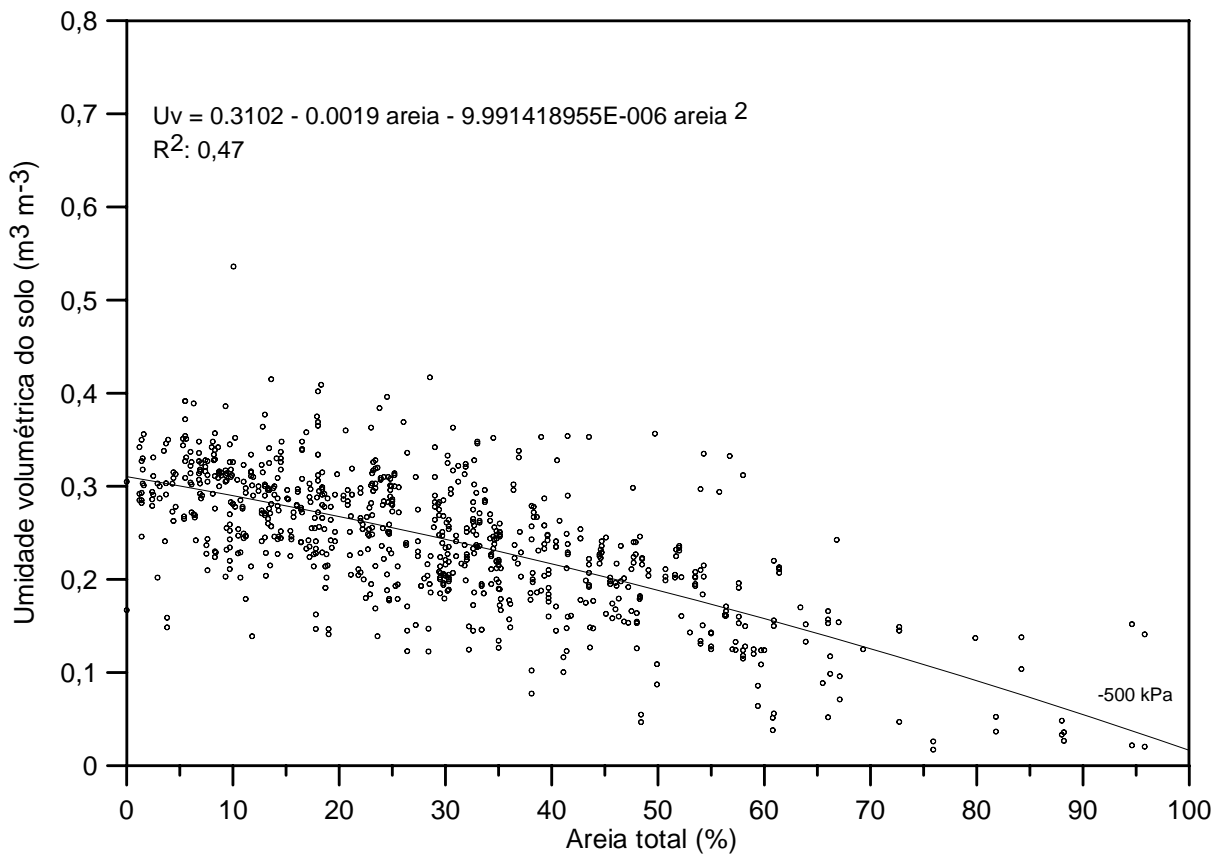
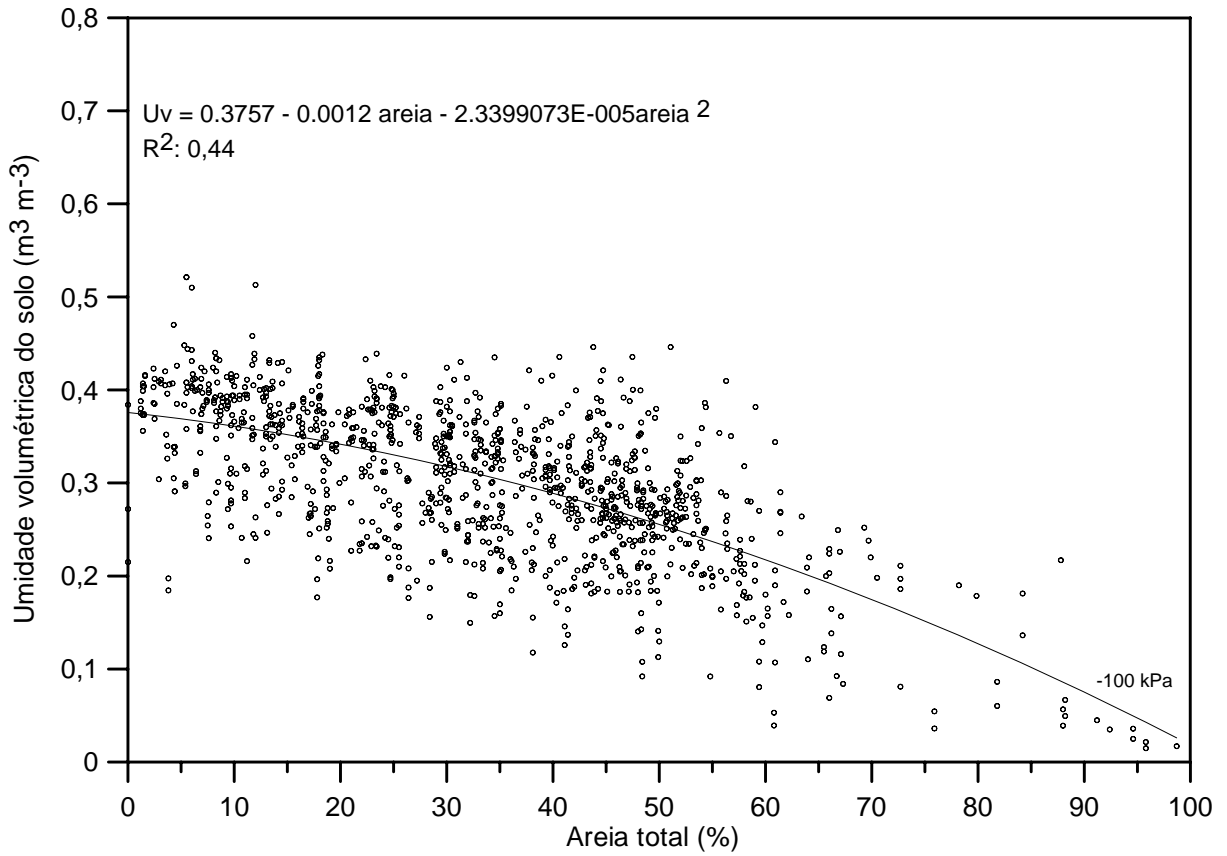


