

- *Fog types – Fog chemistry – Fog collection – Cloud forests – Wind-driven rain*

**Werner Eugster** (Zurich)

## **Fog Research**

### *Nebelforschung*

With 4 Figures and 1 Table

This paper serves as an introductory paper to the special issue on fog research. First, a general introduction to the climatic element of fog is given, followed by an overview of current fog research as presented at the 4<sup>th</sup> International Conference on Fog, Fog Collection and Dew in La Serena, Chile in summer 2007. A selection of papers that cover geographical aspects of fog research or provide an insight into fog collection are included in this special issue of DIE ERDE (volume 139, issue 1-2).

### **1. Introduction**

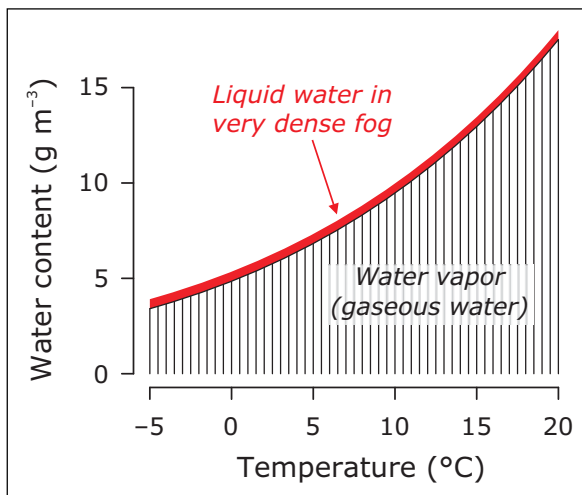
Fog is not a consistent and continuous climatic phenomenon (Wanner and Kunz 1983) and thus research interests related to fog are often closely linked with geographical places where fog occurs frequently and thus is considered a relevant component of the respective climate. For example, San Francisco (USA) is considered “fog city” (Gilliam 1962), a result of the proximity of the city to the cold Pacific Ocean and the west wind drift that advects dense fog banks from the sea onshore.

Another locality where fog seems to be intimately linked with the city’s name is London. Blake (1871) names it the “genuine London fog”, but

basically describes the special phenomenon that is nowadays generally termed “smog”, the combination of acidic smoke and dense fog which was “so irritating to the eyes, that although there was nothing in the opera to move one, the audience seemed to be perpetually in tears” (Blake 1871: 76). Even more than one hundred years later, the chemistry of fog is one of the most active fields of scientific research on fog (e.g. Collett et al. 2002, Fuzzi et al. 2008, Collett et al. 2008).

#### *1.1 Definition of fog*

Depending on disciplines a wealth of terms for fog have evolved, but no consistent use of these terms



*Fig. 1* Even with very dense fog most of the atmospheric water is in the gaseous phase (water vapor) whereas the liquid water from fog droplets only adds a very small amount (typically less than  $0.5 \text{ g m}^{-3}$ , in red). / Auch bei sehr dichtem Nebel liegt der größte Teil des atmosphärischen Wassers gasförmig (als Wasserdampf) vor, während das flüssige Wasser aller Nebeltröpfchen einen sehr kleinen Anteil beisteuert (typischerweise weniger als  $0,5 \text{ g m}^{-3}$ , in rot eingezeichnet).

can be found, not even within a given discipline. Meteorologists for example most commonly use the definition that fog occurs if the horizontal visibility is less than 1000 m (Glickman 2000). Since visibility can also be well below 1000 m during heavy precipitation and other specific phenomena, Glickman (2000) extended the commonly used meteorological definition with the requirement that fog consists of cloud droplets in the air that reduce the visibility and are less than  $200 \mu\text{m}$  in size. Thus, in principle, fog is a cloud that touches the ground surface and envelops the observer. Knowing this resolves many inconsistencies in terminology that relate to common use of language. For example, in German a forest strongly influenced by frequent and persistent fog is termed “*Nebelwald*” (fog forest), whereas the correct English terminology is “cloud forest”, even when this cloud touches the ground surface and is thus termed a “fog”.

The effect of liquid cloud droplets on visibility is so strong that one easily forgets that even in a very dense fog the lion’s share of atmospheric water is still in gaseous form, and not in liquid phase (Fig. 1).

## 1.2 Types of fog

An attempt to group available terminology and thus provide a set of terms that are used rather frequently and in a more or less consistent manner (Fig. 2) was made by this author in the Encyclopedia of Hydrological Sciences (Bruijnzeel et al. 2005, Anderson 2005). Apart from ice fog and urban fog, which are only used in very localized contexts, there are seven types of fog that can be distinguished. Four of them are named according to where the fog was formed and the process that formed the fog (radiation fog, sea fog, steam fog, advection fog), and three types are rather geographical terms of where fog occurs, irrespective of where and how it was formed (coastal fog, valley fog, mountain fog).

Radiation fog is the type of fog that is very common in areas where cold air can accumulate during the night, or for longer periods in winter. Especially in remote sensing studies using satellite images (e.g. Bendix 2002, Cermak and Bendix 2008) it is this type of fog which is usually observed. Since satellite images only show the top of the fog banks it is generally not possible to de-

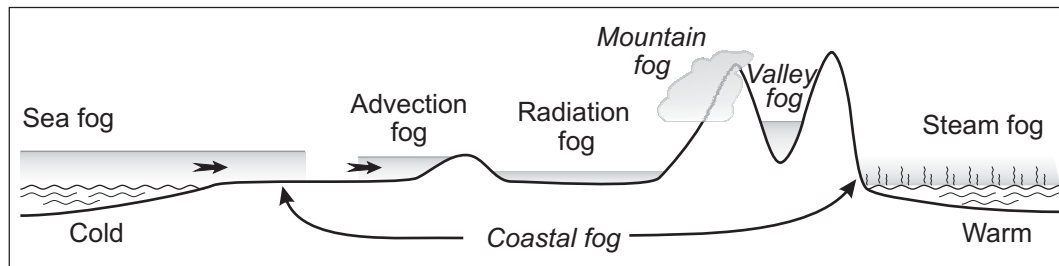


Fig. 2 Types of fog according to Bruijnzeel et al. (2005). Terms in upright font are process-based types, those in italics are geographic types. Additionally, the terms “ice fog” and “urban fog” are used for very local types of fogs. Reprinted from Bruijnzeel et al. (2005) in Anderson (2005): 562; reproduced with kind permission of John Wiley & Sons Ltd. / *Nebeltypen nach Bruijnzeel et al. (2005). Begriffe in Normalschrift bezeichnen Nebeltypen, die nach deren Entstehungsprozess benannt sind, solche in Kursivschrift hingegen Typen, die nach deren geographischem Vorkommen bezeichnet werden. Zusätzlich existieren die Begriffe “Eisnebel” und “Stadtnebel” für sehr lokale Nebeltypen. Quelle: Bruijnzeel et al. (2005) in Anderson (2005): 562; wiederabgedruckt mit freundlicher Genehmigung von John Wiley & Sons Ltd.*

termine with sufficient confidence whether the cloud touches the ground surface or not. Therefore, the more generally valid term “stratus cloud” is used in order not to be too speculative on the processes that produced the fog. Raised fog (*Hochnebel* in German) and surface fog (*Bodennebel* in German) can be included in such a way without being in conflict with the generally accepted definition of fog according to Glickman (2000).

Sea fog and steam fog are both produced over the open oceans, but with the distinct difference that sea fog is fog that forms due to cooling of humid air over a cold ocean surface, whereas steam fog is typically formed when cold air with low water vapor saturation capacity flows over a warm water surface that evaporates water at a higher rate than the cold air can hold. The excess water vapor condenses to tiny droplets that form the steam fog.

Advection fog requires a steady wind that moves a fog layer that has formed upwind of a given site. Thus, in contrast to radiation fog that basically implies weak wind conditions or stagnant air masses, the advection fog may

have different properties. Droplet sizes typically range between 1 and 30  $\mu\text{m}$  in advection fogs but can reach sizes well above 50  $\mu\text{m}$  in well-developed radiation fogs (Bruijnzeel et al. 2005).

Coastal fog is typically an advection fog, as observed in the San Francisco area (Gilliam 1962), the Atacama coastal desert (e.g. Cereceda et al. 2008, Cereceda et al. 2008), the Namib coastal desert (e.g. Seely and Hamilton 1976, Lange et al. 1994), or in polar regions during the summer when the land surface is warmer than the cold ocean surface. In such cases, the steady on-shore winds transport the dense sea fog that forms offshore over the coast.

Valley fog is typically a radiation fog that forms in a mountain valley, whereas mountain fog is a cloud (not necessarily a stratus or stratiform cloud) that moves over the land surface at a certain height which is known as the lifting condensation level in convective clouds and then touches the ground surface on mountains as orographical obstacles. Especially tropical montane cloud forests are thought to be highly influenced by this variety of fog.

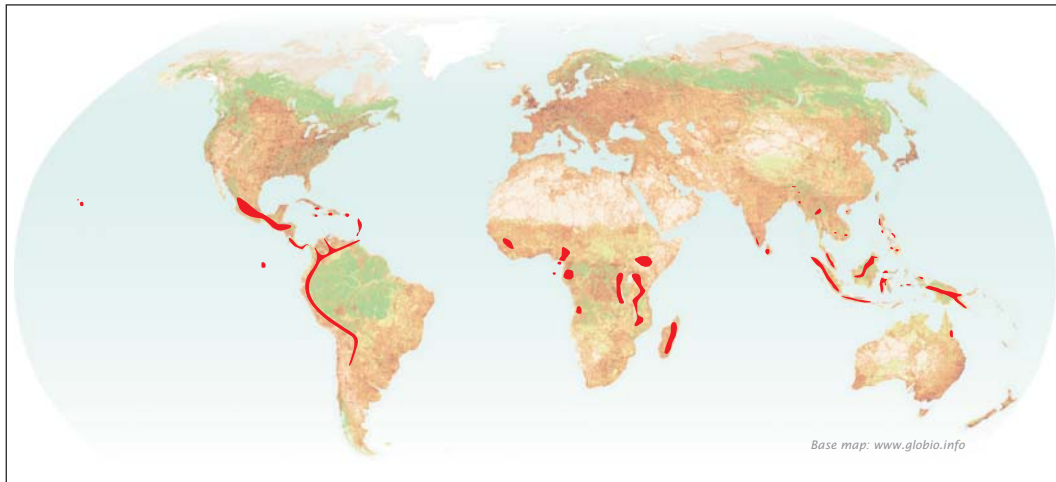


Fig. 3 Areas with fractions of tropical cloud forests (in red), including tropical montane cloud forests. Compiled and generalized after *Bubb et al. (2004)*. Base map uses the Robinson projection and shows the world's status in 2002 ([http://www.globio.info/region/world/world\\_robinson.png](http://www.globio.info/region/world/world_robinson.png), 12.11.2007). / Gebiete mit Anteilen von tropischen Nebelwäldern (in rot), inklusive tropischer montaner Nebelwälder. Zusammengestellt und generalisiert nach *Bubb et al. (2004)*. Die Basiskarte in der Robinson-Projektion zeigt den Zustand der Welt im Jahre 2002 ([http://www.globio.info/region/world/world\\_robinson.png](http://www.globio.info/region/world/world_robinson.png), 12.11.2007).

### 1.3 Relevance of fog

Fog research does not belong to the mainstream research areas, but occasionally enjoys room in highly ranked scientific journals. An example is the hypothesis by *Pounds et al. (1999)* that a reduction in fog frequency in Central American mountain ranges might lead to dramatic increases in adult mortality of highland amphibians (tree frogs and toads). Further evidence and argumentation was later presented by *Pounds (2001)* and *Pounds et al. (2006)*. Whereas amphibians may just be one group of indicator species that quickly respond to changes in fog occurrence, cloud forests are generally found to be hotspots of biodiversity that require specific conservation efforts. Therefore, UNEP has established a Cloud Forest Agenda (*Bubb et al. 2004*) that specifically addresses the need for action in tropical cloud forest habitats (*Fig. 3*).

Fog water inputs to the ecosystem is considered a relevant component in the hydrological budget in Californian coastal forests (*Byers 1953, Azevedo and Morgan 1974*). The naturally occurring stable isotopes in water were successfully used as tracers to confirm that Redwood trees along the Californian coast can take up fog water at the leaf level and thus prevent dehydration during the dry season (*Ingraham and Matthews 1990, Ingraham and Matthews 1995, Dawson 1998, Burgess and Dawson 2004*).

In some cases it has even been documented that fog water deposition is not only relevant for single plants, but is also contributing to the hydrological budget of an area, and can contribute to the recharge of the ground water (*Ingraham and Matthews 1988, Guswa et al. 2007*).

