

# A Low-Field NMR Tool for Soil Moisture

Von der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften der  
RWTH Aachen University zur Erlangung des akademischen Grades  
eines Doktors der Naturwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

M. Sc.

OSCAR ELÍAS SUCRE

aus Baruta, Venezuela

Berichter: Universitätsprofessor Prof. Dr. Bernhard Blümich  
Universitätsprofessor Prof. Dr. Wolfgang Stahl

Tag der mündlichen Prüfung: 9. Mai 2011



Berichte aus der Physik

**Oscar Elías Sucre Reyes**

**A Low-Field NMR Tool for Soil Moisture**

Shaker Verlag  
Aachen 2011

**Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2011)

Copyright Shaker Verlag 2011

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0162-4

ISSN 0945-0963

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • e-mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

Die vorliegende Arbeit wurde in der Zeit von Oktober 2006 bis Dezember 2010 am Lehrstuhl für Makromolekulare Chemie der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule in Aachen angefertigt. Herrn Prof. Dr. B. Blümich danke ich für die Übernahme der wissenschaftlichen Betreuung dieser Promotionsarbeit. Für die freundliche Übernahme des Koreferats danke ich Dr. Andreas Pohlmeier aus der Forschungszentrum Jülich.

Gedruckt mit Unterstützung des Deutschen Akademischen Austauschdienstes



Esta tesis doctoral esta dedicada al botánico suizo

HENRI FRANÇOIS PITTIER (1857-1950)

quien llego a mi querida patria, Venezuela, en 1916  
a hacer ciencia, algo en aquel entonces nuevo y desconocido,  
pero precisamente por ello, útil y necesario.



# Contents

|          |                                                            |           |
|----------|------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduction</b>                                        | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Dynamics of Soil Water</b>                              | <b>5</b>  |
| 2.1      | Flow in unsaturated media . . . . .                        | 7         |
| <b>3</b> | <b>Nuclear Magnetic Resonance</b>                          | <b>11</b> |
| 3.1      | Introduction . . . . .                                     | 11        |
| 3.2      | Spin echoes . . . . .                                      | 14        |
| 3.3      | NMR in inhomogeneous fields . . . . .                      | 17        |
| 3.4      | Relaxation in NMR . . . . .                                | 21        |
| 3.5      | NMR in porous media . . . . .                              | 22        |
| <b>4</b> | <b>An NMR Moisture Sensor for Soils</b>                    | <b>25</b> |
| 4.1      | Introduction . . . . .                                     | 25        |
| 4.2      | The NMR-SPADE . . . . .                                    | 26        |
| 4.3      | The NMR slim-line logging tool . . . . .                   | 32        |
| 4.3.1    | Measurement of partial saturation . . . . .                | 36        |
| 4.3.2    | Capabilities for relaxation analysis . . . . .             | 38        |
| 4.4      | Conclusions . . . . .                                      | 43        |
| <b>5</b> | <b>Experiments in Transport of Moisture</b>                | <b>45</b> |
| 5.1      | Introduction . . . . .                                     | 45        |
| 5.2      | Drainage Experiments . . . . .                             | 45        |
| 5.2.1    | Experimental conditions . . . . .                          | 46        |
| 5.2.2    | Results . . . . .                                          | 49        |
| 5.2.3    | Inverse analysis . . . . .                                 | 51        |
| 5.2.4    | Infiltration Experiment . . . . .                          | 55        |
| 5.3      | Relaxation analysis in partially saturated soils . . . . . | 57        |
| 5.4      | Conclusions . . . . .                                      | 62        |
| <b>6</b> | <b>Field Measurements</b>                                  | <b>65</b> |

|          |                                                  |           |
|----------|--------------------------------------------------|-----------|
| <b>7</b> | <b>Conclusions and Outlook</b>                   | <b>71</b> |
| 7.1      | Conclusions . . . . .                            | 71        |
| 7.2      | Outlook . . . . .                                | 73        |
| <b>A</b> | <b>A theoretical Signal-to-Noise Ratio</b>       | <b>75</b> |
| A.1      | Introduction . . . . .                           | 75        |
| A.2      | The experimental signal-to-noise ratio . . . . . | 75        |
| A.3      | The theoretical signal-to-noise ratio . . . . .  | 78        |
|          | A.3.1 Calculation of the NMR signal . . . . .    | 78        |
|          | A.3.2 Thermal noise . . . . .                    | 82        |
| A.4      | Theoretical SNR vs. experimental SNR . . . . .   | 85        |