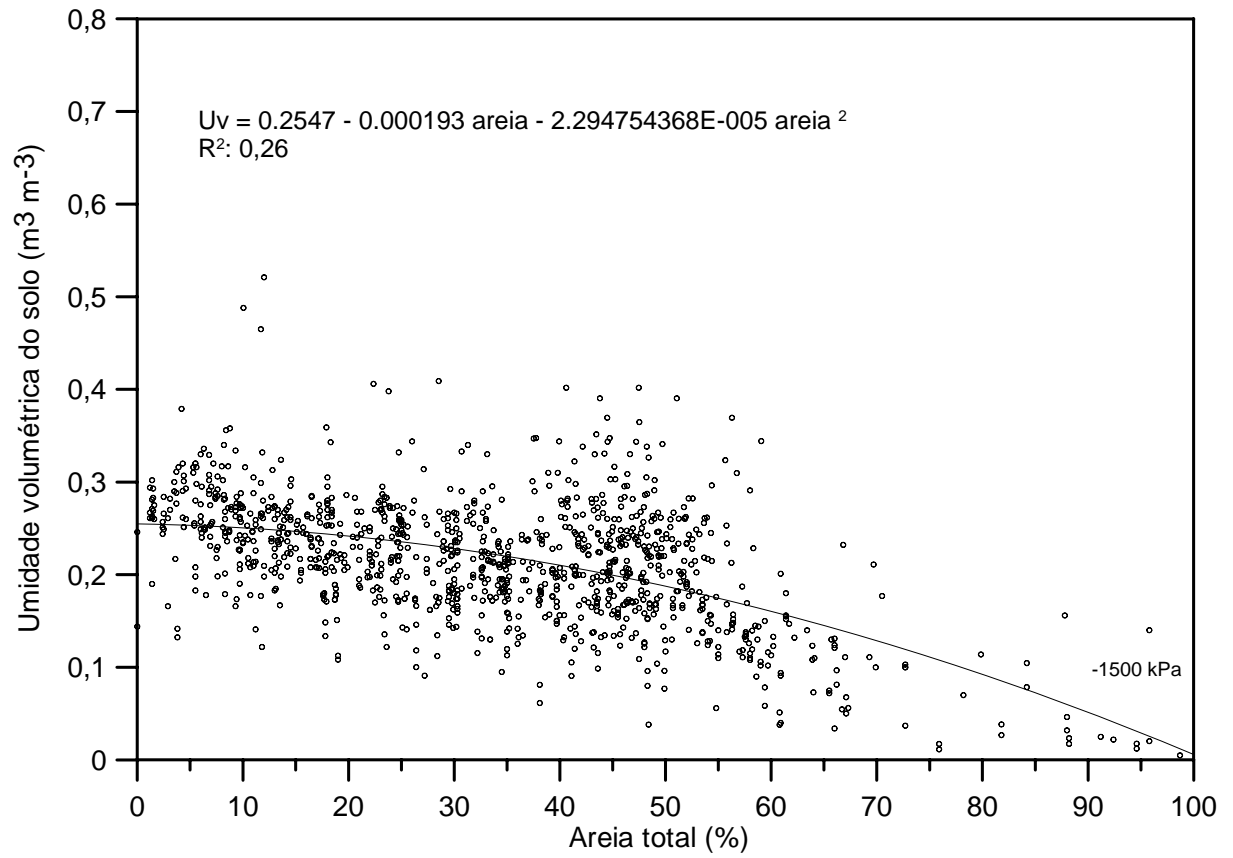




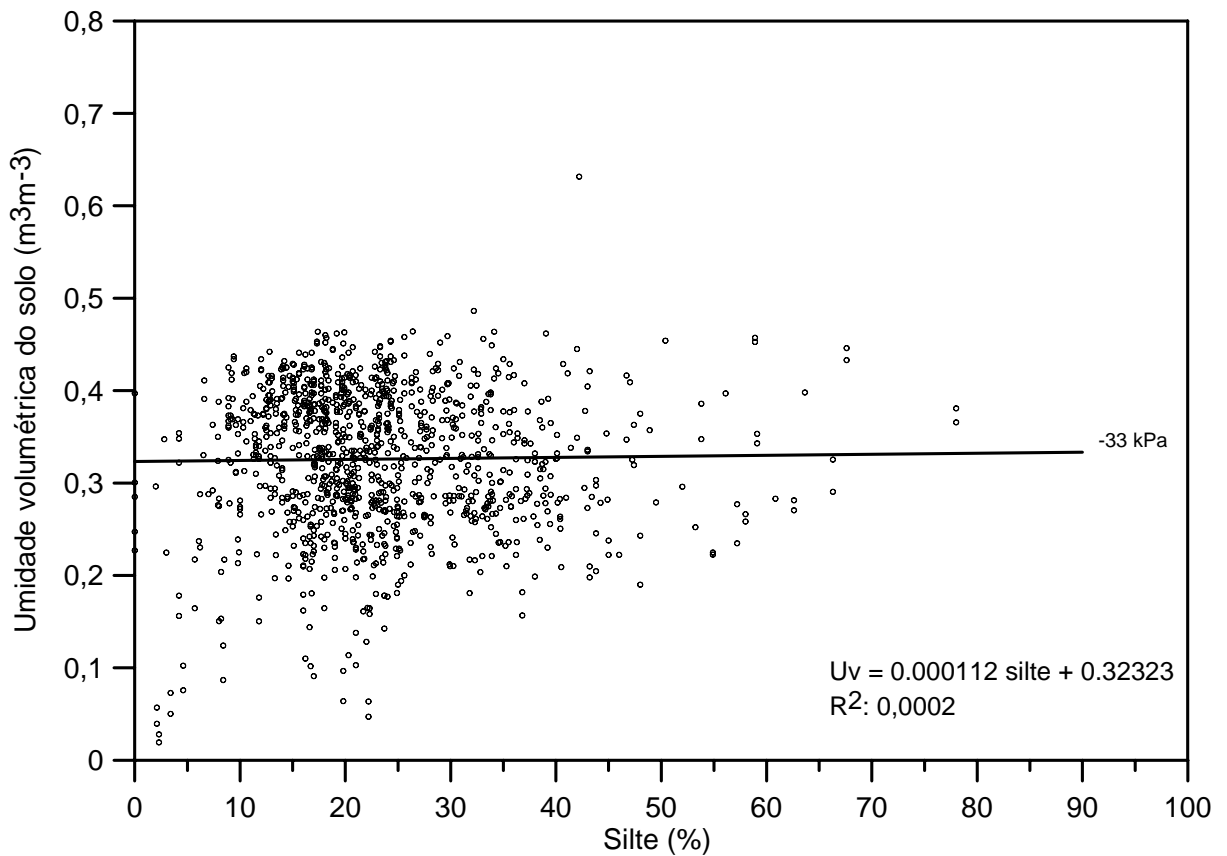