*Eugster et al. (2006)* on the other hand found that although the contribution of fog water to the

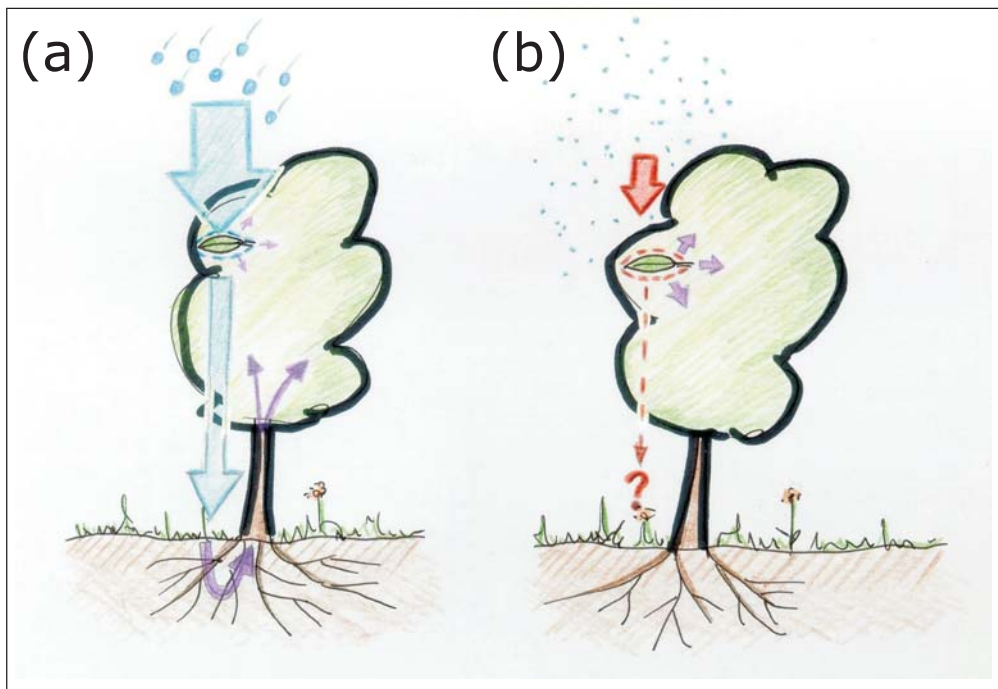
hydrological budget of an elfin cloud forest in Puerto Rico is considerable and higher than in any other location, it is still not a very large component in the budget. Thus, the relevance of fog at a given geographic locality may very much depend on the concurrent amounts of precipitation and the seasonality of the two water sources. There is no doubt that in desert areas where rain is absent during many months or perhaps several years fog must be seriously considered as a source of water in the hydrological context.

At many other locations, however, the relevance of fog is rather expected to be related to the dissolved inorganic and organic compounds in fog water that can act as either nutrients (nitrogen, sulphate, phosphate) or pollutants. *Figure 4*

illustrates the pathways how these nutrients and pollutants influence an ecosystem. Many studies show that concentrations of inorganic compounds are often much higher in fog than in rain. Thus, even minor hydrological inputs of fog water can lead to major inputs of nutrients and pollutants (e.g. *Weathers et al. 1988, Weathers et al. 2000, Thalmann et al. 2002, Burkard et al. 2003*).

## 2. Special Issue on Fog Research

Since 1998 fog and dew research scientists from all parts of the world have met every third year to exchange newest results and experiences. In 2007 *Pilar Cereceda* and her crew from the Geographical Institute of the Pontificia Universidad



*Fig. 4* Schematic showing the similarities and differences between nutrient and pollutant inputs to ecosystems by a) rainfall and b) fog deposition / *Schema zu Ähnlichkeiten und Unterschieden der Wirkungsweise von Nähr- und Schadstoffen in Ökosystemen durch a) Regeneintrag und b) Nebelneintrag*

Católica de Chile at Santiago organized the fourth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew in La Serena, Chile, from 22 to 27 July 2007. In total, 117 scientists attended the conference and contributed 31 posters and 82 oral presentations which were presented in short four-page conference proceedings papers (see *Biggs and Cereceda 2007*). The classification of these presentations in fields of interest (*Tab. 1*) provides a good overview of current topics and interests in global fog research.

From the wealth of contributions we selected a set of contributions for this special issue which either have a certain geographical focus or provide an insight into fog collection, an applied field of fog research that deals with fog as a potential resource of potable water in arid regions.

The first article by *Möller (2008)* provides the first comprehensive review of scientific devel-

opments that helped to advance our understanding of the physics and chemistry of atmospheric waters, of which fog and dew are two important components. Many historical scientific documents that *Möller* includes in his overview are originally only available in German or French, and thus the article makes a wealth of puzzling, surprising and sometimes unexpected insights into fog research available to the English readers who might otherwise not have access to such historical documents.

*García-García and Zarraluqui (2008)* present the first climatological maps of fog distribution and fog frequencies of Mexico. This article also highlights the methodical issues related to the discontinuous phenomenon of fog and provides an excellent example of the small-scale variability of fog, which is typical not only for Mexico but for most localities on earth where topography and radiation fog are strongly interrelated.

*Tab. 1* Focus areas of fog research based on the classification used for the Fourth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew in La Serena (Chile), 22-27 July 2007 / Aktuelle Schwerpunktthemen in der Nebelforschung gemäss der Klassifikation, die für die Fourth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew in La Serena (Chile), 22.-27. Juli 2007, verwendet wurde

Session	Session title	Oral presentations
1	Fog climatology and patterns	8
2	Fog monitoring and modeling	13
3	Fog forecasting	8
4	Fog water chemistry	16
5	Dew instrumentation and collection	8
6	Dew and the environment	8
7	Fog interaction with vegetation	8
8	Fog collection projects	5
9	Fog-Human interaction	4
10	Community involvement in fog collection	4

The Mexico basin example presented by *García-García and Zarraluqui* (2008) is symptomatic for many airports worldwide that are located in areas of frequent fog. Flat areas next to historically grown cities are often low-lying wetlands in topographical basins that have only recently been claimed for the development of airports, and the detrimental effects of frequent fog for air traffic were mostly not included in the site evaluation.

*Gonçalves et al.* (2008) found that fog and drizzle events in São Paulo, Brazil, have significantly decreased over the past 70 years. Their multivariate statistical analysis shows a close correlation of the decreasing frequencies with increasing South Atlantic sea surface temperatures. Although quite speculative in their interpretation the authors provide an interesting example of how urban fog that we generally would only expect to be a function of urbanization could actually also be influenced by larger-scale climate changes that affect the frequency of fog and drizzle in such metropolitan areas.

Whereas in metropolitan areas urban sprawl transforms large areas of the landscape, it is the change in agricultural activities in rural areas that influences local climate and thus fog. *Montecinos et al.* (2008) present a numerical modeling example using a restricted area mesoscale model that allows to estimate the impact of changes in irrigated agricultural lands in arid Chile on local climatic conditions and the formation of valley fog.

*Marzol and Sánchez Mégia* (2008) and *Molina and Escobar* (2008) both investigate the collection potential for fog water that can be used either for irrigation of crops or as potable water in dry areas or during the dry season. Many fog collection projects have been started at several places in the tropics and subtropics, and initial scientific investigation of potential localities and their yields is a requirement before large fog water collection screens can be set up.

The last article by *Gerold et al.* (2008) was not presented at the conference but fits thematically into the context of this special issue. It nicely shows the role of fog in shaping tropical montane cloud forests, but it also clearly shows that there is not a sharp and crisp boundary between rain forests and cloud forests, and that even in tropical montane cloud forests the rain is the dominant hydrological input.

### 3. Conclusions

Fog research has many facets of which only a few can be touched in this special issue. One of the goals of the triennial Conferences on Fog, Fog Collection and Dew has always been to bridge the gap between leading scientists working in the natural sciences and those interested in applied work on fog collection, primarily in developing countries. From the viewpoint of geography as an integrative science which aims at providing the link between natural and social science it would be strongly desirable to see more scientific work on the human dimensions and social aspects that relate to fog collection projects. During the 2007 conference in Chile several contributions (see *Biggs and Cereceda* 2007) reported on experiences gained in specific projects which show the potential for more integrative scientific studies that could extend their view well beyond the natural sciences and provide valuable contributions on questions such as: Are fog collection projects more sustainable than other development projects that address the need for potable water at such locations? What are the essential components of community involvement that make a fog collection project successful in the long term? Hopefully, some answers to these and many more open questions will be addressed during the next conference in 2010, which will be hosted by the University of Münster, Germany.

#### 4. References

- Anderson, M.G. and J.J. McDonnell (eds.) 2005: Encyclopedia of Hydrological Sciences. – Chichester et al.
- Azevedo, J. and D.L. Morgan 1974: Fog Precipitation in Coastal California Forests. – *Ecology* **55**: 1135-1141
- Bendix, J. 2002: A Satellite-Based Climatology of Fog and Low-Level Stratus in Germany and Adjacent Areas. – *Atmospheric Research* **64** (1-4): 3-18
- Biggs, A. and P. Cereceda (eds.) 2007: Proceedings of the Fourth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew, Pontificia Universidad Católica de Chile, La Serena (Chile), 22-27 July 2007. – La Serena
- Blake, J.V. 1871: The London Fog. – *American Naturalist* **5** (2): 76-79
- Bruijnzeel, L.A., W. Eugster and R. Burkard 2005: Fog as a Hydrologic Input. – In: Anderson, M.G. and J.J. McDonnell (eds.): Encyclopedia of Hydrological Sciences. – Vol. 1. – Chichester et al.: 559-582
- Bubb, P., I.A. May, L. Miles and J. Sayer 2004: Cloud Forest Agenda. – UNEP World Conservation Monitoring Centre. – Cambridge, U.K.
- Burgess, S.S.O. and T.E. Dawson 2004: The Contribution of Fog to the Water Relations of *Sequoia Sempervirens* (D. Don): Foliar Uptake and Prevention of Dehydration. – *Plant, Cell and Environment* **27** (8): 1023-1034
- Burkard, R., P. Bützberger and W. Eugster 2003: Vertical Fogwater Flux Measurements above an elevated Forest Canopy at the Lägeren Research Site, Switzerland. – *Atmospheric Environment* **37** (21): 2979-2990. – doi:10.1016/S1352-2310(03)00254-1
- Byers, H.R. 1953: Coast Redwoods and Fog Drip. – *Ecology* **34** (1): 192-193
- Cereceda, P., H. Larrain, P. Osses, M. Farías and I. Egaña 2008: The Climate of the Coast and Fog Zone in the Tarapacá Region, Atacama Desert, Chile. – *Atmospheric Research* **87** (3-4): 301-311
- Cereceda, P., H. Larrain, P. Osses, M. Farías and I. Egaña 2008: The Spatial and Temporal Variability of Fog and its Relation to Fog Oases in the Atacama Desert, Chile. – *Atmospheric Research* **87** (3-4): 312-323
- Cermak, J. and J. Bendix 2008: A Novel Approach to Fog/Low Stratus Detection Using Meteosat 8 Data. – *Atmospheric Research* **87** (3-4): 279-292
- Collett, J. L., A. Bator, D.E. Sherman, K.F. Moore, K.J. Hoag, B.B. Demoz, X. Rao and J.E. Reilly 2002: The Chemical Composition of Fogs and Intercepted Clouds in the United States. – *Atmospheric Research* **64** (1-4): 29-40
- Collett, J.L., P. Herckes, S. Youngster and T. Lee 2008: Processing of Atmospheric Organic Matter by California Radiation Fogs. – *Atmospheric Research* **87**: 232-241
- Dawson, T.E. 1998: Fog in the California Redwood Forest: Ecosystem Inputs and Use by Plants. – *Oecologia* **117** (4): 476-485
- Eugster, W., R. Burkard, F. Holwerda, F.N. Scatena and L.A.S. Bruijnzeel 2006: Characteristics of Fog and Fogwater Fluxes in a Puerto Rican Elfin Cloud Forest. – *Agricultural and Forest Meteorology* **139** (3-4): 288-306. – doi:10.1016/j.agrformet.2006.07.008
- Fuzzi, S., M.C. Facchini, S. Decesari, E. Matta and M. Mircea 2008: Soluble Organic Compounds in Fog and Cloud Droplets: What Have We Learned over the Past Few Years? – *Atmospheric Research* **64** (1): 89-98
- García-García, F. and V. Zarraluqui 2008: A Fog Climatology for Mexico. – *DIE ERDE* **139** (1-2): 45-59
- Gerold, G., M. Schawe and K. Bach 2008: Hydro-meteorologic, Pedologic and Vegetation Patterns along an Elevational Transect in the Montane Forest of the Bolivian Yungas. – *DIE ERDE* **139** (1-2): 141-168
- Gilliam, H. 1962: Weather of the San Francisco Bay Region. – Berkeley et al.
- Glickman, T.S. (ed.) 2000: Glossary of Meteorology. – 2nd edition. – Boston, MA
- Gonçalves, F.L.T., R.P. da Rocha, G.P. Fernandes and S. Petto Jr. 2008: Drizzle and Fog Analysis in the São Paulo Metropolitan Area: Changes 1933-2005 and Correlations with other Climate Factors. – *DIE ERDE* **139** (1-2): 61-76
- Guswa, A.J., A.L. Rhodes and S.E. Newell 2007: Importance of Orographic Precipitation to the Water Resources of Monteverde, Costa Rica. – *Advances in Water Resources* **30** (10): 2098-2112