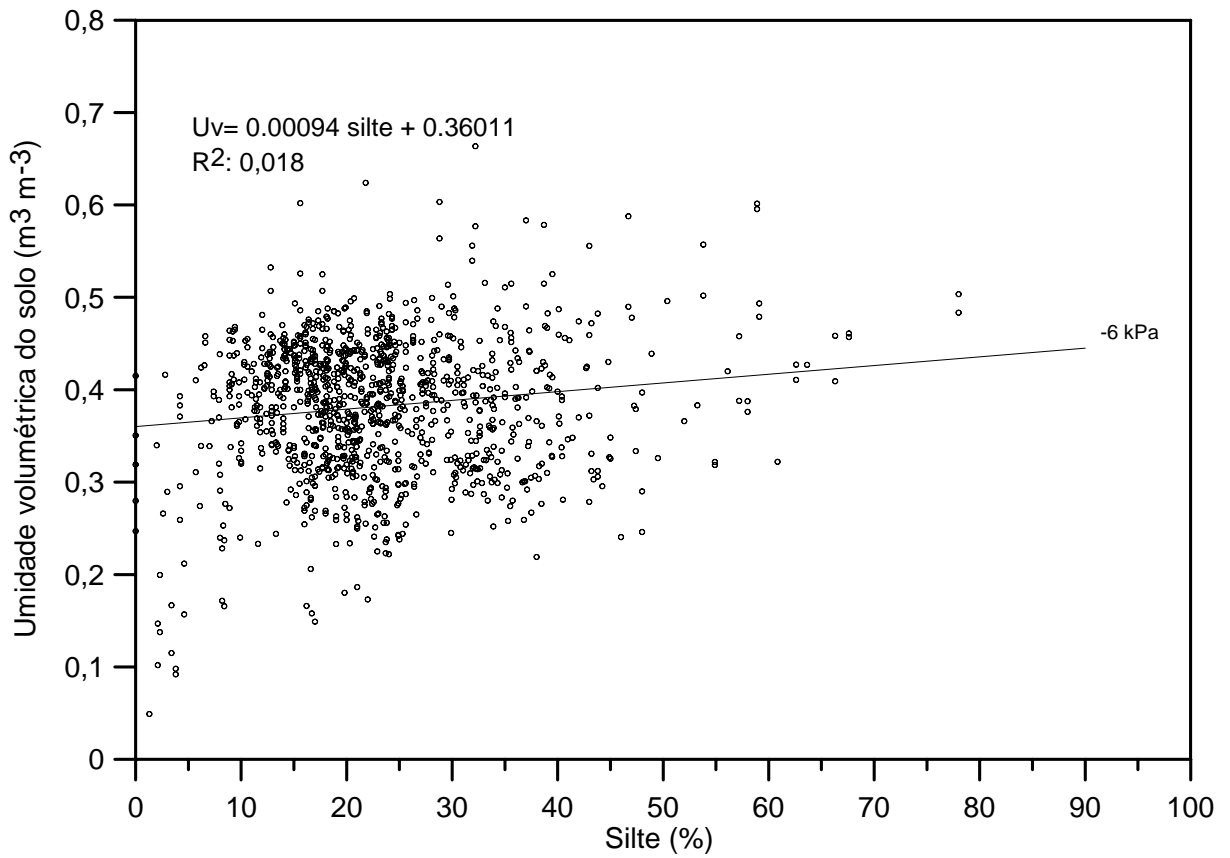
ANEXO B - Relação entre a areia total e a retenção de água no solo sob diferentes potenciais matriciais.

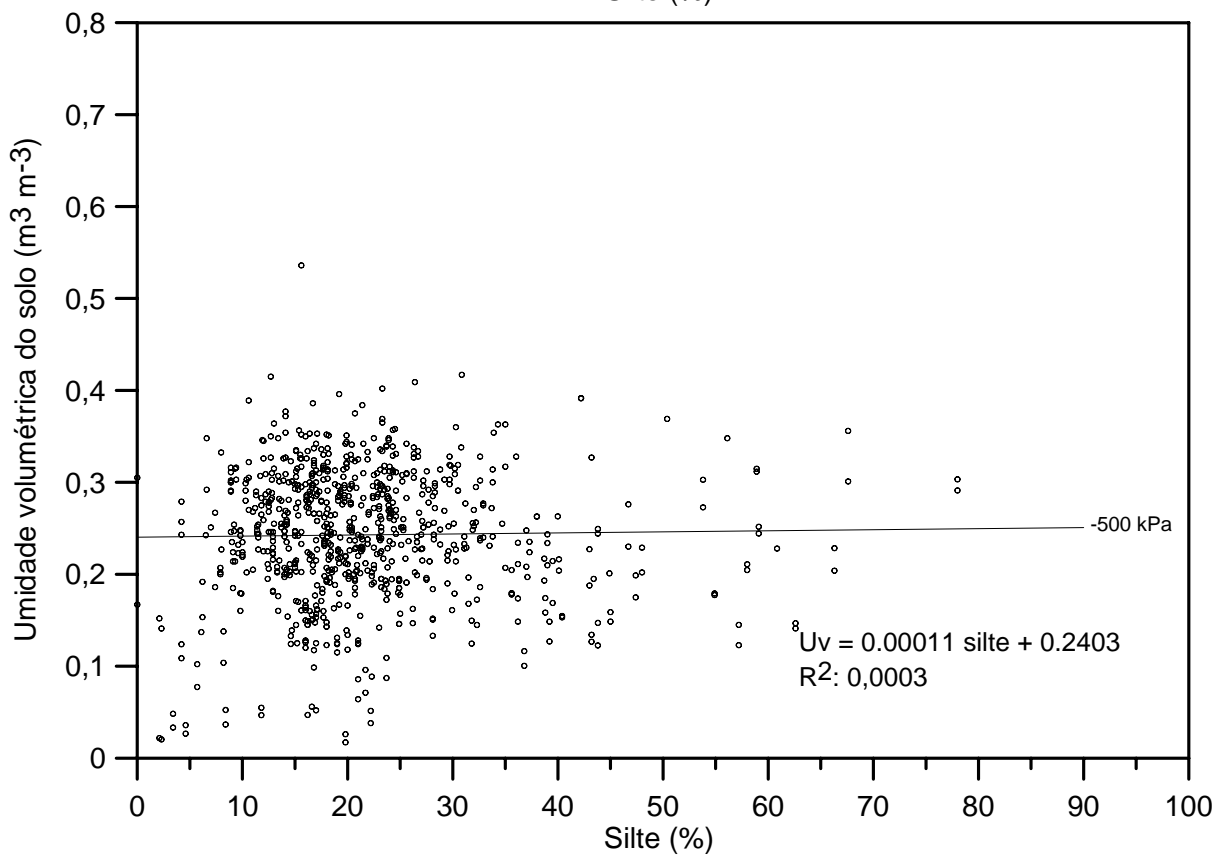