- Ingraham, N.L.* and *R.A. Matthews* 1988: Fog Drip as a Source of Ground Water Recharge in Northern Kenya. – *Water Resources Research* **24**: 1406-1410
- Ingraham, N.L.* and *R.A. Matthews* 1990: A Stable Isotope Study of Fog: The Point Reyes Peninsula, California. – *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)* **80**: 281-290
- Ingraham, N.L.* and *R.A. Matthews* 1995: The Importance of Fog-Drip Water to Vegetation: Point Reyes Peninsula, California. – *Journal of Hydrology* **164** (1): 269-285
- Lange, O.L., A. Meyer, H. Zellner* and *U. Heber* 1994: Photosynthesis and Water Relations of Lichen Soil Crusts: Field Measurements in the Coastal Fog Zone of the Namib Desert. – *Functional Ecology* **8** (2): 253-264
- Marzol, M.V.* and *J.L. Sánchez Megía* 2008: Fog Water Harvesting in Ifni, Morocco. An Assessment of Potential and Demand. – *DIE ERDE* **139** (1-2): 97-119
- Molina, J.M.* and *C.M. Escobar* 2008: Fog Collection Variability in the Andean Mountain Range of Southern Colombia. – *DIE ERDE* **139** (1-2): 125-138
- Möller, D.* 2008: On the History of the Scientific Exploration of Fog, Dew, Rain and other Atmospheric Water. – *DIE ERDE* **139** (1-2): 11-44
- Montecinos, S., V. Favier, O. Astudillo, Y. Tracol, W. Börsch-Supan, I. Bischoff-Gauß* and *N. Kalthoff* 2008: The Impact of Agricultural Activities on Fog Formation in an Arid Zone of Chile. – *DIE ERDE* **139** (1-2): 77-96
- Pounds, J.A.* 2001: Climate and Amphibian Declines. – *Nature* **410**: 639-640
- Pounds, J.A., M.R. Bustamante, L.A. Coloma, J.A. Consuegra, M.P.L. Fogden, P.N. Foster, E. LaMarca, K.L. Masters, A. Merino-Viteri, R. Puschendorf, S.R. Ron, G.A. Sánchez-Azofeifa, C.J. Still* and *B.E. Young* 2006: Widespread Amphibian Extinctions from Epidemic Disease Driven by Global Warming. – *Nature* **439**: 161-167. – doi:10.1038/nature04246
- Pounds, J.A., M.P.A. Fogden* and *J.H. Campbell* 1999: Biological Response to Climate Change on a Tropical Mountain. – *Nature* **398** (6728): 611-615
- Seely, M.K.* and *W.J. Hamilton, III* 1976: Fog Catchment Sand Trenches Constructed by Tenebrionid Beetles, *Lepidochora*, from the Namib Desert. – *Science* **193** (4252): 484-486
- Thalman, E., R. Burkard, T. Wrzesinsky, W. Eugster* and *O. Klemm* 2002: Ion Fluxes from Fog and Rain to an Agricultural and a Forest Ecosystem in Europe. – *Atmospheric Research* **64**: 147-158
- Wanner, H.* and *S. Kunz* 1983: Klimatologie der Nebel- und Kaltluftkörper im Schweizerischen Alpenvorland mit Hilfe von Wettersatellitenbildern. – *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology* **33** (1-2): 31-56
- Weathers, K.C., G.E. Likens, F.H. Bormann, S.H. Bicknell, B.T. Bormann, B.C. Daube, J.S. Eaton, J.N. Galloway, W.C. Keene, K.D. Kimball, W.H. McDowell, T.G. Siccama, D. Smiley* and *R.A. Tarrant* 1988: Cloudwater Chemistry from Ten Sites in North America. – *Environmental Science and Technology* **22** (9): 1018-1026
- Weathers, K.C., G.M. Lovett, G.E. Likens* and *N.F.M. Caraco* 2000: Cloudwater Inputs of Nitrogen to Forest Ecosystems in Southern Chile: Forms, Fluxes and Sources. – *Ecosystems* **3**: 590-595

#### Summary: Fog Research

The triennial Conferences on Fog, Fog Collection and Dew provide a platform for worldwide scientific exchange among fog researchers and those interested in fog collection. The 2007 conference was held in La Serena, Chile. A selection of contributions covering geographical aspects of fog research or providing insight into fog collection projects has been included in this special issue of *DIE ERDE*. This introductory paper provides the scientific background of the topic, including the definition of fog, the types of fog, and the relevance of fog in research, which also provides an overview over the breadth of contemporary fog research. Then, the articles included in this special issue are briefly introduced and put into context. In the conclusion the author addresses the potential for extending research efforts particularly in fog collection projects to cover the human dimensions aspects of fog collection.

*Zusammenfassung: Nebelforschung*

Die alle drei Jahre stattfindenden „Conferences on Fog, Fog Collection and Dew“ bieten den weltweit tätigen Nebelforschern und den Wissenschaftlern, die sich mit dem Sammeln von Nebelwasser beschäftigen, eine gemeinsame Plattform zum Austausch ihrer wissenschaftlichen Erkenntnisse. Die letzte Konferenz fand 2007 in La Serena (Chile) statt. Eine Auswahl der Beiträge, die auf geografische Aspekte der Nebelforschung eingehen oder einen Einblick in die Forschungsarbeiten im Rahmen von Nebelwassergewinnungsprojekten bieten, wurde in dieses Sonderheft der ERDE aufgenommen. Der vorliegende Einführungsartikel befasst sich mit dem wissenschaftlichen Hintergrundwissen, das für das Verständnis der Artikel vorausgesetzt wird. Im Speziellen wird auf die Definition von Nebel eingegangen, auf die in der Wissenschaft üblicherweise verwendeten Begrifflichkeiten bei der Bezeichnung verschiedener Nebeltypen, und schließlich auf die Bedeutung des Nebels in der Forschung. Dieser letzte Abschnitt zeigt zugleich auch die Breite der aktuellen Nebelforschungsarbeiten auf. Anschließend werden die im Sonderheft aufgenommenen Artikel kurz eingeführt und in den Zusammenhang der Nebelforschung gestellt. In den Schlussfolgerungen erwähnt der Autor das Potenzial, das in einer zukünftigen Ausweitung der Forschungsarbeiten liegen würde, wenn bei Nebelwassergewinnungsprojekten auch die humangeographischen Aspekte systematisch untersucht würden.

*Résumé: La recherche sur le brouillard*

Les conférences triennales sur le brouillard, la collecte du brouillard et la rosée (« Conferences on Fog,

Fog Collection and Dew ») fournissent aux chercheurs dans le domaine du brouillard actifs dans le monde autant qu'aux scientifiques intéressés par la collection de l'eau de brouillard une plateforme commune pour l'échange de leurs résultats scientifiques. Le dernier colloque s'est tenu en 2007 à La Serena au Chili. Une sélection des contributions portant sur les aspects géographiques de la recherche sur le brouillard ou donnant un aperçu des travaux de recherche menés dans le cadre des projets de collecte de brouillard est incluse dans ce numéro spécial de DIE ERDE. Cette introduction présente la base scientifique du sujet, dont la connaissance est une condition préalable à la compréhension des articles. En particulier, la définition du brouillard est traitée ainsi que les notions utilisées pour la désignation des divers types de brouillard et, finalement, l'importance du brouillard dans la recherche. Cette dernière partie montre aussi l'ampleur de la recherche contemporaine sur le brouillard. Ensuite, les articles inclus dans ce numéro spécial sont brièvement présentés et placés dans le contexte de la recherche sur le brouillard. Dans ses conclusions, l'auteur évoque le potentiel qui consisterait à étendre de manière systématique les travaux de recherche sur les projets de collecte de l'eau de brouillard à la dimension de la géographie humaine.

PD Dr. Werner Eugster, ETH Zürich, Department of Agricultural and Food Sciences, Institute of Plant Sciences, LFW C55.2, 8092 Zürich, Switzerland, werner.eugster@ipw.agrl.ethz.ch

• *History of Science – Hydrometeors – Fog – Rain – Dew*

**Detlev Möller (Cottbus)**

## **On the History of the Scientific Exploration of Fog, Dew, Rain and Other Atmospheric Water**

*Zur Geschichte der wissenschaftlichen Erforschung von Nebel,  
Tau, Regen und anderem Atmosphärenwasser*

With 5 Figures and 3 Tables

Atmospheric water, today classified as hydrometeors (fog, cloud, precipitation) and depositions (dew, frost etc.), has fascinated people since ancient times as 'heavenly' phenomena that were early recognised to be part of the water cycle. However, these phenomena were not described in detail before a first understanding of fundamental atmospheric physics and of the basic chemical composition of the air had been acquired. This contribution will start with a short introduction of the ancient philosophic view of the atmosphere and then proceed to several early modern approaches to understand water evaporation and droplet formation and to a first scientific description of the phenomena of dew, cloud and rain. Here, for the first time in modern scientific literature, the early approaches to chemical-meteoric water analysis are presented.

*Summary: On the History of the Scientific Exploration of Fog, Dew, Rain and Other Atmospheric Water*

In this paper the milestones in exploring clouds, fog, rain and dew in physics and chemistry from Antiquity until the end of the 20<sup>th</sup> century have been described. While a good description of the phenomenology had been available since *Aristotle*, the actual processes were not understood before the 19<sup>th</sup> century. The key in understanding the transformation of water through its different states (solid,

liquid and gaseous) was the comprehension of the role of the heat exchange during evaporation and condensation. This understanding grew parallel to the understanding of the combustion process as a chemical reaction using atmospheric oxygen. This happened between 1770 and 1790, with *Deluc* providing the best comprehensive description in 1787. Together with the understanding of the heat exchange associated with phase transformation, the role of radiation (direct solar versus terrestrial) was considered, too. Dew formation was first described correctly by *Wells* (1814). However, microphysical

cloud droplet reflection was only explained a hundred years later with the finding that water may condense in the atmosphere only on condensation particles (*Aitken*), and with *Aßmann* closing the long debate of droplets versus vesicles. Cloud dynamic processes and rain formation, however, were not generally understood before the 1920s; measurement platforms (balloons and aircrafts) become a precondition in improving (and validating) cloud and rain theories based on mathematical descriptions. Cloud physics as a subdiscipline did not start before 1960. At the beginning, the driving force for a better physical description of the phenomena of atmospheric waters was pure philosophic interest to understand nature; later, practical purposes became more important with meteorological monitoring for weather forecasting and climatology. Chemistry of atmospheric waters started in the Middle Ages with the alchemistic attempt to transmute water coming from the atmosphere (“heaven”). On the other hand, already at that time (in the mid-17<sup>th</sup> century), fog and rain (and likely dew) were considered to be polluted in towns but also regarded as cleansing agents. The first semi-quantitative chemical analysis of rain and snow was conducted by *Marggraf* in Berlin around 1750, with the purpose to consider the hygienic quality of potential drinking-water. More detailed rain water analyses were performed at the beginning of the 19<sup>th</sup> century for the same reasons and in combination with the application of newly developed methods in analytical chemistry. *Liebig's* theory of plant nutrition from air promoted a rapidly increasing number of chemical studies of rain and fog. Since then, agricultural interests form an important base for rain water chemistry monitoring. Air pollution in urban areas but also forest damages (in Germany) stimulated several studies at the end of the 19<sup>th</sup> century. Deposition studies (bulk sampling) due to the smoke problem started after 1910. The aim to understand matter cycles, first between local and regional scales, initiated precipitation chemistry in the 1930s which led to systematic research since the 1950s.

*Zusammenfassung: Zur Geschichte der wissenschaftlichen Erforschung von Nebel, Tau, Regen und anderem Atmosphärenwasser*

Dieser Artikel beschreibt die wichtigsten Etappen in der Erkundung von Wolken, Nebel, Regen und Tau von der Antike bis zum Ende des 20. Jahrhundert. Während die Phänomenologie des Atmosphärenwassers bereits seit Aristoteles gut beschrieben wurde, verstand man die Prozesse erst im 19. Jahrhundert. Das Verständnis über die Phasenumwandlung des Wassers (in seiner flüssigen, gasförmigen und festen Form) wurde erst möglich, nachdem die Rolle des Wärmeaustauschs während des Verdampfens und Kondensierens klar wurde. Zwischen 1770 und 1790, als *Deluc* im Jahr 1787 die bis dahin klarste Theorie vorstellte, wuchs dieses Verständnis zeitgleich mit dem Verstehen des Verbrennungsprozesses als chemischer Reaktion unter Bindung von Luftsauerstoff. Zugleich wurde mit dem Verständnis des Wärmeaustausches im Zusammenhang mit dem Phasenübergang auch die solare Strahlung (sowohl die direkte als auch die terrestrische) betrachtet. Die Taubildung wurde erstmals 1814 durch *Wells* korrekt beschrieben. Eine mikrophysikalische Beschreibung der Wolkentropfen wurde jedoch erst 100 Jahre später möglich, nach der Erkenntnis, dass Wasser in der Atmosphäre nur an Kondensationskernen (*Aitken*) kondensieren kann. Auch wurde die lang anhaltende Diskussion, ob es sich um Tropfen oder Bläschen handelt, durch *Aßmann* beendet. Die dynamischen Prozesse in Wolken und die Regenbildung wurden jedoch prinzipiell erst in den 1920er Jahren verstanden, wobei Messplattformen (Ballons und Flugzeuge) eine Voraussetzung für die Verbesserung (und Verifizierung) von auf mathematischen Modellen basierenden Wolken- und Regentheorien bildeten. Die Wolkenphysik als eine Teildisziplin entwickelte sich aber nicht vor 1960. Die treibende Kraft zu einer besseren physikalischen Beschreibung des Atmosphärenwassers war zunächst reines philosophisches Interesse am Verständnis der Natur. Erst mit den beginnenden meteorologischen Aufzeichnungen für Wettervorhersage und Klimatologie nahmen praktische Erwägungen an Bedeutung zu. Die Chemie des Atmosphärenwassers begann im Mittelalter mit alchemistischen Versuchen der Transmutation (Umwandlung) von Wasser, welches aus der Atmosphäre („dem Him-

mel“) stammte. Andererseits hatte man bereits in dieser Zeit (der Mitte des 17. Jahrhunderts) Nebel und Regen (und wahrscheinlich auch Tau) sowohl als verschmutzt als auch als reinigende Agenzien in Städten beschrieben. Eine erste halbquantitative chemische Analyse von Regen und Schnee wurde durch *Marggraf* um 1750 in Berlin durchgeführt, mit dem Ziel einer hygienischen Bewertung als Quelle für Trinkwasser. Mit Beginn des 19. Jahrhunderts wurden genauere und umfangreichere Regenwasseranalysen, aus hygienischen Gründen aber auch der Anwendung der sich entwickelnden neuen analytischen Methoden, durchgeführt. *Liebig's* Theorie der Pflanzendüngung aus der Luft führte zu einer zunehmenden Anzahl chemischer Untersuchungen von Regen und Nebel. Das landwirtschaftliche Interesse blieb seit dieser Zeit eine wichtige Grundlage für niederschlagschemische Messreihen. Die Luftverschmutzung in Städten, aber auch Waldschäden in Deutschland initiierten zahlreiche Untersuchungen zum Ende des 19. Jahrhunderts. Wegen der Rauchfrage begannen nach 1910 Depositionsuntersuchungen (*bulk*-Probenahme). Mit dem Ziel, Stoffkreisläufe zuerst zwischen lokaler und regionaler Ebene zu verstehen, wurde die Niederschlagschemie in den 1930er Jahren etabliert, was in den 1950er Jahren zu systematischer Forschung führte.