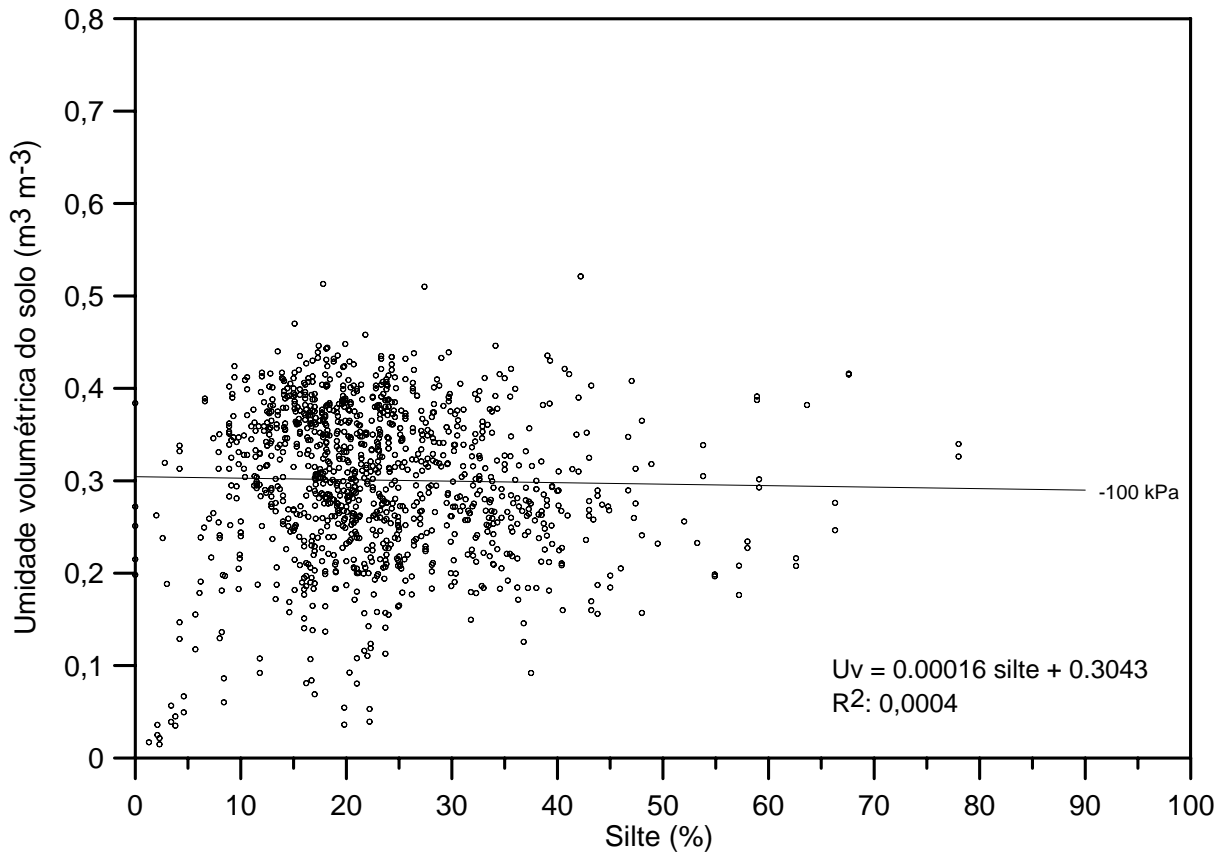


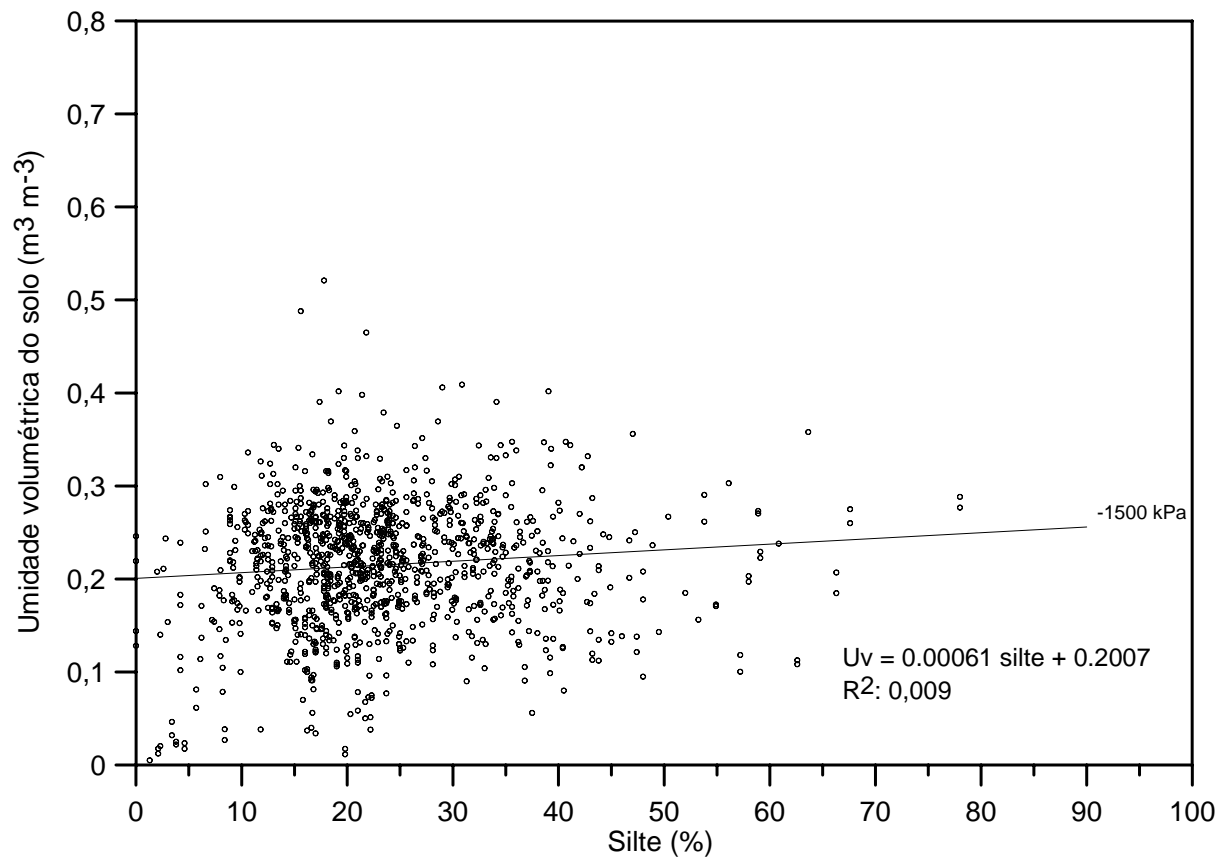




ANEXO C - Relação entre o silte e a retenção de água no solo sob diferentes potenciais matriciais.







ANEXO D - Relação entre a densidade e a retenção de água no solo sob diferentes potenciais matriciais.