*Résumé: Sur l'histoire de la recherche scientifique du brouillard, de la rosée, de la pluie et des autres eaux atmosphériques*

Le présent article décrit les étapes les plus importantes dans l'exploration de nuages, brouillard, pluie et rosée de l'Antiquité jusqu'au XXe siècle. Alors que la phénoménologie de l'eau atmosphérique était déjà bien décrite à l'Antiquité, les processus n'ont été compris qu'au XIXe siècle. La compréhension du changement de phases de l'eau (dans son état liquide, gazeux et solide) n'était pas possible avant que le rôle du transfert de chaleur pendant l'évaporation et la condensation soit devenu clair. Cette compréhension augmentait dans la période de 1770 à 1790 lors que l'on comprenait de plus en plus le processus de la combustion en tant que réaction chimique sous utilisation d'oxygène, quand, en 1787, *Deluc* en a présenté la théorie la plus claire. En même temps, lors de la combinaison du transfert de chaleur et le changement de phase, on avait également pris en considération le rayonnement solaire (direct et terrestre). La première description correcte sur la formation de rosée, par *Wells*, date de l'année 1814. Cependant, la description microphysique des gout-

tes de nuages n'a été réalisée que 100 ans plus tard, après que l'on avait découvert que l'eau dans l'atmosphère ne peut condenser qu'avec des noyaux de condensation (*Aitken*). C'était *Abmann* qui terminait finalement la longue discussion sur s'il s'agit de gouttes ou de vésicules. Pourtant, les processus dynamiques dans les nuages et la formation de la pluie n'ont été compris que dans les années 1920. Avec ça, les plateformes de mesure (des ballons et des avions) sont devenues indispensables pour l'amélioration (et la vérification) des théories de nuages et de pluie basées sur des modèles mathématiques. Or, la physique des nuages en tant que discipline ne se développait pas avant 1960. Au début, la force vive d'une meilleure description des eaux atmosphériques était l'intérêt purement philosophique à comprendre la nature, les aspects pratiques n'ont gagné de l'importance qu'avec les enregistrements météorologiques pour les prévisions du temps et la climatologie. La chimie des eaux atmosphériques est née au Moyen Age avec des essais alchimiques de la transmutation (transformation) d'eau de l'atmosphère (« du ciel »). De l'autre côté, à cette époque-là (au milieu du XVIIe siècle) on avait déjà décrit le brouillard et la pluie (et, probablement, également la rosée) comme agent à la fois sale et purifiant dans les villes. Une première analyse chimique semi-quantitative de pluie et de neige a été réalisée par *Marggraf* en 1750 à Berlin et avait comme but l'évaluation hygiénique de l'eau potable. Des analyses plus importantes et plus précises de l'eau pluviale ont été réalisées dès le début du XIXe siècle, non seulement pour des raisons hygiéniques, mais aussi pour l'application des nouvelles méthodes analytiques en voie de développement. La théorie de *Liebig* sur la nutrition de plantes par l'air a engendré un nombre croissant d'analyses chimiques de la pluie et du brouillard. L'intérêt agricole est désormais une des bases les plus importantes pour des séries de mesure en chimie de précipitation. La pollution de l'air dans les villes ainsi que le dépérissement des forêts en Allemagne ont entraîné de nombreuses recherches vers la fin du XIXe siècle. À cause du problème de la fumée, on a commencé des recherches de déposition (*bulk sampling*) après l'année 1910. Dans le but de comprendre les circuits de matière, d'abord entre l'échelle locale et régionale, la chimie des précipitations s'est établie dans les années 1930 et est systématiquement analysée depuis 1950.

*Prof. Dr. Detlev Möller, Atmospheric Chemistry and Air Pollution Control, Faculty of Environmental Sciences and Process Engineering, Brandenburg Technical University, P.O. Box 10 13 44, 03013 Cottbus, moe@btu-lc.fta-berlin.de*

• Fog – Data interpolation – Regional climatology – Mexico

**Fernando García-García and Víctor Zarraluqui (Mexico City)**

## **A Fog Climatology for Mexico**

*Eine Nebelklimatologie für Mexiko*

With 8 Figures

Fog can be defined as a cloud in the vicinity of the earth's surface that affects visibility. It differs from a cloud only in that the base of fog is at the surface of the earth while clouds are further above. Fog plays an important role in the hydrological cycle, mainly in the transport of water from the atmosphere to the earth's surface through wet deposition and interception by trees and vegetation. It is considered also a natural hazard that causes low visibility (according to the international, meteorological definition, fog reduces visibility at the ground below 1 km) and is a particular danger for all varieties of air, land and water transportation. On the other hand, fog can be also considered a potential non-conventional source of water supply when removed by artificial methods for human consumption. Fogs of all types originate when the temperature and the dewpoint of the air coincide. This may occur through cooling of the air to a little beyond its dewpoint, as a result of advection, radiation or upslope movement of the air; or by adding moisture and thereby elevating the dewpoint, thus producing so-called frontal fogs. These synoptic and mesoscale mechanisms are modified by local terrain features, such as topography, land and vegetation cover and, in turn, small-scale circulation. Thus, varied climatic regimes result in different distribution patterns of fog occurrence and development. In spite of its importance, the impacts of fog formation, development and distribution have not yet been properly assessed throughout the world. In particular, in Mexico there are very few specific studies on the topic and there are none of national character known to these authors.

*Summary: A Fog Climatology for Mexico*

The results of a fog climatology developed for Mexico are presented. The study is based on standard average monthly fog days calculated

from daily observations acquired over the thirty-year period from 1961 to 1990, at the 3,300 climatological stations of the Mexican National Meteorological Service network. After applying corroboration checks and adjust-

ments to the data, different interpolation schemes and their performance were tested and evaluated in order to produce fog-occurrence maps on various spatial (national, regional) and temporal (yearly, seasonal, monthly) scales, using the commercial contouring and surface mapping program *Surfer*. For the data interpolation, it was found that the method of radial basis function with an inverse multiquadric kernel rendered the best statistical results. These indicate that average values of fog occurrences, of more than 50 and up to 280 fog days per year, are found more frequently in the country's main orographic systems. It is also found that the maximum seasonal frequency of fog days in the country occurs during summer, thus coinciding with the peak of the rainy season. These results are also analysed in view of the synoptical and mesoscale characteristics that prevail in Mexico during the dry and rainy seasons and then used to classify major regions of fog incidence in terms of their main meteorological and physical formation and development mechanisms. Finally, two regional case studies are presented with the aim to illustrate the influence that mesoscale and local terrain features, such as topography and vegetation and land cover, have on the formation and development of fog. This study represents the first attempt towards a comprehensive and detailed fog climatology for Mexico. It is concluded that fog incidence over the Mexican territory shows high variability at both spatial and temporal scales, showing the difficulties that this implies for its proper and accurate handling, graphic representation and analysis.

*Zusammenfassung: Eine Nebelklimatologie für Mexiko*

Dieser Artikel beschreibt die Ergebnisse einer Studie zur Nebel-Klimatologie Mexikos. Die Studie basiert auf der Anzahl der durchschnittlichen monatlichen Nebeltage, die berechnet wurde aus Daten von täglichen Erhebungen an 3.300 Klimastationen des mexikanischen Wetterdienstes, welche über eine 30-jährige Periode, von 1961 bis 1990,

durchgeführt wurden. Nach Plausibilitätsprüfungen und Anpassungen der Daten wurden verschiedene Interpolationsverfahren und deren Ergebnisse getestet und ausgewertet, um Karten zu Nebel-Häufigkeiten auf verschiedenen räumlichen (national, regional) und zeitlichen (jährlich, saisonal, monatlich) Ebenen zu erstellen. Hierzu wurde das kommerzielle Konturierungs- und Kartenoberflächenprogramm *Surfer* verwendet. Für die Interpolation wurde festgestellt, dass das Verfahren der radialen Basisfunktion mit einem inversen multiquadratischen Kern die besten statistischen Ergebnisse lieferte. Diese zeigen, dass die Durchschnittswerte hinsichtlich des Auftretens von Nebel mit mehr als 50 bis zu 280 Nebeltagen im Jahr häufiger in den wesentlichen Gebirgszügen des Landes liegen. Ebenfalls fand man heraus, dass die maximale saisonale Häufigkeit von Nebeltagen im Land während des Sommers auftritt und somit identisch mit dem Höchststand der Regenzeit ist. Diese Ergebnisse wurden außerdem mit Blick auf die synoptischen und mesoskalen Merkmale analysiert, die in Mexiko während der Trocken- und Regenzeit vorherrschen, um die Hauptgebiete von Nebelvorkommen bezüglich ihrer vorherrschenden meteorologischen und physikalischen Konstellation sowie ihrer Entstehungsmechanismen zu typisieren. Schließlich werden zwei regionale Fallstudien präsentiert mit dem Ziel, den Einfluss der mesoskalaren und lokalen Besonderheiten des Raumes – wie Relief, Vegetation und Bodenbedeckung – auf die Bildung und Weiterentwicklung von Nebel deutlich zu machen. Die Studie stellt den ersten Versuch einer umfassenden und detaillierten Nebel-Klimatologie für Mexiko dar. Sie macht deutlich, dass das Auftreten von Nebel über Mexiko sowohl auf räumlicher wie auch auf zeitlicher Ebene eine hohe Variabilität aufweist. Ebenso zeigt sie die Schwierigkeit, diese Daten sachgerecht und genau aufzubereiten, graphisch darzustellen und zu analysieren.

*Résumé: Une climatologie du brouillard pour le Mexique*

Les résultats d'une climatologie du brouillard développée pour le Mexique sont présentés. L'étude est basée sur le nombre mensuel moyen des jours de

brouillard calculé à partir des observations quotidiennes acquises au cours des trente années de 1961 à 1990 sur 3300 stations climatologiques du réseau du Service Météorologique National du Mexique. Après l'application des contrôles de corroboration et des ajustements des données, les différents régimes d'interpolation et leurs performances ont été testés et évalués afin de produire des cartes de l'apparition du brouillard sur diverses échelles géographiques (nationale, régionale) et temporelles (annuelle, saisonnière, mensuelle), en utilisant «*Surfer*», le logiciel commercial de contouring et de cartographie de surface. Pour l'interpolation des données, il a été constaté que la méthode de la fonction d'une base radiale avec un noyau inverse à élévation multiple au carré rend les meilleurs résultats statistiques. Ceux-ci indiquent que ces valeurs moyennes des événements de brouillard, allant de plus de 50 jusqu'à 280 jours de brouillard par an, se retrouvent plus fréquemment dans les principaux systèmes orographiques du pays. Il est également constaté que la fréquence saisonnière maximale de jours de brouillard dans le pays se produit au cours de l'été, ce qui coïncide avec le maximum de la saison des pluies. Ces résultats sont également analysés en vue des caractéristiques synoptiques et à échelle moyenne qui règnent au Mexique pendant la saison sèche et la saison des pluies, et qui sont ensuite utilisés pour classer des grandes régions d'apparition de brouillard en termes de leurs mécanismes principaux de formation et de développement météorologiques et physiques. Enfin, deux études de cas régionales sont présentées dans le but d'illustrer l'influence que les traits du relief, à échelle moyenne et au niveau local, telles que la topographie, la végétation et la couverture de terre, exercent sur la formation et le développement de brouillard. Cette étude représente la première tentative d'établir un inventaire exhaustif et détaillé de la climatologie du brouillard pour le Mexique. Il est conclu que l'apparition de brouillard sur le territoire mexicain montre une variabilité élevée aux échelles spatiale ainsi que temporelle, démontrant les difficultés que cela implique pour son traitement approprié et soigneux au niveau d'une représentation graphique et de l'analyse.

*Resumen: Una climatología de niebla para México*

Se presentan los resultados de una climatología de niebla elaborada para México. El estudio se basó en normales climatológicas mensuales de días con niebla, calculadas de observaciones diarias realizadas durante el período de treinta años 1961-1990 en las 3,300 estaciones climatológicas pertenecientes a la red del Servicio Meteorológico Nacional. Luego de aplicar varias pruebas de corroboración y ajustes a los datos, se probó y evaluó el desempeño de diferentes esquemas de interpolación de datos para así producir mapas climatológicos de ocurrencia de niebla, tanto en escala espacial (nacional, regional) como temporal (anual, estacional, mensual), mediante la utilización del programa comercial *Surfer*. Se encontró que el método de función radial con *kernel* multicuadrado da los mejores resultados para la interpolación de los datos. Estos resultados se utilizaron para clasificar las principales regiones de incidencia de niebla en términos de los principales mecanismos meteorológicos y físicos para su formación y desarrollo. Estos resultados muestran que los valores promedio más grandes de ocurrencia de niebla, de entre 50 y hasta 280 días con niebla al año, se dan en los principales sistemas montañosos del país. También se observa que la máxima frecuencia de días con niebla en el ámbito nacional ocurre en el verano, coincidiendo con la temporada de lluvias. Los resultados también se analizaron en términos de las características de la circulación, tanto sinóptica como de mesoescala, prevaeciente en México durante las temporadas de secas y lluvias, para así clasificar las regiones de niebla identificadas con respecto a los principales mecanismos físicos y meteorológicos de formación de niebla. Finalmente, se presentan dos casos de estudio a nivel regional con el fin de ilustrar la influencia que la circulación de mesoescala y las características locales del terreno, tales como la topografía y la cubierta de vegetación y el suelo, tienen en la formación y el desarrollo de la niebla. El estudio representa un primer esfuerzo de obtener una climatología detallada y completa de niebla para México. Se concluye que existe una gran variabilidad en la incidencia del fenómeno sobre el territorio mexicano, tanto en escala espacial como temporal, y se muestran las dificultades que esta variabilidad acarrea para su adecuado manejo, representación gráfica y análisis.

*Dr. Fernando García-García, Víctor Zarraluqui,*  
Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad  
Nacional Autónoma de México, Circuito de la Inves-  
tigación Científica, Ciudad Universitaria, 04510  
México, D.F., México, ffgg@atmosfera.unam.mx,  
vzs1@atmosfera.unam.mx

• Fog – Drizzle – Urban climatology – Megacity – São Paulo

**Fábio Luiz Teixeira Gonçalves, Rosmeri Porfirio da Rocha,  
Gilca Palma Fernandes and Sérgio Petto Jr. (São Paulo)**

## **Drizzle and Fog Analysis in the São Paulo Metropolitan Area: Changes 1933-2005 and Correlations with other Climate Factors**

*Sprühregen und Nebel in der Agglomeration São Paulo: Veränderungen  
zwischen 1933 und 2005 und Korrelationen mit anderen Klimafaktoren*

With 5 Figures and 3 Tables

In order to improve our understanding of climate change, the aim of this research project was to study the climatology and the time trends of drizzle and fog events in the São Paulo Metropolitan Area, and the possible connections of this variability with the sea surface temperature (SST) of the Atlantic and Pacific Oceans. The climatology of both phenomena presents differences and similarities. Fog shows a marked maximum frequency in winter and a minimum frequency in summer, while the seasonal differences of drizzle occurrence are less pronounced, there is a maximum in spring, whereas the other seasons present smaller and similar numbers of events. Both phenomena present a negative trend from 1933 to 2005 which is stronger for fog events. A multivariate statistical analysis indicates that the South Atlantic SST could increase warm temperature advection to the continent. This could be one of the responsible factors for the negative tendency in the number of both fog and drizzle events.

*Summary: Drizzle and Fog Analysis in the São Paulo Metropolitan Area: Changes 1933-2005 and Correlations with other Climate Factors*

In order to improve our understanding of climate change, the aim of this research project was to study the climatology and the time trends of drizzle and fog events at São Paulo Metropolitan Area (MRSP), and the possible connections of this variability with the sea surface temperature (SST) of the Atlantic and Pacific Oceans. Time series analysis and mul-

tivariate analysis, using factor analysis, were performed. Fog and drizzle climatologies and their trends in MRSP present differences and similarities. Fog has a remarkable maximum frequency in winter-time, about 36 % of the annual events, and a minimum in summer, about 14 % of the annual events. The seasonal variation of drizzle events is less pronounced, i.e., there is a maximum in spring (31 % of annual events) with other seasons comprising each about 21-24 % of total annual events. These differences are associated to the formation mecha-

nisms for both phenomena. In the MRSP, fog events are mainly observed during the night and in the morning, which indicates a nighttime radiative cooling mechanism. On the other hand, drizzle events are associated to cold front arrivals, crossing the south-east of Brazil during the whole year. The time series analysis results indicate that there is a generally decreasing trend in fog and drizzle events in the MRSP. Moreover, it is also clear that the number of fog events per year shows a stronger decrease, by about 1 day per year, than the number of days with drizzle, which only decreases by about 0.2 days per year. From the 1930s to the 1990s, both phenomena present quite similar time tendencies, which end when the years of the early 21<sup>st</sup> century are included. For fog, the driest period presents the highest decrease, and the wettest period presents the smallest decrease. Multivariate analysis results show that the South Atlantic SST plays an important role for the negative trend in the number of fog and drizzle events. On the other hand, continuing urbanisation in the MRSP area, which may be associated to the warmer mean air temperature, seems relevant for the fog and drizzle reductions, too. These results have shown an overall understanding of fog and drizzle climatology, with similarities and differences. But beyond this, additional research concerning mainly the differences, e.g. through numerical modeling, seems necessary.

*Zusammenfassung: Sprühregen und Nebel in der Agglomeration São Paulo: Veränderungen zwischen 1933 und 2005 und Korrelationen mit anderen Klimafaktoren*

Um das Verständnis des Klimawandels zu verbessern, war es das Ziel dieser Studie, die Klimatologie und den Zeitverlauf von Sprühregen- und Nebelvorkommen in der Agglomeration São Paulo zu untersuchen ebenso wie mögliche Verknüpfungen dieser Variabilität mit der Meeresoberflächentemperatur (SST) des Atlantischen und des Pazifischen Ozeans. Dazu wurde eine Zeitreihenanalyse sowie eine multivariate Analyse (Faktorenanalyse) durchgeführt. Die Klimatologie von Nebel und Sprühregen und ihre Dynamik in der Agglomeration São Paulo zeigen dabei markante Unterschiede wie auch Ähnlichkei-

ten. Nebel hat eine auffallend hohe maximale Häufigkeit im Winter mit rund 36 % der gesamten jährlichen Nebelvorkommen, sowie ein Minimum im Sommer mit 14 % der jährlichen Nebeltage. Die saisonale Schwankung von Sprühregen ist weniger deutlich ausgeprägt: Es gibt es ein Maximum im Frühjahr (31 % aller jährlichen Vorkommen), wobei andere Jahreszeiten mit jeweils 21-24 % zum jährlichen Auftreten von Sprühregen beitragen. Diese Unterschiede hängen mit den Prozessen des Zustandekommens beider Phänomene – Nebel und Sprühregen – zusammen. In der Agglomeration São Paulo treten Nebelereignisse vorwiegend während der Nacht und am Morgen auf, was auf nächtliche strahlungsbedingte Auskühlung hindeutet. Dagegen sind Sprühregenereignisse mit dem Eintreffen von Kaltfronten verbunden, die ganzjährig den Südosten Brasiliens überqueren. Die Ergebnisse der Zeitreihenanalyse zeigen einen generell abnehmenden Trend bei den Nebel- und Sprühregenereignissen in der Agglomeration São Paulo. Darüber hinaus wird deutlich, dass die jährliche Zahl der Nebeltage eine stärkere Abnahme (um durchschnittlich einen Tag pro Jahr) aufweist als die Zahl der Sprühregentage, die sich lediglich um 0,2 Tage pro Jahr verringert. Im Zeitraum von den 1930er Jahren bis in die 1990er Jahre zeigen beide Phänomene eine sehr ähnliche Tendenz; die Ähnlichkeiten enden jedoch, wenn die ersten Jahre des 21. Jahrhunderts mit einbezogen werden. Beim Nebel weisen die trockensten Perioden die größte Abnahme auf und die feuchten Perioden dementsprechend den geringsten Rückgang. Die Ergebnisse der multivariaten Analyse zeigen, dass die Oberflächentemperatur des Südatlantiks eine wichtige Rolle für den negativen Trend bei der Zahl der Nebel- und Sprühregentage spielt. Auf der anderen Seite scheint jedoch auch die anhaltende Urbanisierung in der Agglomeration São Paulo, die mit einer generell wärmeren Lufttemperatur in Verbindung gebracht werden kann, relevant für die Abnahme der Anzahl von Nebel- und Sprühregentagen zu sein. Die Ergebnisse zeigen, dass ein grundlegendes Verständnis der Nebel- und Sprühregen-Klimatologie – mit Ähnlichkeiten und Unterschieden – vorliegt. Darüber hinaus bedarf es jedoch zusätzlicher Untersuchungen, z.B. durch numerische Modellierung, insbesondere bezüglich der Unterschiede bei den beiden Phänomenen.

*Résumé: La bruine et le brouillard dans la zone métropolitaine de São Paulo : changements 1933-2005 et corrélations avec des autres facteurs du climat*

Le but de ce projet de recherche était d'étudier la climatologie et les tendances temporelles des événements de bruine et de brouillard dans la zone métropolitaine de São Paulo (RMSP), et les relations possibles de cette variabilité avec la température de surface de mer des océans atlantique et pacifique, de façon à améliorer notre compréhension des changements climatiques. Une analyse de séries temporelles et une analyse à plusieurs variables, utilisant une *factor analysis*, ont été effectuées. Les climatologies du brouillard et de la bruine dans la Région Métropolitaine de São Paulo présentent des différences et des similarités. Le maximum de fréquence pour le brouillard se situe de façon marquée en hiver, avec environ 36 % des événements annuels, et le minimum en été, avec 14 % des événements annuels. La variation saisonnière des événements de bruine est moins prononcée, il y a un maximum au printemps (31 % des événements annuels), alors que les autres saisons totalisent chacune entre 21 et 24 % du total des événements. Ces différences sont dues aux mécanismes de formation des deux phénomènes. Dans la RMSP, les brouillards sont surtout observés pendant la nuit et le matin, ce qui traduit un mécanisme de refroidissement par déficit radiatif nocturne. D'un autre côté, les événements de bruine sont associés aux passages de fronts froids, traversant le sud-est du Brésil tout au long de l'année. Les résultats des analyses de séries temporelles indiquent qu'il y a une tendance générale à la diminution des événements de brouillard et de bruine dans la RMSP. De plus, il est aussi clair que le nombre d'événements de brouillard décroît plus fortement,

d'environ 1 jour par an, que le nombre de jours avec bruine, qui décroît seulement d'environ 0.2 jour par an. Des années 30 aux années 90, les deux phénomènes présentent une tendance temporelle assez semblable, mais qui diminue lorsque les premières années du 21<sup>e</sup> siècle sont prises en compte. Pour le brouillard, la période la plus sèche présente la plus forte décroissance et la période la plus humide la plus faible décroissance. Les résultats de l'analyse statistique à plusieurs variables montrent que la température de surface de mer de l'Atlantique sud joue un rôle important dans la tendance négative pour les événements de brouillard et de bruine. D'un autre côté, le phénomène d'urbanisation dans la RMSP, qui peut être associé à une température moyenne de l'air plus élevée, a aussi une influence considérable sur la diminution du brouillard et de la bruine. Ces résultats ont permis une compréhension globale de la climatologie du brouillard et de la bruine, avec des similarités et des différences. En outre, des recherches supplémentaires se révèlent nécessaires concernant principalement les différences, par exemple au moyen de la modélisation numérique.

*Prof. Dr. Fábio Luiz Teixeira Gonçalves, Prof. Dr. Rosmeri Porfírio da Rocha, Sérgio Petto Jr., Departamento de Ciências Atmosféricas, Instituto de Astronomia, Geofísicas Atmosféricas da Universidade de São Paulo, Rua do Matão 1226, Cidade Universitária, 05508090, São Paulo, Brazil, fgoncalv@model.iag.usp.br, rosmerir@model.iag.usp.br*

*Gilca Palma Fernandes, Climatempo, Vila Mariana, Rua José Antonio Coelho 567, 04011061 São Paulo, Brazil*

• *Arid Zone – Fog formation – Agricultural activities*

**Sonia Montecinos, Vincent Favier, Orlando Astudillo, Yann Tracol (La Serena), Wolfgang Börsch-Supan (Mainz), Inge Bischoff-Gauß and Norbert Kalthoff (Karlsruhe)**

## **The Impact of Agricultural Activities on Fog Formation in an Arid Zone of Chile**

*Der Einfluss landwirtschaftlicher Nutzung auf die Nebelbildung  
in einem ariden Gebiet in Chile*

With 8 Figures

It is known that changes in land use can induce important changes in local and global meteorological conditions, especially in arid zones. In this article we perform model studies to determine the impact of irrigated agricultural activities on the local meteorological variables in the arid Elqui Valley in Chile. To this end, different case studies are analysed, for a late spring day (November) and a late summer day (March) with and without cultivated valley floor. Comparisons between these simulations allow us to determine where fog may form due to agricultural activities.

*Summary: The Impact of Agricultural Activities on Fog Formation in an Arid Zone of Chile*

The aim of this article is to investigate the impact of irrigated areas on the local and regional climate in a valley in Chile's dry zone, using the KAMM model for a late spring and a late summer situation. For both situations, two different simulations are performed, featuring the actual state of the region, i.e. the valley floor used for agricultural activities with irrigation (Moist Valley Simulation MVS), and the original natural state of the region, i.e. the valley floor covered with natural vegetation (Dry Valley Simulation DVS). Agricultural activities modify the energy balance components: near-surface temperature and the thermally induced wind fields – not

only in the valley, but also in some surrounding areas. With increased soil moisture and vegetation cover of the valley floor the albedo decreases and, consequently, net radiation is higher in the MVS case. An important part of the available energy is used for evaporation, and during the day the turbulent latent heat flux is higher in the MVS case; less energy is available for transformation into sensible heat flux. In the MVS case, the amplitude of the diurnal cycle of near-surface temperature on the valley floor is smaller. In the early morning, the temperature is higher while after noon it is lower in the MVS case. Outside the valley, there are zones with highly positive differences (around 2°C) which coincide with zones of positive anomalies of turbulent sensible heat flux. Near the coast, in the early

morning, the intensity of the sea wind is higher while, after noon, it is lower in the MVS case. Agricultural activities enhance up-slope and up-valley winds in the daytime. With increased water availability in the soil of the valley, near-surface specific humidity is higher, too. Due to advective processes this also affects neighbouring areas. In the early morning and in the late afternoon the relative humidity in the cultivated areas reaches near-saturation values which may in fact induce fog formation at these times of the day. Nevertheless, we have to note that fog is not simulated explicitly in KAMM. Only threshold values for relative humidity have been used to indicate areas where fog formation is likely after changes in land use. In order to model fog formation more adequately, in addition to the dynamic and vegetation models, especially cloud and aerosol microphysics as well as radiation have to be considered. Efficient parameterisation schemes for radiation and cloud physics should be implemented in KAMM to represent fog conditions and their geographical distribution in more detail.

*Zusammenfassung: Der Einfluss landwirtschaftlicher Nutzung auf die Nebelbildung in einem ariden Gebiet in Chile*

Ziel dieses Artikels ist es, den Einfluss von kultivierten Bewässerungsflächen auf das lokale und regionale Klima in einem Tal im ariden Raum Chiles zu untersuchen, für das späte Frühjahr sowie den Spätsommer. Hierzu wird das KAMM-Modell angewendet. Für beide Jahreszeiten werden jeweils zwei verschiedene Simulationen erstellt, eine zu den aktuellen Gegebenheiten der Region, d. h. mit landwirtschaftlicher Nutzung des Talbodens durch Bewässerung („Feuchttalsimulation – MVS“), die andere zur ursprünglichen natürlichen Situation der Region, d. h. mit natürlicher Vegetation des Talbodens („Trockentalsimulation – DVS“). Die Landwirtschaft verändert die Energiebilanz-Komponenten: die oberflächennahen Temperaturen und die wärmebedingten Windfelder – nicht nur im Tal, sondern auch in einigen umliegenden Gebieten. Bei erhöhter Bodenfeuchte und Vegetationsbedeckung im Tal verringert sich der Albedoeffekt, weswegen die

Nettoeinstrahlung bei der MVS höher ist als bei der DVS. Ein wesentlicher Teil der zur Verfügung stehenden Energie wird für die Verdunstung benötigt. Tagsüber ist der turbulente latente Wärmestrom bei der MVS höher, da weniger Energie für die Umwandlung in sensiblen Wärmestrom verfügbar ist. Im Fall der Feuchttalsimulation (MVS) ist die Tagesamplitude der bodennahen Temperatur geringer: Am frühen Morgen ist die Temperatur höher, während sie nachmittags niedriger ist. Außerhalb des Tales gibt es Bereiche mit stark positiven Unterschieden (von ungefähr 2°C), die mit Bereichen einer positiven Anomalie des turbulenten sensiblen Wärmestroms übereinstimmen. In Küstennähe ist die Intensität des Seewinds bei der Feuchttalsimulation am frühen Morgen höher, während sie nachmittags geringer ist. Tagsüber verstärkt die landwirtschaftliche Nutzung den hangaufwärts bzw. talaufwärts wehenden Wind. Durch die höhere Wasserverfügbarkeit des Bodens ist die bodennahe Luftfeuchtigkeit ebenfalls höher. Aufgrund von advektiven Prozessen beeinflusst dies auch die Nachbarbereiche. Am frühen Morgen sowie am späten Nachmittag erreicht die relative Luftfeuchtigkeit über den Agrarflächen nahezu Sättigungswerte, was in der Tat zu Nebelbildung zu diesen Tageszeiten führen kann. Dennoch muss festgehalten werden, dass das KAMM-Modell Nebel nicht explizit simuliert; es werden nur Schwellenwerte für die relative Luftfeuchtigkeit verwendet, um Flächen zu zeigen, über denen nach dem Landnutzungswandel die Bildung von Nebel wahrscheinlich ist. Um Nebelbildung besser modellieren zu können, müssen über die meteorologischen und vegetationsbezogenen Modelle hinaus vor allem auch die Physik der Wolken und der Aerosole und die Strahlungsverhältnisse betrachtet werden. Leistungsfähige Parametrisierungsverfahren für Strahlungs- und Wolkendynamik sollten in das KAMM-Modell eingearbeitet werden, damit die Nebelbildungsbedingungen und ihre räumliche Verteilung detaillierter dargestellt werden können.

*Résumé: L'impact des activités agricoles sur la formation de brumes dans une région aride en Chili*

Le but de cet article est d'étudier l'impact des aires irriguées sur le climat local et régional d'une vallée

du Chili aride, utilisant le modèle KAMM pour des simulations à la fin du printemps et de l'été. Pour chaque condition, deux types de simulation ont été réalisées : premièrement, la situation actuelle, c'est-à-dire considérant un fond de vallée où domine l'agriculture par irrigation (Simulation Vallée Humide, MVS), et deuxièmement, considérant une couverture végétale naturelle (Simulation Vallée Sèche, DVS). L'activité agricole ne modifie pas seulement les composants du bilan d'énergie dans la vallée, mais aussi aux alentours : la température de surface et, par conséquent, les champs de vent. L'augmentation de l'humidité du sol et de la couverture végétale provoque une diminution de l'albedo. Par conséquent, la radiation nette est plus élevée pour la situation MVS que DVS. Une partie importante de l'énergie est utilisée pour l'évaporation. Durant la journée, les flux turbulents de chaleur latente sont plus élevés dans le cas MVS. Moins d'énergie est donc disponible pour les flux de chaleur sensible. Dans la condition MVS, l'amplitude du cycle diurne de la température de surface dans le fond de vallée est plus faible. Tôt le matin, la température est plus élevée, tandis que l'après-midi, elle est plus faible dans le cas MVS. Hors de la vallée, ils existent des zones où la différence est élevée et positive (environ 2°C), ce qui coïncide avec les zones d'anomalies positives des flux turbulents de chaleur sensible. Près de la côte, tôt le matin, l'intensité des vents marins est plus élevée tandis que, durant l'après-midi, elle est plus faible dans le cas MVS. L'activité agricole fait s'affermir les vents ascendants le long des pentes comme dans la vallée durant la journée. L'augmentation de l'eau disponible du sol explique que l'humidité spécifique de surface soit plus élevée le long de la vallée. Les processus advectifs apportant de l'air humide depuis le fond de vallée expliquent que l'humidité spécifique hors du fond de vallée soit plus élevée dans la situation MVS. Tôt le matin et tard l'après-midi, l'humidité relative de la zone cultivée s'ap-

proche des valeurs de saturation, ce qui pourrait induire la formation de brumes pendant ces heures du jour. Néanmoins, KAMM ne simule pas explicitement la formation de brumes. Des valeurs seuil ont été utilisées pour indiquer les zones probables de formation de la brume après des changements d'usage du sol. Afin d'obtenir un modèle correct de la formation du brouillard, il est nécessaire de considérer et d'ajouter au module de fonctionnement de la végétation des processus physiques liés à la formation des nuages, les aérosols et la radiation solaire. Des paramétrisations efficaces concernant les nuages et la radiation solaire aurait été insérées dans KAMM ce qui permettra de représenter les conditions de brume et leur distribution géographique de manière plus fine.

*Dr. Sonia Montecinos, Vincent Favier, Orlando Astudillo, Yann Tracol*, Center of Advanced Studies in Arid Zones (CEAZA), University of La Serena, Benavente 980, La Serena, Chile, [sonia.montecinos@ceaza.cl](mailto:sonia.montecinos@ceaza.cl), [vincent.favier@ceaza.cl](mailto:vincent.favier@ceaza.cl), [orlando.astudillo@ceaza.cl](mailto:orlando.astudillo@ceaza.cl), [yann.tracol@ceaza.cl](mailto:yann.tracol@ceaza.cl)

*Prof. Dr. Wolfgang Börsch-Supan*, Fachbereich Mathematik der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, Staudingerweg 9, 55099 Mainz, Germany, [boersch-supan@mathematik.uni-mainz.de](mailto:boersch-supan@mathematik.uni-mainz.de)

*Dr. Inge Bischoff-Gauß*, Institut für Wissenschaftliches Rechnen (IWR), Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Germany, [inge.bischoff-gauss@imk.fzk.de](mailto:inge.bischoff-gauss@imk.fzk.de)

*Dr. Norbert Kalthoff*, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Germany, [norbert.kalthoff@imk.fzk.de](mailto:norbert.kalthoff@imk.fzk.de)

- *Water – Fog harvesting – Rural communities – Feasibility study – Ifni, Morocco*

**Maria Victoria Marzol**(La Laguna) and **José Luís Sánchez Megía** (Santa Cruz de Tenerife)

## **Fog Water Harvesting in Ifni, Morocco. An Assessment of Potential and Demand**

*Nebelwassergewinnung in Ifni, Marokko.  
Eine Bewertung des Potenzials und der Nachfrage*

With 9 Figures, 4 Tables and 5 Photos

This pilot experiment explores the feasibility of harvesting fog water in the Ifni region, Morocco, to help a small community that lives in an arid region and that needs this water. Four Standard Fog Collectors were installed at two mountain sites in the Ifni region, and these have been providing good quality data since June 2006. The results show that it is possible to obtain an average of 7.1 litres per m<sup>2</sup> per day at the inland site whereas only 1.9 l/m<sup>2</sup>/day were obtained on the coast. Variations, caused by the regional topography, in the direction of the wet winds from the Atlantic Ocean, which create the fog, determine the most suitable sites for the fog water harvesting.

*Summary: Fog Water Harvesting in Ifni, Morocco.  
An Assessment of Potential and Demand*

The collaboration between the Si Hmad Derhem Foundation (Morocco) and the University of La Laguna (Canary Islands, Spain) during the last two years has permitted studies on the potential of fog as a source of water in the Ifni region, situated at 29°N on the Moroccan Atlantic coast. Two experimental sites were chosen, at different distances from the coast and at different altitudes: Boulalam, situated at 300 m a.s.l. on a coastal mountain range, and Boutmezguida, 30 km inland and 1,225 m a.s.l. The instrument used was the Standard Fog

Collector (SFC). Two SFCs were installed at each site with orientations of 300° and 340° to find out which direction harvested more fog water – to use this information at a later stage, when larger screens will be built. The aim of the study was to find out if it is viable to obtain complementary water in this arid region where rain is the only source of water and where the drought of the last few years has left the wells dry making life more difficult for the small local rural population, with a low subsistence level and an average daily consumption of 15 litres of water, with the women and children doing most of the work, looking after the animals and fetching water, because the men have gone to nearby towns

in search of work. The water harvested by the screens comes from advective stratocumulus clouds carried by the trade-winds of the Azores anticyclone to the Moroccan coast which then penetrate inland until they hit the higher mountains. Significant differences between the two sites were found in the course of the research: The number of fog days is higher on the coast than inland, but less water is harvested: 2 l/m<sup>2</sup>/day on the coast versus 7 l/m<sup>2</sup>/day inland. The most favourable orientation for optimal collection is WNW on the coast whereas it is NNW in the inland mountains. There are no data that connect fog with either wind speed or rainfall, which is why it is necessary to install a weather station to collect information on these important parameters. Another difference between the two sites is the annual distribution of the fog water harvested because at Boutmezguida the yield is higher in spring and non-existent in summer, while at Boulaalam it is maximal in summer. In conclusion, we think that, at Boutmezguida, it is viable to use fog water as a supplementary resource to improve the quality of life of the people who live there.

*Zusammenfassung: Nebelwassergewinnung in Ifni, Marokko. Eine Bewertung des Potenzials und der Nachfrage*

Die Zusammenarbeit zwischen der Si Hamad Derhem Stiftung (Marokko) und der Universität La Laguna (Kanarische Inseln, Spanien) hat in den letzten zwei Jahren Untersuchungen zum Potenzial des Nebels als Wasserquelle in der Region von Ifni (an der Atlantikküste Marokkos gelegen, 29°N) ermöglicht. Zu diesem Zweck wurden zwei Untersuchungsgebiete mit unterschiedlichen Entfernungen zur Küste und verschiedenen Höhenlagen ausgewählt: Boulaalam, in 300 m Höhe ü. NN auf einer Bergkette an der Küste gelegen, und Boutmezguida, 30 km im Landesinneren gelegen, auf 1,225 m ü. NN. Als Instrumente wurden so genannte „Standard-Nebelwasserkollektoren“ (SFC) verwendet. An beiden Orten wurden jeweils zwei SFCs aufgestellt und auf 300° und 340° ausgerichtet, um festzustellen, aus welcher Richtung die größere Menge Nebelwasser gewonnen wird – um diese Information zu einem späteren

Zeitpunkt zu nutzen, wenn größere Schirme aufgestellt werden können. Das Ziel dieser Studie ist es, festzustellen, ob sich auf diese Weise in diesem ariden Gebiet, in dem Regen die einzige Wasserquelle ist, wo die Dürre der letzten Jahre die Brunnen ausgetrocknet hat und das Leben der Bevölkerung erschwert hat, zusätzliches Wasser gewinnen lässt. Es handelt sich um eine kleine ländliche Bevölkerung mit niedrigem Lebensstandard und einem durchschnittlichen täglichen Wasserverbrauch von 15 Litern. Frauen und Kinder leisten den größten Teil der Arbeit, hüten das Vieh und holen Wasser, da die Männer auf der Suche nach Arbeit in die Städte der Umgebung gezogen sind. Das mit Hilfe der Schirme gewonnene Wasser stammt aus advektiven Strato-Cumuluswolken, die durch die Passatwinde aus dem Azorenhoch an die marokkanische Küste gebracht werden und landeinwärts ziehen, bis sie auf die höheren Berge stoßen. Im Verlauf der Studie wurden bedeutende Unterschiede zwischen den beiden Untersuchungsstandorten festgestellt. Die Zahl der Nebeltage ist an der Küste höher als im Landesinneren, aber es wurde weniger Wasser gewonnen: 2 l/m<sup>2</sup>/Tag an der Küste gegenüber 7 l/m<sup>2</sup>/Tag im Binnenland. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass an der Küste WNW die günstigste Richtung für einen optimalen Wassergewinn darstellt, während landeinwärts auf den Bergen NNW optimal ist. Es liegen keine Informationen vor, inwieweit der Nebel mit der Windgeschwindigkeit oder der Regenmenge zusammenhängt. Daher besteht die Notwendigkeit, eine Wetterstation aufzustellen, um diese wichtigen Daten sammeln zu können. Ein weiterer Unterschied zwischen den beiden Untersuchungsstandorten liegt in der jährlichen Verteilung des gewonnenen Nebelwassers, da die Ausbeute in Boutmezguida im Frühling größer und im Sommer gar nicht vorhanden ist, während sie in Boulaalam im Sommer am höchsten ist. Daraus schlussfolgern wir, dass es praktikabel ist, in Boutmezguida Nebelwasser als zusätzliche Wasserquelle zu verwenden, um die Lebensqualität der Bewohner in diesem Gebiet zu verbessern.

*Résumé: L'abattage de l'eau du brouillard en Ifni, le Maroc. Une évaluation du potentiel et de la demande*

La collaboration, durant ces deux dernières années, entre la fondation Si Hmad Derhem (Maroc) et l'Université de La Laguna (Îles Canaries, Espagne) nous permet de connaître le potentiel du brouillard dans la région d'Ifni, située à 29° N sur la côte atlantique marocaine. A cette fin nous choisissons deux lieux d'expérimentation situés à des distances de la côte et des altitudes différentes. L'un, Boulaalam, dans la chaîne montagneuse du littoral à 300 m d'altitude, et l'autre, Boutmezguida, à 30 km à l'intérieur des terres et à 1,225 m au-dessus du niveau de la mer. L'instrument utilisé est le Standard Fog Collector (SFC). Dans chacun des lieux choisis nous installions deux SFCs orientés à 330° et 340° afin de savoir dans quelle direction nous recueillerons le plus d'eau de brouillard – dans le but d'utiliser cette information dans la phase postérieure, lors de la construction d'écrans de plus grande taille. Le but poursuivi par cette étude est de savoir s'il est possible d'obtenir de l'eau complémentaire dans un territoire aride où l'unique source d'eau procède de la pluie et où la sécheresse de ces dernières années a séché les puits et rendu la vie de la population plus difficile. Il s'agit d'une petite population rurale, consacrée principalement à l'élevage. Les femmes et les enfants y réalisent la plupart du travail – s'occuper des animaux et aller chercher l'eau –, puisque les hommes ont émigré dans les villes les plus proches à la recherche de travail. Le niveau de subsistance est assez bas et la consommation moyenne d'eau est de 15 litres par jour et par personne. L'eau recueillie par les mailles procède des nuages stratocumulus advectionnels que les vents alizés de l'anticyclone des Açores transportent jusqu'à la côte marocaine et qui, ensuite, pénètrent vers l'intérieur jusqu'à entrer en collision avec les montagnes les plus hautes. C'est un nuage transformé en brouillard quand il entre en contact avec le relief. Au cours de cette étude, d'importantes différences sont détectées entre les deux endroits. Le nombre de jours de brouillard est supérieur sur la côte qu'à l'intérieur, néanmoins moins d'eau y est recueillie : 2 l/m<sup>2</sup>/jour sur la côte face à 7 l/m<sup>2</sup>/jour à l'intérieur. L'orientation la plus favorable pour

une captation optimale est celle de WNW sur la côte, alors que dans les montagnes de l'intérieur elle est de NNW. Aucune donnée ne permettant de rattacher le brouillard à la vitesse du vent et à la pluie, il est donc nécessaire d'installer une station météorologique pour nous informer de ces variables si importantes. Une autre différence entre les deux lieux est la distribution annuelle de l'eau de brouillard recueillie puisque à Boutmezguida celle-ci est plus importante au printemps et nulle en été mais à Boulaalam elle est maximale en été. En définitive, nous pensons qu'il est viable d'utiliser l'eau du brouillard à Boutmezguida comme ressource supplémentaire qui améliorera la qualité de la vie des personnes qui y vivent.

*Resumen: La extracción del agua de la niebla en Ifni, Marruecos. Una evaluación del potencial y de la demanda*

La colaboración, durante los dos últimos años, entre la Fundación Si Hmad Derhem (Marruecos) y la Universidad de La Laguna (Islas Canarias, España) permite conocer la potencialidad de la niebla en la región de Ifni, situada a 29°N en la costa atlántica marroquí. Para ello se eligen dos lugares de experimentación a diferentes distancias de la costa y altitudes. Uno, Boulaalam, en la cadena montañosa del litoral a 300 metros, y el otro, Boutmezguida, a 30 km en el interior y 1,225 metros sobre el nivel del mar. El instrumental usado ha sido el Standard Fog Collector (SFC). En cada sitio se instalan dos SFCs con orientaciones 300° y 340° a fin de conocer con qué dirección se recolecta más agua de la niebla y ser utilizada esa información en la fase posterior, cuando se construyan pantallas de mayor tamaño. La finalidad del estudio es saber si es factible obtener agua complementaria en un territorio árido donde la única fuente de agua procede de la lluvia y la sequía de los últimos años ha secado los pozos y dificultado la vida de la población. Se trata de una pequeña población rural, con un bajo nivel de subsistencia, con un consumo medio de 15 litros de agua al día por persona y dedicada fundamentalmente a la ganadería, en la que las mujeres y los niños realizan los principales trabajos – cuidar a

los animales e ir a buscar agua – porque los hombres han emigrado a las ciudades más próximas en busca de trabajo. El agua colectada por las mallas procede de la advección de las nubes estratocumuliformes que los vientos alisios del anticiclón de Azores transportan hasta la costa de Marruecos y, después, penetran hacia el interior hasta chocar con las montañas más altas. En la investigación se detectan importantes diferencias entre los dos lugares. El número de días con niebla es superior en la costa que en el interior, sin embargo se colecta menos agua: 2 l/m<sup>2</sup>/día en la costa frente a 7 l/m<sup>2</sup>/día en el interior. Por otro lado, la orientación más favorable para una óptima captación es la WNW en la costa mientras que en las montañas del interior es la NNW. No hay datos que permitan relacionar la niebla con la velocidad del viento y la lluvia por lo que es necesario instalar una estación meteorológica

que informe de esas variables tan importantes. Otra diferencia entre los dos lugares es la distribución anual del agua de niebla colectada porque en Boutmezguida es mayor en primavera y nula en verano pero en Boulaalam es máxima en verano. En definitiva, pensamos que es viable utilizar el agua de la niebla en el sitio de Boutmezguida como un recurso suplementario que mejorará la calidad de vida de las personas que allí viven.

*Dra. M<sup>a</sup> Victoria Marzol*, Department of Geography, University of La Laguna, Campus de Guajara, 38071 La Laguna, Canary Islands, Spain, mmarzol@ull.es

*José Luis Sánchez Megía*, Spanish Meteorological Institute, C/ San Sebastián, 85, 38080 Santa Cruz de Tenerife, Canary Islands, Spain, sanchezmegia@inm.es

- *Fog collection – Polypropylene mesh – Fog variability – Rural water supply – Colombia*

**José M. Molina** (Fort Collins) and **Concepción M. Escobar** (Cali)

## **Fog Collection Variability in the Andean Mountain Range of Southern Colombia**

*Variabilität der Nebelwassersammlung in den südlichen kolumbianischen Anden*

With 5 Figures and 2 Tables

The spatial and temporal fog collection variability and the potential use of fog as an alternative source of water supply were evaluated in southern Colombia by means of fog collection experiments. Twelve Standard Fog Collectors (SFC) were installed in a mountainous zone, based on topographic and fog formation conditions. Different shade coefficients were evaluated, ranging from 1,680 to 1,850 m a.s.l. Results indicate a high potential for the use of fog to meet water requirements in rural areas. Data collection and analyses covered both dry and rainy seasons. Annual average collection rates amounted to 4.2 l per m<sup>2</sup> per day for precipitation + fog, and 3.3 l per m<sup>2</sup> per day for fog only. The most important month for collection was June with 5.3 l per m<sup>2</sup> per day for precipitation + fog, and 5.0 l per m<sup>2</sup> per day for fog only in dry days.

*Summary: Fog Collection Variability in the Andean Mountain Range of Southern Colombia*

Hydrological droughts occur naturally in some regions of the Colombian Andean watersheds and the associated water scarcity is aggravated by an advancing deforestation of the native highland forests. These events have negative consequences in terms of water supply to rural areas, for both human consumption and agricultural purposes. Low water availability in arid/semiarid regions and water scarcity in surface sources in mountainous

zones could be managed partially by means of water from fog collection. This study evaluates the spatial and temporal fog collection variability and analyses the potential use of fog as an alternative source of water supply in an Andean rural region of southern Colombia. The study region has a semiarid climate and the main activities in this zone are agriculture and stockbreeding. Water supply for both human consumption and meat and milk production are highly affected by low water availability, especially during the dry periods of January-March and June-July. Fog collection experi-

ments were carried out, and data collection covered both dry and rainy seasons in the period 2003-2005, with daily data registration of fog collection and precipitation. Twelve Standard Fog Collectors (SFC), built from polypropylene mesh with a vertical collection surface of 1.0 m<sup>2</sup>, were installed in a mountainous zone with an area of approximately 500 ha, ranging from 1,680 to 1,850 m a.s.l. The installation sites of the SFCs were selected based on topographic and fog formation conditions, and Chilean meshes with two shade coefficients, 35 % and 50 %, were tested. In order to assess the spatial fog variability, isolines of fog-water collection rates were estimated using Kriging as the interpolation method. Our results indicate a high potential for the use of fog to meet domestic water requirements in rural areas. Also, the observed collection yields are consistent with experimental results of fog harvesting from other countries in the Andean region. Annual average collection rates amounted to 4.2 l per m<sup>2</sup> per day for precipitation + fog, and 3.3 l per m<sup>2</sup> per day for fog only. The most important month for collection was June with 5.3 l per m<sup>2</sup> per day for rainfall + fog, and 5.0 l per m<sup>2</sup> per day for fog only in dry days. Finally, it was observed that the tested fog collectors can also be effective devices to collect rainwater, mainly in dry seasons.

*Zusammenfassung: Variabilität der Nebelwassersammlung in den südlichen kolumbianischen Anden*

In einigen Einzugsbereichen in den kolumbianischen Anden treten regelmäßig hydrologische Dürren auf. Die damit verbundene Wasserknappheit wird durch eine fortschreitende Abholzung der einheimischen Gebirgswälder verschärft. Diese Ereignisse haben negative Folgen für die Wasserversorgung in ländlichen Gebieten, sowohl hinsichtlich des Wasserverbrauchs der Bevölkerung als auch hinsichtlich der Nutzung für landwirtschaftliche Zwecke. Die geringe Verfügbarkeit von Wasser in ariden bzw. semiariden Gebieten und die Knappheit an Oberflächenwasser in Gebirgsregionen könnte teilweise durch Wassergewinnung aus Nebel ausgeglichen werden.

Die vorliegende Studie untersucht die räumliche und zeitliche Variabilität von Nebelsammlern und analysiert die mögliche Verwendung von Nebel als einer alternativen Wasserquelle in einer ländlichen Andenregion im Süden Kolumbiens. Das Untersuchungsgebiet weist ein semiarides Klima auf. Die wichtigsten wirtschaftlichen Nutzungen in diesem Gebiet sind Ackerbau und Viehzucht. Die Wasserknappheit stellt Probleme für den menschlichen Bedarf sowie auch für die Produktion von Fleisch und Milch dar, vor allem während der Trockenperioden von Januar bis März und von Juni bis Juli. Für die Untersuchung wurden Nebelsammel-Experimente durchgeführt. Die Datengewinnung umfasste tägliche Aufnahmen von Nebel- und Regendaten, sowohl in der Trocken- als auch in der Regenzeit, im Zeitraum 2003-2005. Zwölf „Standard-Nebelsammler“ (SFCs) mit jeweils einem 1 m<sup>2</sup> großen Netz aus Polypropylen wurden in einem ungefähr 500 ha großen Bereich des Gebirges, in einer Höhenlage zwischen 1680 und 1850 m ü. NN, aufgestellt. Die Standorte der Nebelsammler wurden auf der Grundlage der Topographie und der Nebelbildungsbedingungen ausgewählt. Es wurden zwei verschiedene Typen chilenischer Sammelnetze mit Bedeckungskoeffizienten von 35 % bzw. 50 % getestet. Zur Bestimmung der räumlichen Variabilität des Nebels wurden Isolinien der erhobenen Wassersammelmengen gezeichnet, unter Verwendung von Kriging als Interpolationsverfahren. Unsere Ergebnisse zeigen ein hohes Potenzial der Nutzung des Nebels für die Wasserversorgung der Haushalte in den ländlichen Gebieten. Die beobachteten Sammelerträge stehen dabei auch im Einklang mit den experimentellen Ergebnissen hinsichtlich der Nebelernte aus anderen Ländern der Anden-Region. Im Jahresdurchschnitt beliefen sich die Sammelmengen auf 4,2 l pro m<sup>2</sup> und Tag (Niederschläge + Nebel) und 3,3 l pro m<sup>2</sup> und Tag (ausschließlich Nebel). Der wichtigste Monat für die Wassergewinnung war der Juni mit 5,3 l pro m<sup>2</sup> und Tag (Niederschläge + Nebel) und 5,0 l pro m<sup>2</sup> und Tag (ausschließlich Nebel, an trockenen Tagen). Außerdem wurde festgestellt, dass die getesteten Nebelsammler durchaus auch als Geräte zum Auffangen von Regenwasser geeignet sind, vor allem in der Trockenzeit.

*Résumé: La variabilité de la collection de brouillard dans la Cordillère des Andes en Colombie méridionale*

Des sécheresses hydrologiques se produisent naturellement dans certaines régions des bassins versants des Andes colombiennes, et le manque d'eau y est aggravé par la progression de la déforestation des forêts naturelles de la haute montagne. Ces événements ont des conséquences négatives en termes d'approvisionnement en eau des zones rurales, tant pour la consommation humaine qu'à des fins agricoles. La faible disponibilité de l'eau dans les zones arides et semi-arides et la rareté de l'eau des sources de surface dans les zones montagneuses pourraient être compensées en partie par l'usage de l'eau provenant de la collection de brouillard. Cette étude évalue la variabilité spatiale et temporelle de la collecte de brouillard et analyse les possibilités d'utilisation du brouillard comme source alternative d'approvisionnement en eau dans une région rurale andine du sud de la Colombie. Le terrain de recherche présente un climat semi-aride, et les principales activités dans cette zone sont l'agriculture et l'élevage. L'approvisionnement en eau tant pour la consommation humaine que pour la production de lait et de viande est fortement affecté par une faible disponibilité de l'eau, en particulier pendant les périodes sèches allant de janvier à mars et de juin à juillet. Des expériences de collecte de brouillard ont été réalisées, la collecte de données couvrant à la fois des saisons sèches et humides au cours de la période de 2003 à 2005, avec un enregistrement quotidien des données de collecte de brouillard et de précipitations. Douze collecteurs de brouillard standard (SFC) en filet de propylène d'une surface de collection verticale de 1,0 m<sup>2</sup> chacun ont été installés dans une zone montagneuse d'une superficie d'environ

500 hectares sur une altitude allant de 1680 à 1850 m. Les sites d'installation des SFC ont été choisis en fonction de la topographie et des conditions de formation de brouillard, et deux maillages « chiliens » présentant des coefficients d'ombrage de 35% et de 50% ont été testés. Afin d'évaluer la variabilité spatiale du brouillard, des isolignes de taux de collecte d'eau de brouillard ont été estimées à l'aide de la méthode d'interpolation du krigeage. Nos résultats indiquent le potentiel élevé de l'utilisation du brouillard pour la couverture des besoins domestiques en eau dans les zones rurales. Aussi, les rendements de collecte observés sont compatibles avec les résultats expérimentaux issus de la collecte de brouillard dans d'autres pays de la région andine. Les moyennes annuelles des taux de collecte s'élevaient respectivement à 4,2 l par m<sup>2</sup> et jour (précipitation + brouillard) et à 3,3 par m<sup>2</sup> et jour (brouillard seulement). Juin s'est avéré le mois de collecte prépondérant avec respectivement 5,3 l par m<sup>2</sup> et jour (précipitation + brouillard) et 5,0 l par m<sup>2</sup> et jour (brouillard seulement pendant les journées sèches). Enfin, on a observé que les collecteurs de brouillard testés pouvaient aussi servir comme appareils efficaces pour recueillir l'eau de pluie, principalement pendant les saisons sèches.

*José M. Molina*, Department of Civil and Environmental Engineering, Colorado State University, Campus Delivery 1372, Fort Collins, CO, 80523-1372, USA, [jmmolina@engr.colostate.edu](mailto:jmmolina@engr.colostate.edu)

*Concepción M. Escobar*, Area de Recursos Hídricos, Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, Cali, Colombia, [c.marcela@cvc.org](mailto:c.marcela@cvc.org)

- *Tropical montane rainforest – Climatic and pedologic altitudinal change – Bolivia*

**Gerhard Gerold** (Göttingen), **Marcus Schawe** (Hamburg) and **Kerstin Bach** (Marburg)

## **Hydrometeorologic, Pedologic and Vegetation Patterns along an Elevational Transect in the Montane Forest of the Bolivian Yungas**

*Hypsometrischer Klima-, Boden- und Vegetationswandel  
im Bergregenwald der bolivianischen Yungas*

With 7 Figures, 4 Tables and 5 Photos

The “Mountain Agenda” of the World Summit on Sustainable Development 2002 emphasised the global relevance of montane cloud forests for important ecosystem services like water resources and biodiversity hot spots. Serious concern about the fate of tropical mountain forests has recently triggered intensified research on the ecological complexity of these forests. However, in Latin America research was focused on the Caribbean, Costa Rica and Ecuador (DFG Research Unit 816), whereas studies in the Andes of Peru and Bolivia were missing. In the framework of an interdisciplinary project aiming at understanding the relationships between vegetation and abiotic factors in the montane forest belts of the humid Yungas of Bolivia, hydrometeorologic observations and research on the altitudinal change of soils along an elevational gradient were carried out. Results suggest that the floristic change of vegetation belts and the differences in forest stature are influenced by complex interactions of climatic and pedologic variables along an elevational transect from 1,700 to 3,400 m a.s.l.

*Summary: Hydrometeorologic, Pedologic and Vegetation Patterns along an Elevational Transect in the Montane Forest of the Bolivian Yungas*

Floristic composition, structure and functioning of tropical montane rainforests depend on various abiotic and biotic factors although the precise nature of the interaction is still a matter of debate. As part of an interdisciplinary project aiming to understand the relationship between vegetation and abiotic factors in the montane forest belt in

the Yungas of Bolivia (Eastern Andes), hydrometeorologic observations and research on the altitudinal change of soils along an elevational gradient were carried out. Earlier studies have revealed a decrease in biodiversity and forest stature with altitude. Between October 2001 and October 2002 three weather stations were in operation at 1,850 m (lower montane forest, LMF), 2,600 m (upper montane cloud forest, UMGF) and 3,050 m.a.s.l. (sub-alpine cloud forest, SCF). Precipitation increases strongly with elevation from 2,310 mm

year<sup>-1</sup> at 1,850 m to 5,150 mm year<sup>-1</sup> at 3,050 m. Compared to clear-sky conditions, reductions in short-wave radiation inputs by fog and clouds are estimated at 37% at 1,850 m vs. 58-62% at 2,600 m and 3,050 m. However, intensities of photosynthetically active radiation (PAR) remain well above the light saturation point for local vegetation, and changes in PAR with elevation are therefore unlikely to control vegetation zonation. Penman-Monteith reference evaporation rates decrease from 3.3 mm day<sup>-1</sup> in the LMF zone to 1.4 and 1.3 mm day<sup>-1</sup> in the UMCF and SCF zones, respectively. Three zones of different dominant soil forming processes can be found: In the LMF (1700- 2200 m a.s.l.), Dystrudepts with high nutrient concentration and acidity are common. The pronounced change to the UMCF (2200-2700 m a.s.l.) coincides with the appearance of Placorthods with strong acidic conditions, deep ectororganic horizons and podzolization. In the SCF (2700-3400 m a.s.l.) hydromorphic processes dominate, resulting in Placaquods with low mineralisation rate and nutrient availability. Between 1890 m and 3060 m there is no continuous decrease in tree height, however mean canopy tree height decreases in the transition zone from UMCF to SCF. The maximum of cover intensity of epiphytes and the high increase of soil cover by mosses at around 2500 m a.s.l. indicates the importance of the factor of fog and cloud water input. The present results suggest that the difference in forest stature of LMF and UMCF is primarily due to the different radiation climate, while the difference between UMCF and SCF seems to be dominated by the strong increase in precipitation, leading in turn to persistently saturated conditions, high acidity and leaching in the SCF.

*Zusammenfassung: Hypsometrischer Klima-, Boden- und Vegetationswandel im Bergregenwald der bolivianischen Yungas*

Vegetationszusammensetzung, -struktur und ökologische Funktionen tropischer Bergregenwälder sind im Zusammenhang mit zahlreichen abiotischen und biotischen Einflussfaktoren zu sehen; viele ökofunktionale Zusammenhänge sind kaum bekannt und werden weltweit diskutiert. Im Rahmen eines

interdisziplinären Projektes in den montanen Bergregenwäldern der Yungas Boliviens wurden die Zusammenhänge von Klima, Boden und Vegetation entlang eines Höhengradienten untersucht. Frühere Studien in tropischen Bergregenwäldern zeigten eine Abnahme der Biodiversität und der Waldhöhe mit zunehmender Meereshöhe. Drei installierte Klimastationen in 1.850 m (montaner Bergregenwald LMF), in 2.600 m (hochmontaner Bergregenwald UMCF) und in 3.050 m Höhe (subalpiner Bergregenwald SCF) lieferten zwischen Oktober 2001 und Oktober 2002 kontinuierliche Daten. Mit der Höhe nehmen die Niederschläge sehr stark zu, von 2.310 mm/Jahr (1.850 m) bis auf 5.150 mm/Jahr in 3.050 m Höhe. Verglichen mit der potentiellen Globalstrahlung (unbewölkt) nimmt die Verminderung der Globalstrahlung durch den Wolken- und Nebel einfluss von 37% in 1.850 m auf 58-62% in 2.600 und 3.050 m Höhe zu. Die photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) unterschreitet nie die Lichtsättigung der montanen Vegetation und stellt für den Höhenwandel der Vegetation keinen Kontrollparameter dar. Die nach Penman-Monteith (FAO) bestimmte potentielle Verdunstung nimmt im Mittel von 3,3 mm/Tag (LMF) auf 1,4 mm/Tag (UMCF) und 1,3 mm/Tag (SCF) ab. Drei Stufen dominanter Bodenbildungsprozesse wurden identifiziert: Im LMF (1.700-2.200 m ü.M.) dominieren Braunerden (Dystrudepts) mit relativ hoher Nährstoffversorgung und Versauerung. Ein markanter Bodenwandel tritt mit Übergang zum UMCF (2.200-2.700 m ü.M.) auf, gekennzeichnet durch Podsole mit starker Versauerung, mächtigen organischen Auflagehorizonten und Podsolierungsprozessen. Im SCF (2.700-3.400 m ü.M.) sind Vergleyungsprozesse dominant. Anmoor-Staupodsole (Placaquods) sind durch eine sehr geringe Mineralisationsrate und Nährstoffverfügbarkeit charakterisiert. Untersuchungen zur Vegetationsabfolge (Waldstruktur) zeigen zwischen 1.890 m und 3.060 m keine kontinuierliche Abnahme der Baumhöhe. In der Übergangszone des hochmontanen Bergregenwaldes (UMCF) zur subalpinen Waldstufe (SCF, Nebel- bzw. Wolkenwald) nimmt die mittlere Baumhöhe deutlich ab. Aus dem Maximum des Epiphytenvorkommens und dem starken Anstieg der Moosbedeckung des Bodens ab 2.500 m ü.M. kann indirekt der große einfluss des Nebel- und Wolkenwassereintrags in das Waldökosystem abgeleitet werden. Der Wandel der Waldstruktur vom

montanen zum hochmontanen und subalpinen Bergregenwald korreliert vor allem mit der Änderung des Strahlungsklimas und einem zunehmendem Niederschlagsüberschuss mit ganzjähriger Bodenwassersättigung im UMCF und SCF, was zu starker Bodenversauerung mit Nährstoffauswaschung und Prozessen der Podsolierung und Vergleyung (SCF) führt.

*Résumé: Le changement hypsométrique du climat, du sol et de la végétation dans les forêts tropicales montagnardes des Yungas en Bolivie*

La composition de la végétation des forêts tropicales montagnardes ainsi que sa structure et ses fonctions écologiques sont à voir par rapport à de nombreuses influences abiotiques et biotiques. Beaucoup de relations éco-fonctionnelles ne sont à peine connues et on en discute dans le monde entier. Au cours d'un projet interdisciplinaire dans les forêts tropicales montagnardes des Yungas en Bolivie, des recherches ont été faites sur les relations entre le climat, le sol et la végétation le long d'un gradient d'altitude. Les études précédentes faites dans les forêts tropicales montagnardes avaient montré une diminution de la diversité biologique et de la hauteur des arbres correspondante à l'augmentation d'altitude. Trois stations climatologiques, installées à 1.850m (LMF), à 2.600m (UMCF) et à 3.050m (SCF), ont rendu des données continues entre le mois d'octobre 2001 et le mois d'octobre 2002. Plus l'altitude augmente plus les précipitations sont puissantes : de 2,310mm par an (1.850m) jusqu'à 5,150mm par an à 3.050m. Comparé à la radiation globale potentielle (sans nuages), la diminution de la radiation globale causée par l'influence des nuages et du brouillard augmente par rapport à l'altitude du terrain de 37% à 1.850m jusqu'à 58-62% à 2.600 et 3.050m. La radiation photosynthétique active (PAR) reste toujours inférieure à la saturation de lumière de la végétation montagnarde et ne présente donc pas de paramètre de contrôle pour le changement de la végétation avec l'altitude.

L'évaporation potentielle définie par Penman-Monteith (FAO) diminue en moyenne de 3,3mm par jour (LMF) jusqu'à 1,4mm par jour (UMCF) et 1,3mm par jour (SCF). Trois stages dans le procès dominant de formation du sol ont été identifiés : Dans le LMF (1.700-2.200m d'altitude) les terres brunes (Dystrudepts) dominent avec une fourniture copieuse de substances nutritives et une forte acidification. Un changement marqué de sol se manifeste au niveau de la transition dans l'UMCF (2.700-3.400m d'altitude) caractérisé par des podsoles avec une acidification prononcée, d'importantes couches organiques et procès de podsolification. Dans le SCF (2.700-3.400m d'altitude) les procès de gleyification sont dominants. Placaquods sont caractérisés par un taux de minéralisation très bas et une fourniture de substances nutritives peu élevée. Les recherches sur le changement de la végétation (structure de la forêt) ne montrent pas de diminution continue de la hauteur des arbres entre 1.890m et 3.060m. Dans la zone de transition entre la forêt tropicale montagnarde élevée (UMCF) et la forêt tropicale subalpine (SCF, la forêt dans les nuages et le brouillard) la hauteur moyenne des arbres diminue nettement. En se basant sur le maximum de gisement épiphyte et l'augmentation prononcée de la couverture de mousse sur le sol à partir de 2.500m, on peut constater indirectement la grande influence d'importation de brouillard et d'eau des nuages sur le système écologique des forêts (Yungas).

*Prof. Dr. rer. nat. Gerhard Gerold*, Geographisches Institut der Universität Göttingen, Goldschmidtstr. 5, 37077 Göttingen, Germany, ggerold@gwdg.de

*Dr. rer. nat. Marcus Schawe*, Hartwig-Hesse-Str. 11, 20257 Hamburg, Germany, mschawe@gmx.net

*Dr. Kerstin Bach*, Philipps-Universität Marburg, Fachbereich Geographie, Deutschhausstr. 10, 35032 Marburg, bachk@staff.uni-marburg.de